



КОВАЛЕНКО
Олександр Васильович — кандидат технічних наук, завідувач лабораторії фізико-технічних проблем джерел ядерних випромінювань відділу Центр екологічних проблем атомної енергетики НАН України



ДАВИДОВСЬКИЙ
Володимир Володимирович — доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу теорії ядерних процесів Інституту ядерних досліджень НАН України



ВИШНЕВСЬКИЙ
Іван Миколайович — академік НАН України, почесний директор Інституту ядерних досліджень НАН України

РОЗВИТОК ЯДЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ІНСТИТУТІ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ

У статті розглянуто перспективні напрями розвитку ядерних технологій. На основі огляду закордонних джерел літератури і наукових прогнозів визначено інноваційні складові для ефективного використання матеріально-технологічної бази, наукового і кадрового потенціалу Інституту ядерних досліджень НАН України, що підтверджується перспективними і конкурентоспроможними результатами роботи Інституту за останні роки.

Ключові слова: ядерні технології, ядерна медицина, матеріально-технологічна база, науковий потенціал, інноваційний розвиток.

Понад 20% із першої сотні найбільших транснаціональних корпорацій світу використовують у технологічних і виробничих процесах різні ядерні технології для вирішення важливих завдань глобального розвитку, а саме, поліпшення системи охорони здоров'я населення, зокрема для посилення боротьби з онкологічними захворюваннями, в хірургії; продовольчого забезпечення населення; зниження енергетичного дефіциту, як у частині підвищення ефективності використання традиційних джерел (холодний крекінг нафти, збільшення нафтовіддачі нафтоносних пластів та ін.), так і в плані розвитку біопаливних технологій; дотримання екологічної безпеки — переробка відходів, очищення стічних вод, викидних газів тощо; підвищення ефективності систем безпеки — створення доглядових систем пасажирів і багажу, систем неруйнівного контролю та для розв'язання багатьох інших проблем.

Одним із найактуальніших напрямів досліджень, що активно розвивається в останні десятиліття, є ядерна медицина. Беззаперечні переваги методів ядерної медицини зумовили її сталий розвиток, і зараз у багатьох країнах світу ці методи стали невід'ємною частиною клінічної практики. Світове виробництво і попит на радіофармацевтичні препарати постійно зростає, приблизно на 10–15% щороку. У всьому світі на потреби ядерної медицини витрачають понад 50% річного виробництва радіонуклідів. Тільки в США щороку виробляється близько 13 млн наборів для діагностичних процедур і 100 млн лабора-

торних тестів, застосовується більш як 50 тис. терапевтичних доз, у галузі ядерної медицини практикують понад 30 тис. фахівців. І це далеко не єдиний напрям ядерних технологій, зумовлений потребами суспільства.

У цій роботі ми розглянемо актуальні напрями, переваги та наявний матеріально-технічний і науково-інноваційний базис Інституту ядерних досліджень НАН України для подальшого конкурентоспроможного розвитку ядерних технологій в Україні.

Огляд перспективних напрямів розвитку ядерних технологій у світі. Сьогодні суспільство стоїть на межі між формуванням недовіри до ядерних технологій через аварії у Чорнобилі та Фукусімі і швидко зростаючою потребою в електричній енергії для забезпечення життєдіяльності як кожної окремої людини, так і суспільства в цілому [1].

У сучасному світі найшвидшими темпами ядерні технології розвивають Китай та Індія, а також деякі азійські країни. Фундаментальні розробки в зазначеній сфері традиційно мають Франція, Канада, Росія, США. На ринку ядерних технологій успішно функціонують альянси, наприклад AREVA NP (Франція) – Mitsubishi Heavy Industries (Японія), Westinghouse Electric (США) – Toshiba (Японія), Hitachi (Японія) – General Electric (США) [2].

Розвиваючи ядерні технології, країни світу орієнтуються не лише на отримання стабільного джерела енергії, а й на можливість скоротити викиди парникових газів та відходи виробництва, від яких потерпає вся планета. Наприклад, Китай розглядає ядерні технології як довгострокову перспективу розвитку економіки. Одна з переваг використання ядерних технологій для Китаю – скорочення викидів CO₂ та зменшення обсягів відходів промислового виробництва. Враховуючи успіхи у зазначеній сфері, Китай може наздогнати Росію, ставши її головним конкурентом на близькосхідних ринках збуту продукції, що виготовляється із застосуванням ядерних технологій [3].

