

І. М. Вишневський¹, Г. П. Гайдар¹, О. В. Третьякова¹, В. О. Гайдар²

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

РОЗВИТОК ЯДЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ІНСТИТУТІ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ

Висвітлено результати, одержані в Інституті ядерних досліджень НАН України, щодо розробок і використання ядерних технологій, реалізованих у ході виконання бюджетних тем, науково-технічних і технологічних проєктів та інноваційних програм.

Ключові слова: ядерні технології, ядерна медицина, ядерне легування, ядерний реактор, циклотрон, радіофармацевтичні препарати.

Вступ

Сучасне життя практично неможливо уявити без ядерних технологій, тобто технологій, що базуються на протіканні ядерних реакцій, а також технологій, спрямованих на зміну властивостей і переробку матеріалів, які містять радіоактивні елементи або елементи, на яких протікають ядерні реакції.

На сьогодні до основних напрямків розвитку ядерних технологій можна віднести ядерну енергетику, ядерну медицину, ядерне (трансмутаційне) легування, ядерні методи геофізичного дослідження, трансмутаційні технології утилізації ядерних відходів, дистанційне виявлення вибухових речовин методом нейтронного аналізу.

Основні напрямки розвитку ядерних технологій в ІЯД НАН України

Упродовж тривалого часу ІЯД НАН України був і залишається на передових позиціях в освоєнні, розвитку і впровадженні інноваційних технологій, якими є, безперечно, ядерні технології.

ІЯД НАН України має потужну експериментальну базу, яку складають унікальні в Україні ядерно-фізичні установки:

1) дослідницький ядерний реактор (ДЯР) ВВР-М (став до ладу 12 лютого 1960 р.; був першим ядерним реактором на теренах України) – реактор басейного типу потужністю 10 МВт з максимальним потоком нейтронів в активній зоні до $1,2 \cdot 10^{14}$ н/(см² · с). Конструктивно реактор має 27 вертикальних і 10 горизонтальних технологічних каналів для проведення наукових та прикладних досліджень;

2) для роботи з високорадіоактивними матеріалами (з активністю до 25000 Ки) споруджено унікальні єдині в Україні важкі захисні бокси («гарячі» камери) і введено в експлуатацію 23 вересня 1963 р.;

3) циклотрон У-120 (уведено в дію 2 квітня 1956 р.) дає змогу отримувати пучки протонів, дейтронів та альфа-частинок з енергіями 6,8, 13,6 та 27,2 МеВ відповідно; можна отримувати також пучки прискорених іонів азоту і вуглецю з енергією до 1 МеВ/нуклон;

4) перший в СРСР ізохронний циклотрон У-240 (уведено в дію 19 березня 1976 р.) дає змогу отримувати пучки протонів із плавним регулюванням їхньої енергії в межах 10 - 75 МеВ, пучки дейтронів з енергією 10 - 70 МеВ, а також прискорювати важкі іони з зарядом Z і масою A до енергії $140 Z^2/A$ МеВ;

5) електростатичний перезарядний прискорювач (тандем-генератор) ЕГП-10К (уведено в експлуатацію 26 грудня 1996 р.) дає змогу отримувати пучки протонів, дейтронів та альфа-частинок з енергією в межах 3 - 10 та 3 - 15 МеВ відповідно, дає можливість прискорювати важкі іони в широкому діапазоні мас;

6) підземна низькофонова лабораторія (знаходиться в смт. Солотвино Закарпатської області в діючій соляній шахті на глибині 430 м, уведена в дію в 1984 р.) призначена для пошуку та дослідження рідкісних процесів у фізиці атомного ядра та елементарних частинок (подвійного бета-розпаду атомних ядер, рідкісних альфа- та бета-розпадів тощо).

Важливо зазначити, що ядерно-фізичні установки періодично, відповідно до вимог часу, зазнають необхідної модернізації. Так, електростатичний генератор ЕСГ-5 перебудовано в тандем-генератор ЕГП-10К, що удвічі збільшило максимальну енергію прискорення легких частинок. Проведено також модернізацію практично всіх принципових вузлів ізохронного циклотрона У-240, який свого часу не мав аналогів у Європі. На цьому прискорювачі отримано багато унікальної експериментальної інформації про взаємодію легких частинок і важких іонів.

Протягом останніх років було проведено великий обсяг робіт щодо створення та введення в експлуатацію сучасних систем керування (2008 р.) та фізичного захисту дослідницького реактора ВВР-М (2005 р.), сховища відпрацьованого ядерного палива (2009 р.), системи очищення рідких радіоактивних відходів реактора, здійснено заміну акумуляторної батареї та аварійних дизель-генераторів системи аварійного електроживлення, силових і контрольних кабелів. Уведено в дію нову систему радіаційного контролю реактора. Виконано роботи для продовження строку експлуатації корпусу реактора та трубопроводів 1-го контуру. На сьогодні завершено перехід ДЯР ІЯД НАН України на низькозбагачене ядерне паливо (19,75 % збагачення за ^{235}U).

Завдяки високотехнологічним ядерно-фізичним установкам і високій кваліфікації наукового та інженерно-технічного персоналу в ІЯД НАН України отримано не тільки вагомі результати фундаментальних досліджень у галузях ядерної фізики та атомної енергетики, але й розроблено та впроваджено передові ядерні технології, зокрема: трансмутаційне легування напівпровідників, напрацювання джерел іонізуючого випромінювання для ядерної медицини та промисловості, розробки портативних джерел нейтронного випромінювання, виробництво радіофармпрепаратів, тритієві нейтралізатори статичної електрики та ін.

Наразі в інституті приділяється велика увага розробці новітніх ресурсозберігаючих ядерних, радіаційних і плазмових технологій та впровадженню їх у виробництво. Зокрема, розроблено унікальну методику вимірювання параметрів ядерної безпеки об'єктів атомної енергетики, реалізовану на об'єкті «Укриття»; у «гарячих» камерах виконують дослідження фізико-механічних властивостей металу «зразків-свідків», виготовлених із того ж матеріалу, що й корпус реактора; створено та впроваджено на АЕС України сучасне дозиметричне забезпечення та новітню систему моніторингу радіаційного навантаження корпусів реакторів ВВЕР-1000, що дає змогу одержувати інформацію, необхідну для безаварійної експлуатації атомних енергоблоків.

Ядерне (трансмутаційне) легування кремнію

Одним із важливих напрямків розвитку ядерних технологій в ІЯД НАН України є ядерне легування кремнію, яким займаються науковці відділу радіаційної фізики. Принциповою особливістю методу ядерного (трансмутаційного) легування у порівнянні з традиційними металургійними методами є те, що легуюча домішка не вводиться ззовні, а утворюється в результаті ядерних реакцій, що протікають при поглинанні високоенергетичних частинок атомами основної речовини. При цьому утворені стабільні ізотопи тих самих або сусідніх елементів періодичної системи рівномірно розподілені в усьому об'ємі кристала і виконують у матеріалі функцію електрично-активної домішки.

Кремній завдяки своїм унікальним властивостям був і залишається основним матеріалом напівпровідникової електроніки (світлове споживання кремнію близько 8 тис. т на рік; діаметр 100 - 300 мм, у перспективі до 400 мм). При цьому вимоги до технологічної досконалості монокристалів кремнію постійно зростають, наприклад виготовлення сучасних надвеликих інтегральних схем, детекторів ядерних випромінювань і деяких інших типів напівпровідникових приладів вимагають високої однорідності розподілу легуючої домішки в зливку. Зазвичай традиційні методи вирощування напівпровідникових кристалів (зокрема, метод Чохральського чи зонної плавки) не дозволяють отримати кремій із необхідною однорідністю легуючої домішки, причому найістотніше цей недолік впливає при зменшенні розмірів приладів (до мікро- та нанорозмірів). Тому останнім часом саме у зв'язку з новими більш жорсткими вимогами до напівпровідникових матеріалів щодо однорідності, чистоти технологічних операцій, а також у силу необхідності розвитку методів локального керування властивостями напівпровідників і підвищення стабільності пристроїв за умов впливу різних фізичних полів інтерес до ядерного легування істотно підвищився.

Існують різні способи *ядерного легування*, тобто введення в напівпровідниковий матеріал легуючої домішки за рахунок опромінення високоенергетичними частинками, зокрема *фотоядерне легування* під дією гамма-квантів, *нейтронно-трансмутаційне легування (НТЛ)* шляхом опромінення тепловими нейтронами, а також *ядерне легування під впливом заряджених частинок*. Що стосується останнього способу легування, то у відділі радіаційної фізики ІЯД НАН України виконано ряд робіт, присвячених вивченню можливостей ядерного легування кремнію шляхом опромінення альфа-частинками та протонами. Зокрема встановлено [1], що опромінення зразків n-кремнію протонами з енергією 25 MeV забезпечує одержання провідності р-типу за рахунок введення шляхом ядерної трансмутації атомів алюмінію (акцепторна домішка) та атомів магнію (донорна домішка) при ступені компенсації цих домішок, який визначається коефіцієнтом $k = 0,4$.

Велику увагу фахівці відділу радіаційної фізики приділяли нейтронно-трансмутаційному

легуванню кремнію. Кристали кремнію містять природну суміш стабільних ізотопів кремнію ^{28}Si (92,18 %), ^{29}Si (4,70 %) та ^{30}Si (3,12 %). При опроміненні тепловими нейтронами відбуваються (n, γ) -реакції: $^{28}\text{Si} (n, \gamma) ^{29}\text{Si}$, $\sigma_i = 0,08 \text{ б}$; $^{29}\text{Si} (n, \gamma) ^{30}\text{Si}$, $\sigma_i = 0,28 \text{ б}$; $^{30}\text{Si} (n, \gamma) ^{31}\text{Si}$, $^{31}\text{Si} (n, \gamma) ^{31}\text{Si} \xrightarrow[2,62 \text{ год}]{\beta^-} ^{31}\text{P}$, $\sigma_i = 0,11 \text{ б}$ (σ_i – переріз захоплення нейтронів атомами речовини).

Як видно з наведених виразів, у результаті останньої реакції в монокристалі кремнію утворюється домішка фосфору, і при створенні певних технологічних умов опромінення може бути досягнута висока однорідність розподілу домішки (у межах 1 - 5 %, у той час як металургійне легування дає змогу отримати рівномірність розподілу домішки на порядок гіршу – у межах 10 - 15 %) і отримано високоякісний матеріал із n-типом провідності.