Подібна ситуація спостерігається в Індії, де частку ядерної енергетики в загальному енергобалансі країни до 2030 р. планується підви-

щити більш як у 7 разів – до 25%, що відповідає 40 ГВт виробленої електроенергії, і підняти рівень застосування ядерних технологій у різних сферах промислового виробництва за одночасного скорочення обсягів відходів [1].

На окрему увагу заслуговує розвиток ядерних технологій у країнах ЄС. Важливість використання ядерних технологій відображується в рішеннях загальноєвропейського рівня, прийнятих у зв'язку з необхідністю скорочення до 2020 р. викидів парникових газів на 20% [4].

Серед країн – членів ЄС Франція вважається найбільшою ядерною державою, оскільки посідає друге місце у світі після США за кількістю діючих реакторів і науково-дослідних центрів з розроблення та розвитку ядерних технологій. Сьогодні в країні діє спеціальний Інститут радіозахисту та ядерної безпеки, який займається вивченням та експертизою ядерних ризиків і радіологічних наслідків.

Ще у 1998 р. аналітична компанія із США Frost&Sullivan оприлюднила результати дослідження, в яких передбачалося різке зростання застосувань препаратів та діагностики ядерної медицини. Цей прогноз виправдався в ЄС, США, Японії та інших країнах, де активно використовують радіоактивні ізотопи для лікування онкохворих. На підтвердження передбачень аналітиків Науковий комітет Організації Об'єднаних Націй з питань дії атомної радіації наголосив, що медичне опромінення, особливо діагностична радіологія, є на сьогодні найпотужнішим штучним джерелом впливу іонізуючого випромінювання, і масштаби його застосування продовжують зростати швидкими темпами [5], що зумовило розвиток ядерних технологій у фармацевтиці [5–7].

Однак країною, яка кардинально змінила вектор розвитку ядерної енергетики та застосування ядерних технологій серед розвинених країн, є Німеччина. 14 березня 2011 р. Канцлер ФРН Ангела Меркель оголосила про перегляд стандартів безпеки для німецьких АЕС, і цю дату можна вважати початком радикальних змін [1]. Тоді ж було створено Етичну комісію безпечного енергопостачання (Ethics Commission for a Safe Energy Supply), яка й рекомен-

дувала відхід країни від ядерної енергетики до 2021 р. і обережне використання ядерних технологій у виробництві [5].

За прогнозами фахівців, такі країни, як Польща, Румунія, Чехія, Словаччина, Болгарія, Словенія, Литва, за певних обставин мають перспективи у вирішенні кількох найважливіших завдань: отримання значних обсягів відносно недорогої електроенергії та розвинення ряду технологій з використанням енергії ядерного поділу [3].

У 2014 р. Європейська комісія прийняла Стратегію енергетичної безпеки [8]. І хоча здебільшого рекомендації Стратегії стосуються саме енергетичної безпеки, все ж можна виділити ключові моменти розвитку ядерних технологій, такі як підтримка досліджень і розробок у межах Рамкової програми ЄС «Горизонт-2020» [9] і сприяння соціальному діалогу щодо розвитку перспективних та екологічно безпечних ядерних технологій [8].

Україна не стоїть осторонь зазначених процесів, адже євроінтеграція надає нові можливості для реалізації досвіду, накопиченого за майже 50 років роботи в цьому напрямі, і формує нову надбудову на базисі наявних розробок [7].

Наявна матеріально-технічна база. Після відкриття в 1939 р. поділу урану при бомбардуванні його ядер нейтронами стало зрозуміло, що настала нова ера розвитку енергетичних ресурсів. Незважаючи на те, що тривала війна, почали створюватися секретні лабораторії для вивчення і реалізації нових енергетичних напрямів. Найшвидше просувалися в цьому плані американські вчені. Атомне бомбардування Японії показало, що з'явилася нова надпотужна зброя. У цей період СРСР задіяв усі наявні, хоч і обмежені через воєнні дії, ресурси для розвитку робіт з цього напрямку і врешті досяг прогресу.

Це нове відкриття збурило все людство і дало поштовх для прискореного розвитку інших наукових напрямів, особливо матеріалознавства, для створення нових технологій, організації нових наукових центрів, підготовки висококваліфікованих наукових кадрів, що загалом зумовило великий «науковий бум» у світі.

Ці процеси були характерні і для СРСР, де в дуже короткі терміни було створено потужні наукові ядерно-фізичні центри, у тому числі й в Україні. Про деякі з них варто сказати окремо.

У 1956 р. в Києві було запущено *циклотрон У-120*, який дає змогу отримувати пучки протонів, дейтронів та α -частинок з енергіями 6,8; 13,6 і 27,2 МеВ відповідно; можна одержувати також пучки прискорених іонів азоту і вуглецю з енергією до 1 МеВ/нуклон.