В ІЯД НАН України в якості джерела теплових (повільних) нейтронів використовувався ядерний реактор ВВР-М, що виявилось економічно та технологічно вигідним, зважаючи на високу щільність нейтронного потоку та наявність каналів великого діаметра для проведення опромінення зразків. Слід зазначити, що для отримання високоякісної продукції необхідно враховувати не лише специфіку технологічного процесу нейтронного легування на реакторі ВВР-М, але також і супутні ефекти, що виникають під дією ядерного опромінення, зокрема утворення радіаційних дефектів, які необхідно видаляти спеціальною термообробкою, та наведену радіоактивність у зразках кремнію і конструкційних матеріалах. Фахівцями відділу радіаційної фізики проводилися й проводяться дослідження процесів генерації та трансформації радіаційних дефектів у кремнії та бінарних напівпровідниках; змін фізичних властивостей напівпровідників у радіаційних полях; механізмів та швидкостей утворення радіаційних дефектів; впливу нейтронного опромінення на радіаційну стійкість напівпровідникових детекторів.

У відділі радіаційної фізики ІЯД НАН України розроблено спосіб вимірювання питомого електричного опору зразків, призначених для нейтронного легування на ядерному реакторі ВВР-М, чотиризондовим методом [2], що дало змогу проводити вимірювання на зразках довільної форми, чого не можна було зробити двозондовим методом; виконано розрахунки режиму опромінення для отримання низькоомного нейтронно легуваного кремнію (НЛК) n-типу провідності для силової напівпровідникової техніки; розроблено методику спеціальних хімічних обробок зливків кремнію до і після опромінення; оптимізовано технологію термічної обробки (ре-

жими відпалу) опромінених тепловими нейтронами зливків кремнію [2], визначено критерії та умови опромінення вихідного матеріалу з метою отримання високоомного НЛК n-типу для напівпровідникових детекторів [3]; розроблено оптимальні умови радіаційних обробок для створення напівпровідникових матеріалів з підвищеною радіаційною стійкістю [4]. На основі НТЛ кремнію, отриманого при опроміненні на реакторі ВВР-М, виготовлено фотоприймачі, тиристори, а також детектори ядерних випромінювань [5]. Такі детектори використовувалися в ІЯД НАН України для проведення ядерно-фізичних експериментів. Вони мали високоякісні електричні характеристики, які залишалися незмінними упродовж більше ніж чотирьох років, високу роздільну енергетичну здатність і високу стабільність у роботі. За допомогою нейтронного легування для промислових цілей отримано кремній із питомим опором 150 - 600 Ом·см. Річний випуск такого кремнію на реакторі ВВР-М більше ніж 500 кг у готовому вигляді.

Ядерна технологія виробництва закритих джерел іонізуючого випромінювання

В ІЯД НАН України за допомогою інструментальних і радіохімічних методів нейтрон-активаційного аналізу проводилися дослідження мікроелементного складу зразків навколишнього середовища. Ядерно-фізичні принципи та методи використовуються для дослідження природних ізотопних аномалій, мікро- та нанобудови рідкіснометалевих мінералів і алмазів; для опромінення мінералів з метою визначення їхнього елементного складу.

Фахівцями інституту напрацьовано значний досвід щодо проведення опромінювальних робіт у реакторі, дистанційної роботи з високоактивними зразками та матеріалами, створено необхідні для цього автоматизовані пристрої та установки. На їхній основі відпрацьовано відповідні технологічні лінії на базі об'єднаного технічного комплексу «дослідницький ядерний реактор – «гарячі» камери». Набутий досвід і технологічні розробки нині успішно трансформуються в технології дослідно-промислового виробництва радіонуклідної продукції для потреб практики.

На дослідницькому реакторі ВВР-М в ІЯД НАН України проведено цикл досліджень нейтронних перерізів утворення радіоактивних ядер, у тому числі ^{192}Ir , що можуть бути використані як гамма-випромінювачі для створення на їхній основі джерел іонізуючого випромінювання (ДІВ) для різних сфер використання [6]. Розроблено ядерну технологію виробництва закритих ДІВ на основі ^{192}Ir . Також створено технології

для забезпечення надійної ізоляції ДІВ від їхнього неконтрольованого потрапляння в навколишнє середовище. Зокрема, розроблено автоматизовану установку для герметизації ампул з радіонуклідом ^{192}Ir [7], який використовується для задоволення потреб промислової дефектоскопії (гамма-дефектоскопія) та ядерної медицини (для високодозової брахітерапії). Слід зазначити, що створена установка є базовою в технологічному циклі по виробництву ДІВ на дослідницькому реакторі ВВР-М. Вона може використовуватися не лише для заварювання кришок тонкостінних ампул ДІВ на основі радіоізоотопу ^{192}Ir , але й для автоматичного ТІГ-зварювання (*Tungsten Inert Gas* – дугове електрозварювання неплавким вольфрамівим електродом в атмосфері захисного газу аргону) кільцевих швів будь-яких виробів із низьковуглецевих, легованих та конструкційних сталей.