12 лютого 1960 р. стала до ладу унікальна ядерна установка — *дослідницький ядерний реактор басейного типу ВВР-М* 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 і прикладних досліджень.

23 вересня 1963 р. введено в експлуатацію унікальні, єдині в Україні *важкі захисні бокси (гарячі камери)* для роботи з високорадіоактивними матеріалами (з активністю до 25000 Ки).

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

26 грудня 1996 р. введено в експлуатацію *електростатичний перезарядний прискорювач (тандем-генератор) ЕПП-10К*, який дає можливість отримувати пучки протонів, дейтронів та α -частинок з енергією в межах 3–10 МеВ і прискорювати важкі іони в широкому діапазоні мас.

У 1984 р. введено в дію *підземну низькофонову лабораторію* в смт Солотвині Закарпатської області, розташовану в діючій соляній шахті на глибині 430 м і призначену для пошуку і дослідження рідкісних процесів у фізиці атомного ядра та елементарних частинок (подвійного β -розпаду атомних ядер, рідкісних α - та β -розпадів тощо).

У 2003 р. введено в експлуатацію *експериментальну науково-технологічну радіаційну*

установку на базі потужного багатоцільового прискорювача електронів 4 МеВ, призначену для організації широкого кола технологічних і прикладних наукових досліджень, розвитку радіаційних технологій промислового виробництва; установка дає можливість опромінювати стаціонарним потоком промислові вироби великих габаритів з глибоким регулюванням інтенсивності та спектра енергії іонізуючого випромінювання.

Засновану в 1970 р. лабораторію для переробки радіоактивного ізотопу водню — тритію перетворено на сучасний науково-виробничий комплекс, здатний виконувати прикладні дослідження та науково-технічні розробки на світовому рівні [7]; розробки та продукція цього комплексу широко відомі в Україні й у світі.

Науково-технологічний і кадровий потенціал. За своїм науково-технологічним і кадровим потенціалом, запасами природної сировини Україна відповідає рівню держав, що мають повний ядерний цикл. Одним з осередків інтелектуального і наукового потенціалу у сфері ядерних технологій є Інститут ядерних досліджень (ІЯД) НАН України, в якому є висококваліфікований персонал, науково-технічні установки та пристрої для здійснення робіт і проведення досліджень, створено відповідні умови для ефективної роботи.

ІЯД НАН України має потужну експериментальну базу, до якої входять унікальні, єдині в Україні ядерно-фізичні установки, що дозволяють працювати над вирішенням перспективних завдань, актуальних як для України, так і для світового співтовариства загалом. Зокрема, це завдання, спрямовані:

- на підвищення рівня безпеки АЕС, створення технологічних систем захисту від природних катастроф і терористичних актів, систем забезпечення екологічної безпеки, технологій відновлення екосистем після зараження радіонуклідами та продуктами ядерного синтезу;
- створення на основі передових технологій ядерно-паливного циклу в Україні, який забезпечить гарантовану незалежність АЕС від імпорту ядерного палива і знизить потреби України в його закупівлі;

- вирішення проблем сховищ ядерних відходів, роботу над технологіями відновлення джерел ядерного палива, методиками захисту наявних сховищ ядерних відходів, які відпрацьовують або відпрацювали свій ресурс;

- проведення медико-біологічних досліджень з терапії онкологічних захворювань нейтронним опроміненням, розроблення сучасних технологій виготовлення радіофармпрепаратів, виробництво радіоактивних ізотопів для промисловості та медицини;

- проведення досліджень і виробництво нейтронних трубок різних типів, тритієвих джерел β -випромінювання, тритієвих джерел рентгенівського гальмівного та характеристичного випромінювання, різноманітних нейтралізаторів статичної електрики, генераторів нейтронів;

- масштабні дослідження з відновлення екосистем після радіаційного впливу, вивчення процесів міграції радіонуклідів у біогеоценозах, фізико-хімічних особливостей поведінки окремих радіоізотопів у природному середовищі.

Основні перспективні і конкурентоспроможні результати. Результати, отримані колективом науковців ІЯД НАН України в попередні роки, дозволяють говорити про прикладне значення розробок Інституту. Нижче наведено перелік лише окремих, найбільш актуальних і запитуваних на сьогодні робіт, здійснених з використанням ядерних технологій.

Розроблено та апробовано технології лікування онкохворих з використанням пучків прискорювача. Враховуючи медичні вимоги та реальні можливості, на базі циклотрона У-120 (рис. 1) було створено цільовий медико-біологічний комплекс (МБК), призначений для дистанційної нейтронної терапії, радіобіологічних та дозиметричних досліджень. Це ізольований блок, який складається з приміщень процедурної зали, пультової, кабінету лікаря та зали очікування (рис. 2).