Медико-біологічний комплекс на базі циклотрона У-120

У науково-дослідних центрах світу зазвичай прискорювачі заряджених частинок використовуються не тільки для наукових досліджень, але й для практичних цілей, зокрема для пучкової терапії. На сьогодні у світі бурхливо розвиваються медико-біологічні дослідження із застосуванням ізотопів різних елементів, синхротронного випромінювання і радіаційна терапія пухлин різними типами іонізуючих випромінювань на базі спеціалізованих медичних комплексів. В інституті у 70-х роках минулого століття на базі циклотрона У-120 був створений цільовий медико-біологічний комплекс (МБК), призначений для дистанційної нейтронної терапії, радіобіологічних та дозиметричних досліджень. Він являв собою ізолюваний блок, куди входили приміщення процедурної зали, пультової, кабінету лікаря та зали очікування [8]. На МБК У-120 упродовж 1983 - 1991 рр. за єдиною дозиметричною методикою було проведено дистанційну нейтронну терапію більш як 600 хворим із пухлинами різних локалізацій як у передопераційний період, так і за радикальної програми, самостійним курсом чи у поєднанні із фотонним опроміненням. Результати спостережень клініцистів підтвердили, що при використанні нейтронної терапії трирічне виживання хворих зросло на 13 - 17 %, а частота рецидивів зменшилася на 12 - 16 % порівняно з показниками фотонної терапії.

Сьогодні необхідність таких лікувальних методик і відповідних установ не викликає жодних сумнівів, причому протягом останнього десятиліття спостерігається пошук інтересу медиків до нейтронів як радіації великої проникаю-

чої дії. У зв'язку з цим на основі Національного проекту «Ядерні технології й електрофізична апаратура для медицини», концепція якого була затверджена Постановою Кабінету Міністрів України в березні 2013 р., планується створення на базі ядерно-фізичних установок ІЯД НАН України (циклотрон У-120) медико-біологічного комплексу циклотрона ІЯД НАН України та лабораторій Національного інституту раку МОЗ України, лабораторії нейтронної терапії на швидких нейтронах (6 - 14 MeV) зі щільністю потоку нейтронів $\sim 2,0 \cdot 10^7 \text{ н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Створення лабораторії нейтронної терапії на швидких нейтронах є одним із етапів побудови сучасного центру ядерної медицини.

Слід зауважити, що в інституті існує матеріально-технічна база не тільки для відновлення нейтронної терапії на базі циклотрона У-120, але й для створення центру адронної терапії міжнародного класу.

Ядерні технології виробництва радіофармацевтичних препаратів (РФП)

У сучасному світі взагалі, і в Україні зокрема, серцево-судинні (63 % від загального числа) і онкологічні (12 %) захворювання є основними причинами смертності населення, причому захворюваність на онкопатологію зростає і, отже, підвищується потреба в проведенні радіонуклідної діагностики та терапії. На сьогодні в Україні практично відсутнє власне виробництво медичних РФП. Потреби ядерної медицини задовольняються за рахунок імпортного постачання з Польщі та Республіки Узбекистан. Отримання власних РФП дасть змогу знизити ціну на такі препарати і, як наслідок, краще забезпечити ними лікувальні заклади України.

Фахівці лабораторії радіонуклідів і радіофармацевтичних препаратів в ІЯД НАН України мають значний досвід у розробці радіохімічних технологій отримання радіонуклідів і РФП для ядерної медицини. У 1982 - 1985 рр. на базі циклотрона У-240 було розроблено технології отримання: РФП натрію йодиду (^{123}I) перорального призначення й організовано серійний випуск; РФП хлориду талію (^{201}Tl) й отримано фармакопейну статтю; спосіб отримання о-йодгиппурату натрію (^{123}I). Після аварії на ЧАЕС у 1986 р. роботи з випуску РФП були призупинені у зв'язку з необхідністю виконання робіт із мінімізації наслідків аварії. З кінця 2004 р. розробки технологій отримання медичних радіонуклідів і РФП відновлено на базі дослідницького реактора ВВР-М, зокрема основних радіонуклідів для ядерної медицини – ^{131}I (натрію йодиду ^{131}I), ^{99}Mo (портативний генератор $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$) та $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (стаціонарна технологічна лінія).

В останні роки в ІЯД НАН України істотно активізувалася робота з організації серійного виробництва РФП, що широко використовуються в радіологічних відділеннях медичних закладів України:

1) натрію пертехнетат (^{99m}Tc) – найважливіший препарат для діагностики пухлин різних локалізацій і непухлинної патології організму, для візуалізації внутрішніх органів (печінки, нирок, серця, кісток і суглобів скелету, слинних залоз);

2) натрію йодид (^{131}I) – препарат, який використовується в клінічній практиці для лікування захворювань щитоподібної залози і з діагностичною метою для визначення залишкової тиреоїдної тканини та метастазів після хірургічного видалення пухлини.

Виробництво зазначених РФП в інституті базується на використанні дослідницького ядерного реактора ВВР-М [6, 9] і роботі лабораторії радіонуклідів і РФП Центру екологічних проблем атомної енергетики (ЦЕПАЕ), у якій уже частково виконано роботи з реконструкції і підготовки виробничих приміщень відповідно до вимог Державної служби з лікарських засобів. Технологічне устаткування розташоване у «гарячих» камерах. Лабораторії оснащено науково-дослідним обладнанням для контролю якості РФП.