Створено технології виготовлення радіофармацевтичних препаратів, здійснюється їх виробництво на ядерному реакторі та прискорювачах. Зокрема, реалізовано техноло-



Рис. 1. Циклотрон У-120 Інституту ядерних досліджень НАН України

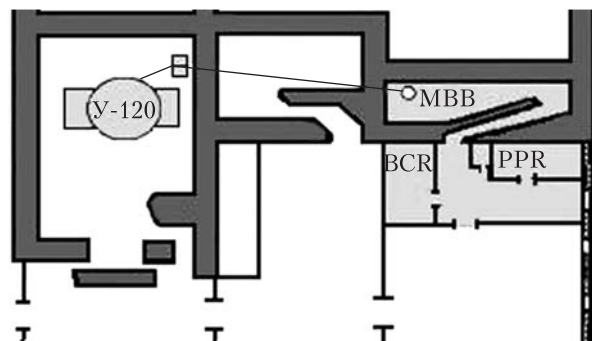


Рис. 2. План-схема медико-біологічного комплексу на базі циклотрона У-120: MBV – процедурний бокс для опромінювання нейтронами, BCR – кімната для контролю та виміральної апаратури, PPR – процедурне приміщення



Рис. 3. Гаряча камера стаціонарного екстракційного генератора ^{99m}Tc

гію отримання елюату натрію пертехнетату- ^{99m}Tc – радіофармпрепарату, який широко використовують у ядерній медицині для діагностики пухлин різних локалізацій і непухлинної патології організму (рис. 3); технологію виробництва розчину натрію йодиду (^{131}I) – радіофармпрепарату, який застосовують у ядерній медицині для діагностики і терапії раку щитоподібної залози та його метастазів; технологію виробництва капсул натрію йодиду (^{131}I) (рис. 4).

Створено ядерну технологію сортування насіння сільськогосподарських культур (наприклад, зерна пшениці) зі збільшеним вмістом білка; розроблено та апробовано технологію аероіонізації негативно зарядженими іонами приміщень птахофабрик з метою підвищення виводимості птахів, удосконалено технологію аероіонної обробки для надійного зберігання харчових продуктів, що дуже актуально зараз [10, 11].

У науково-технологічному комплексі лабораторії фізико-технічних проблем джерел ядерних випромінювань (ЛФТПДЯВ) ІЯД НАН України виготовляють нейтроноутворюючі метало-третієві мішені різних типів (рис. 5), розроблено малогабаритні запаяні вакуумні та газонаповнені прискорювальні трубки (рис. 6), генератори нейтронів у лабораторному і свердловинному варіантах для елементного нейтронно-радіаційного аналізу та імпульсного нейтронного каротажу газонафтових свердловин.

Науково-технологічний комплекс ЛФТПДЯВ ІЯД НАН України є відомим центром з переробки радіоактивного ізотопу водню на території пострадянського простору, про що свідчить велика кількість запитів на виконання науково-технічних робіт з багатьох країн світу – США, Чехії, Хорватії, Німеччини, Румунії, Білорусі, Узбекистану та ін. У рамках робіт із забезпечення екологічної складової та ресурсозбереження створено радіоізотопні джерела електричної енергії на основі тритію, проводяться дослідження з міграції тритію в навколишньому середовищі з метою розроблення технологій, що мінімізують небезпеку.

В інших підрозділах Інституту виготовляють детектори ядерних систем, проводять нейтронне трансмутаційне легування кремнію, виконують дослідження з опромінення нейтронами різних пристроїв та установок.

Слід зазначити, що в ІЯД НАН України створено та запущено в експлуатацію експериментальну науково-технологічну радіаційну установку. Основною метою її створення є розроблення промислових процесів і технологій із застосуванням методів прикладної ядерної фізики. Завдяки проведеним дослідженням є всі підстави стверджувати про наявність докладної інформації щодо суті практично всіх процесів, які відбуваються в опромінюваних матеріалах і виробках. Така інформація дає можливість технологам попередньо оцінювати остаточні результати променевої обробки і планувати виробництво продукції із заданими властивостями.