Завдяки наполегливим зусиллям співробітників лабораторії радіаційної цитогенетики та доклінічного випробування РФП відділу радіобіології та радіоекології ІЯД НАН України створено й оснащено лабораторію для доклінічного випробування РФП на лабораторних тваринах, розроблено програму і проведено попереднє доклінічне випробування перших дослідних зразків РФП.

На сьогодні в ІЯД НАН України розроблено ряд технологій виробництва РФП на основі реакторних радіонуклідів ^{99}Mo (^{99m}Tc) і ^{131}I :

як альтернатива традиційному варіанту мобільного генератора сорбційного типу $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ у відділі дослідницького ядерного реактора розроблено технологію одержання розчину натрію пертехнетату – ^{99m}Tc (розчин $\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$) із централізованого екстракційного генератора в «гарячих» камерах ДЯР ВВР-М [10]. У медичні заклади буде поставлятися готовий до використання елюат натрію пертехнетату (^{99m}Tc) у герметично закритих флаконах з активністю 4 - 12 ГБк. Технологія розрахована на забезпечення клінік Києва та Київської області;

у лабораторії радіонуклідів і РФП ЦЕПАЕ для отримання натрію пертехнетату (^{99m}Tc) розроблено портативний генератор $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ для використання в медичних установах усієї України. Робочим матеріалом генератора служить

Mo-Zr-гель, який синтезується з використанням ^{99}Mo , отриманого при опроміненні природного оксиду молібдену нейтронами реактора [10]. Установка з синтезу гелю (дозволяє переробити за один цикл до 20 г оксиду молібдену) і модуль для збирання хроматографічної колонки генератора розміщені в «гарячій» камері. Управління виконавчими механізмами здійснюється оператором пульта дистанційного керування. Елюювання генератора ізотонічним розчином натрію хлориду здійснюється вакуумованими флаконами, розміщеними в захисному контейнері. Генератор забезпечує елюювання до 70 % ^{99m}Tc у 10 мл елюату;

розроблено технологію отримання ^{131}I для РФП натрію йодиду з опроміненого тепловими нейтронами в реакторі металевому телуру за реакцією $^{130}\text{Te} (n, \gamma) ^{131}\text{Te} \rightarrow \beta\text{-розпад} \rightarrow ^{131}\text{I}$;

розроблено одностадійну технологію виділення ^{131}I з металевому телуру термографічним методом. Вихід ^{131}I з матеріалу мішені перевищує 70 %. У процесі відокремлення ^{131}I від телуру в посудині-приймачі утворюється готовий препарат (натрію йодид) – прозорий безбарвний розчин, який можна використовувати для прийому перорально. Фізико-хімічні параметри цього препарату відповідають вимогам Європейської фармакопеї (*European Pharmacopoeia*) [11]. Проведені в лабораторії радіаційної цитогенетики та доклінічного випробування РФП (відповідно до вимог Державного експертного центру МОЗ України) експериментальні порівняльні дослідження РФП натрію йодид (^{131}I), напрацьованого в ІЯД, з референтним препаратом виробництва Радіоізотопного центру «Polatom» Інституту атомної енергії (Польща) підтвердили їхню біологічну еквівалентність [12];

розроблено методику отримання РФП натрію йодиду (^{131}I) в капсулах. Використання натрію йодиду в капсулах, порівняно з розчином натрію йодиду (^{131}I) перорального, дає можливість зменшити дозове навантаження ротової порожнини пацієнтів від опромінення ^{131}I , покращує якість скінтиграфічних досліджень функції щитовидної залози. Також при використанні капсул зменшується дозове навантаження обслуговуючого медичного персоналу. РФП є розчином натрію йодиду (^{131}I) без носія, диспергованим на поверхні твердого інертного носія, що міститься всередині желатинових капсул. Перевага використання останнього – запобігання випаровуванню ^{131}I із желатинових капсул та їхньому деформуванню після внесення водного розчину натрію йодиду. Для наповнення використовували желатинові капсули фірми «Капсужель» (Бельгія). Розроблено та виготовлено дистанційно керовані

ну установку дозування розчину натрію йодиду (^{131}I) в капсули та пакування їх у флакони. Підготовлена методика дозволить у подальшому розробити промислову технологію випуску препарату [13]. Досліджено фізико-хімічні характеристики натрію йодиду (^{131}I) в капсулах: радіохімічна [11] та радіонуклідна [14] чистота, вміст неактивних домішок [15], що задовольняють вимоги Європейської фармакопеї [11]. На даний час в інституті завершується реконструкція радіохімічної лабораторії, що відповідає вимогам Належної виробничої практики (*GMP – Good manufacturing practice*) до приміщень для виробництва лікарських засобів.

Приймаючи до уваги, що без знання локальних доз, поглинених у кожному органі, неможливо визначати ефективну дозу, з якою медики пов'язують цитогенетичні, гематологічні, імунологічні та інші радіобіологічні ефекти, в ІЯД НАН України у відділі радіобіології і радіоекології досліджено формування поглинених доз в органах і тканинах лабораторних щурів за перорального надходження ^{131}I [16]. В організмі ссавців формування доз внутрішнього опромінення визначається головним чином особливостями кінетики інкорпорованих радіонуклідів в органах і тканинах та їхніми ядерно-фізичними характеристиками [17, 18]. Оскільки йод є тиреотропним елементом, він має суттєві особливості дозоутворення порівняно з іншими радіонуклідами. Так, дози в органах і тканинах за короткочасного надходження ^{131}I майже на чотири порядки менші, ніж у щитоподібній залозі. Очевидно, саме завдяки цьому приділяли дуже мало уваги вивченню дозоутворення в інших органах, крім щитоподібної залози. У [16] показано, як, знаючи дозу у щитоподібній залозі, можна розрахувати дози в інших органах та тканинах.

Ядерні технології створення і практичного застосування метало-третієвих структур

У лабораторії фізико-технічних проблем джерел ядерних випромінювань ІЯД НАН України проведено цикл науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, спрямованих на створення і застосування на практиці метало-третієвих структур [19]. Третій є зручним ізотопом водню не тільки для отримання термоядерної ДТ-реакції в прискорювачах заряджених частинок або в термоядерних реакторах, але й у тих випадках, коли необхідно отримати стабільні в часі низькоенергетичні потоки електронів і рентгенівських випромінювань. Крім того, третій є чистим бета-випромінювачем, причому завдяки низькій проникаючій здатності бета-частинок тритію (макси-

мум 6 мм у повітрі, а в середньому – 0,9 мм) відпадає необхідність застосовувати різні захисні екрани, що є незаперечною перевагою.

У рамках інноваційного проекту «Розробка і виробництво радіаційних установок і технологій (пастеризаторів, стерилізаторів, ізотопних нейтралізаторів, аналізаторів, озонаторів) для промислових і медичних потреб» за програмою «Науково-технічні інноваційні проекти НАН України» в ІЯД НАН України розроблено ядерні технології для виготовлення радіоізотопних нейтралізаторів статичної електрики на основі тритію. Такі нейтралізатори можна використовувати для усунення шкідливої дії електростатичних зарядів, що виникають при переробці матеріалів, які сильно електризуються. Застосування нейтралізаторів дає змогу усунути порушення технологічного процесу (залипання матеріалів, їхнє розпушування, засвітка фотоматеріалів тощо) і підвищити безпеку праці (виключення пов'язаної з іскроутворенням можливості пожеж і вибухів, зниження до безпечного рівня величини електростатичних полів тощо). Розроблені нейтралізатори можна практично необмежено використовувати у виробничих приміщеннях без прийняття спеціальних заходів радіаційного захисту, і в ряді випадків такі нейтралізатори не мають альтернативи. Такі нейтралізатори можуть застосовуватися в хімічній, текстильній, поліграфічній та інших галузях промисловості, що виготовляють і переробляють плівкові і листові матеріали, які електризуються в процесі технологічного циклу. Слід зауважити, що в тритієвій лабораторії ІЯД НАН України можлива розробка нейтралізаторів, які будуть задовольняти спеціальним вимогам замовника.

Ядерні технології створення запаяних малогабаритних прискорювальних трубок для генерації нейтронів

У цій же лабораторії фізико-технічних проблем джерел ядерних випромінювань ІЯД НАН України проведено роботи за науково-технічним інноваційним проектом та розроблено ядерні технології створення запаяних малогабаритних прискорювальних трубок для генерації нейтронів [20], що використовуються в свердловинній апаратурі для пошуку та контролю за розробкою родовищ корисних копалин. Створені технології дозволили виготовляти прилади, які за своїми фізико-технічними характеристиками відповідають сучасним вимогам, а саме: стабільна робота свердловинного генератора при температурі навколишнього середовища $\sim 150^\circ\text{C}$, збільшений

ресурс роботи генератора без заміни прискорювальної трубки, розширений частотний діапазон генерації нейтронних імпульсів, підвищена міцність (механічна та електрична) трубки, зменшені габаритні розміри трубки тощо. Істотно менші габарити прискорювальних трубок зроблять можливим їхнє застосування у свердловинній апаратурі для розвідування та контролю видобутку нафтогазових родовищ.

Прикладні розробки в ІЯД НАН України

Поряд з фундаментальними роботами в ІЯД НАН України завжди велика увага приділяється впровадженню результатів досліджень у виробничу сферу. Наприклад, на практиці використовуються розроблені фахівцями технології, методики, експериментальні установки, призначені для робіт із радіаційного матеріалознавства, радіоелементного аналізу, ядерної медицини,

плазмових технологій, контролю радіоактивного забруднення довкілля тощо. Для підвищення безпеки ядерних установок розроблено автоматизовану систему контролю енерговиділення атомних енергетичних та дослідних реакторів, яка дає змогу надійно контролювати ці процеси. Створено також низку приладів для дозиметрії та контролю радіаційного забруднення довкілля – універсальний дозиметр-радіометр «Либідь», радіометри «Бета», «Бета-М» та «Прип'ять».

Висновки

ІЯД НАН України, завдяки наявності потужної матеріальної бази у вигляді сукупності високотехнологічних ядерно-фізичних установок, є одним із основних на теренах України осередків подальшого розвитку та успішного впровадження ядерних технологій у промисловість, сільське господарство, науку та медицину.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Гайдар Г.П., Дмитренко Н.Н., Дубар Л.В. и др.* Возможность трансмутационного легирования кремния посредством протонного облучения // ФТП. - 1986. - Т. 20, вып. 5. - С. 960 - 962.
2. *Варенцов М.Д., Дубовой В.К., Литовченко П.Г., Хиврич В.И.* Изменение однородности нейтронно-легированного кремния при термообработке // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. - 1983. - Вып. 2 (175). - С. 77 - 78.
3. *Гайдар Г.П., Долголенко А.П., Литовченко П.Г.* Получение высокоомного кремния с повышенной радиационной стойкостью: критерии и условия // Вопросы атомной науки и техники. - 2009. - № 4 - 2. - Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (94). - С. 263 - 269.
4. *Барабаш Л. И., Вишневский И.М., Гроза А.А. та ін.* Сучасні методи підвищення радіаційної стійкості напівпровідникових матеріалів // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (90). - 2007. - № 2. - С. 182 - 189.
5. *Бердниченко С.В., Воевода Г.П., Дубовой В.К., Литовченко П.Г.* Влияние свойств нейтронно-легированного кремния на характеристики детекторов ядерных излучений // Прикладная ядерная спектроскопия. - Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1984. - Вып. 13. - С. 4. - 267 с.
6. *Ворона П.М.* Використання реактора ВВР-М для виробництва радіонуклідної продукції // 40 років нейтронних досліджень на реакторі ВВР-М: Матеріали наук. конф. НЦ ІЯД НАН України. – К., 2000. - С. 48 - 55.
7. *Ворона П.М., Дубовецький С.В., Левченко В.П., Шевель В.М.* Автоматизована установка для дистанційної герметизації ампульних джерел випромінювання для промислової дефектоскопії на основі радіоізотопу іридій-192 // Щорічник-2011. Ін-т ядерних досл. НАН України. - К., 2012. - С. 82.
8. *Позмогов А.И., Бездробная Л.К., Бельский Е.М. и др.* Предклиническая апробация пучка быстрых нейтронов Киевского циклотрона У-120 // Тез. XI Всесоюз. съезда рентгенологов и радиологов. - М.: Обнинск, 1984. - С. 52 - 53.
9. *Ворона П.М., Разбудей В.Ф.* Вплив енергії нейтронів на утворення радіоізотопів при опроміненні мішеней у реакторі // Ядерна фізика та енергетика. - 2011. - Т. 12, № 3. - С. 235 - 241.
10. *Агеев В.А., Бездробная Л.К., Вишневский И.Н. и др.* Разработка технологий и организация производства радиофармацевтических препаратов в Институте ядерных исследований НАН Украины // Щорічник-2011. Ін-т ядерних досл. - К., 2012. - С. 125.
11. *European Pharmacopoeia* by Council of Europe. European treaty series, no. 50, 3rd ed. - Strasbourg: Council of Europe, 1997. - P. 1496.
12. *Бездробна Л.К., Агеев В.А., Дрозд І.П. и др.* Результати доклінічного дослідження радіофармпрепарату натрію йодид (^{131}I). Напрацювання Інституту ядерних досліджень НАН України // Щорічник-2011. Ін-т ядерних досл. - К., 2012. - С. 126.
13. *Агеев В.А., Дідковський В.І., Толочко Л.О., Левченко Н.І.* Отримання радіофармпрепарату (РФП) натрію йодиду (^{131}I) в капсулах // Щорічник-2008. Ін-т ядерних досл. - К., 2009. - С. 133.
14. *Джелепов Б.С., Кокшарова С.Ф.* Гамма-кванты изотопов, применяемых в нейтронно-активационном анализе. - М.: Атомиздат, 1974. - 73 с.
15. *Державна Фармакопея України.* 1-е видання / За ред. В. П. Георгієвського. - Харків: Видавнична група "РІРЕГ", 2001. - 531 с.
16. *Дрозд І.П., Липська А.І., Сова О.А., Шитюк В.А.* Формування поглинених доз в органах і тканинах лабораторних щурів за перорального надходження ^{131}I // Щорічник-2012. Ін-т ядерних досл. - К., 2013. - С. 126.

17. *Кинетика обмена, биологическое действие радиоактивных изотопов йода: монография / Под ред. проф. Ю. И. Москалева и В. С. Калистратовой.* - М.: Б. И., 1989. - 252 с.
18. *Вплив радіаційного фактора Чорнобильської зони відчуження на організм тварин / За ред. Я. І. Серкіза, М. Ю. Алесіної.* - К.: Атіка, 2006. - 320 с.
19. *Ключников А.А., Коломиец Н.Ф., Минчук Г.Я., Червинский В.Н.* Принципы построения и применения металло-третиевых структур. - К.: Наук. думка, 1992. - 215 с.
20. *Коломієць М.Ф., Коваленко О.В., Кубай Н.А. та ін.* Створення малогабаритної прискорювальної трубки для генерації нейтронів типу НТГ-2М // Щорічник-2007. Ін-т ядерних досл. - К., 2008. - С. 84.

И. Н. Вишнеvский¹, Г. П. Гайдар¹, А. В. Третьякова¹, В. А. Гайдар²

¹ *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

² *Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев*

РАЗВИТИЕ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАН УКРАИНЫ

Приведены результаты, полученные в Институте ядерных исследований НАН Украины, по разработке и использованию ядерных технологий, реализованных в ходе выполнения бюджетных тем, научно-технических и технологических проектов, а также инновационных программ.

Ключевые слова: ядерные технологии, ядерная медицина, ядерное легирование, ядерный реактор, циклотрон, радиофармацевтические препараты.

I. M. Vyshnevskiy¹, G. P. Gaidar¹, O. V. Tretiakova¹, V. O. Gaidar²

¹ *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

² *Taras Shevchenko National University of Kyiv*

DEVELOPMENT OF NUCLEAR TECHNOLOGIES IN THE INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH, NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE

Results obtained in the Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine on the development and use of nuclear technologies implemented in the course of the fulfillment of budget themes, scientific-technical and technological projects as well as innovative programs were outlined.

Keywords: nuclear technologies, nuclear medicine, nuclear doping, nuclear reactor, cyclotron, radiopharmaceutical preparations.

REFERENCES

1. *Gaidar G.P., Dmitrenko N.N., Dubar L.V. et al. // FTP.* - 1986. - Vol. 20, Iss. 5. - P. 960 - 962. (Rus)
2. *Varentsov M.D., Dubovoj V.K., Litovchenko P.G., Khivrich V.I. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 6. Materialy.* - 1983. - Iss. 2 (175). - P. 77 - 78. (Rus)
3. *Gaidar G.P., Dolgolenko A.P., Litovchenko P.G.* 2009. - No. 4-2. - *Voprosy atomnoj nauky i tekhniki. Ser. Fizika radiatsionnykh povrezhdenij i radiatsionnoe materialovedenie* (94). - P. 263 - 269. (Rus)
4. *Barabash L.I., Vyshnevskiy I.M., Groza A.A. et al // Voprosy atomnoj nauky i tekhniki. Ser. Fizika radiatsionnykh povrezhdenij i radiatsionnoe materialovedenie* (90). - 2007. - No. 2. - P. 182 - 189. (Ukr)
5. *Berdnichenko S.V., Voevoda G.P., Dubovoj V.K., Litovchenko P.G. // Prikladnaya yadernaya spektroskopiya.* - Leningrad: Energoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1984. - Iss. 13. - P. 4. - 267. (Rus)
6. *Vorona P.M. // 40 years of neutron research at reactor WWR-M: Proc. of the Conf. SC INR NAS of Ukraine.* - Kyiv, 2000. - P. 48 - 55. (Ukr)
7. *Vorona P.M., Dubovets'kyj S.V., Levchenko V.P., Shevel' V.M. // Shchorichnyk-2011 (Annual Report-2011).* Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine. - Kyiv, 2012. - P. 82. (Ukr)
8. *Pozmogov A.I., Bezdrobnaya L.K., Bel'skij E.M. et al. // Tez. XI Vsesoyuz. s'ezda rentgenologov i radiologov.* - Moskva: Obninsk, 1984. - P. 52 - 53. (Rus)
9. *Vorona P.M., Razbudev V.F. // Yaderna fizyka ta energetyka (Nucl. Phys. At. Energy).* - 2011. - Vol. 12, No. 3. - P. 235 - 241. (Ukr)
10. *Ageev V.A., Bezdrobnaya L.K., Vishnevskij I.N. et al. // Shchorichnyk-2011 (Annual Report-2011).* Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine. - Kyiv, 2012. - P. 125. (Rus)
11. *European Pharmacopoeia by Council of Europe. European treaty series, no. 50, 3rd ed.* - Strasbourg: Council of Europe, 1997. - P. 1496.
12. *Bezdrobna L.K., Ageyev V.A., Drozd I.P. et al. // Shchorichnyk-2011 (Annual Report-2011).* Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine. - Kyiv, 2012. - P. 126. (Ukr)
13. *Ageyev V.A., Didkovs'kyj V.I., Tolochko L.O., Levchenko N.I. // Shchorichnyk-2008 (Annual Report-2008).* Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine. - Kyiv, 2009. - P. 133. (Ukr)
14. *Dzhelepov B.S., Koksharova S.F.* Gamma rays of isotopes used in neutron activation analysis - Moskva: Atomizdat, 1974. - 73 p. (Rus)

15. *State Pharmacopoeia of Ukraine*. 1-st ed. / Ed. by V. P. Georgiyevs'kogo. - Kharkiv: Vydavnycha grupa "RIREG", 2001. - 531 p. (Ukr)
16. *Drozd I.P., Lyps'ka A.I., Sova O.A., Shytyuk V.A. // Shchorichnyk-2012 (Annual Report-2012)*. Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine. - Kyiv, 2013. - P. 126. (Ukr)
17. *Exchange kinetics, the biological effects of radioactive iodine isotopes: Monograph* / Ed. by prof. Yu. I. Moskaleva and V. S. Kalistratovoj. - Moskva: B. I., 1989. - 252 p. (Rus)
18. *Radiation effects on animals of the Chernobyl exclusion zone* / Ed. by Ya. I. Serkiz, M. Yu. Alesina. - Kyiv: Atika, 2006. - 320 p. (Ukr)
19. *Klyuchnikov A.A., Kolomiets N.F., Minchuk G.Ya., Chervinskij V.N. Principles of construction and application of metal-tritium structures*. - Kyiv: Naukova dumka, 1992. - 215 p. (Rus)
20. *Kolomiyets' M.F., Kovalenko O.V., Kubaj N.A. et al. // Shchorichnyk-2007 (Annual Report-2007)*. Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine. - Kyiv, 2008. - P. 84. (Ukr)

Надійшла 08.04.2014

Received 08.04.2014