Отже, сучасне суспільство значною мірою залежить від ядерних джерел енергозабезпечення, а також широко використовує різноманітні ядерні технології в харчовій промисловості, медицині, метрології та інших сферах господарської діяльності. На сьогодні в 31 країні світу працюють енергетичні ядерні реактори, які, як правило, забезпечують потужні промислові бази. Проте існує і певна проблема – стурбованість суспільства перед ризиком небезпеки від використання ядерних технологій в умовах зростаючої загрози світового тероризму. Зазначені сфери застосувань потребують постійної підтримки і розвитку наукового потенціалу з метою їх убезпечення в процесі створення і вдосконалення ядерних технологій, особливо це стосується тих країн, де напрацьовано значний практичний досвід і є потужна науково-технологічна і кадрова база.

Стурбованість суспільства дещо нівелюється зростанням продовольчої проблеми, зокрема необхідністю вирішення питань державного регулювання безпечності та якості харчових продуктів. Зростають потреби в консервуванні і зберіганні продуктів харчування за допомогою сучасних технологій, розробленні нових технологій, розбудові мережі сучасних лабо-



Рис. 4. Установка для виробництва капсул натрію йодиду (^{131}I)

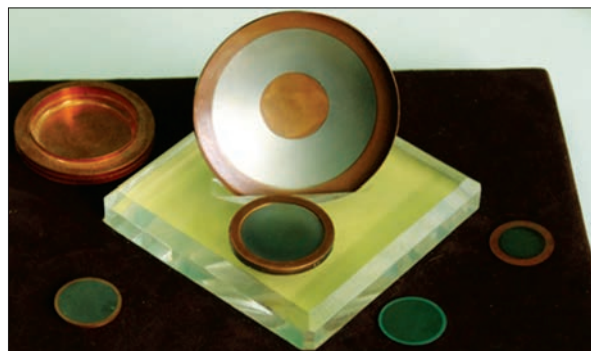


Рис. 5. Уніфікований ряд тритієвих і дейтерієвих мішеней типу МТ і МД



Рис. 6. Малогабаритна запаяна газонаповнена прискорювальна нейтронна трубка типу НТГ-2М

раторій, відповідних інспекційних органів з метою формування нової системи державного контролю якості харчових продуктів.

Крім того, враховуючи особливості продовольчої проблеми на світовому рівні, зокрема вирішення питань щодо консервування і безпеки харчових продуктів, варто підкреслити, що ядерні технології спрямовані насамперед на поліпшення виробництва та зберігання харчових продуктів, і за цими напрямками колектив ІЯД НАН України має змістовні розробки, а отже, і досить реальні шанси посісти передові

позиції на світовому ринку таких послуг. Крім того, з набранням чинності євроінтеграційних змін до Закону України «Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів» у редакції від 01.01.2016 [11], які було ухвалено Верховною Радою України з метою гармонізації законодавства України із законодавством Європейського Союзу у сфері безпечності та якості харчових продуктів, усе зазначене стає підґрунтям для подальшого розвитку прикладних ядерних досліджень в Україні.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Denysevych K.B., Landau Yu.O., Neyman V.O., Suleymanov V.M., Shylyayev B.A. (Ed. Landau Yu.O., Sigal I.Ya.) *Energy: Past, Present and Future*. Book 4: Development of nuclear energy and integrated energy systems. Kyiv, 2013. [Денисевич К.Б., Ландау Ю.О., Нейман В.О., Сулейманов В.М., Шильяев Б.А.; Наук. ред. Ландау Ю.О., Сігал І.Я. *Енергетика: історія, сучасність і майбутнє*. У 5 кн. Кн. 4: Розвиток атомної енергетики та об'єднаних енергосистем. Київ, 2013. <http://energetika.in.ua/ua/books/book-4>]
2. Katsay A.V., Nuzhdyn V.N. The global nuclear market and Atomenergoprom's a division of the "nuclear pie". *Atomic Strategy XXI*. 2007. No. 10. [Кацай А.В., Нуждин В.Н. Глобальный ядерный рынок и стратегии Атомэнергопрома в дележе «ядерного пирога». *Атомная стратегия XXI*. 2007. № 10. <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=1122>]
3. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR. Report 2008: Sources and effects of ionizing radiation. UN, New York. http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html
4. *Actual problems of nuclear physics and nuclear energy*: Proc. Int. Conf. (May 29 – June 3, 2006). [Актуальні проблеми ядерної фізики та атомної енергетики: матер. міжнар. конф. (29 травня – 3 червня 2006 р., Київ).]
5. IAEA. The General Conference. Nuclear Technology Review 2015. <https://www.iaea.org/sites/default/files/ntr2015.pdf>
6. Патон В.Є., Вакай О.С., Бар'яхтар В.Г., Неклюдов І.М. *On the strategy of development of nuclear energy in Ukraine*. (Kharkiv, 2008) [Патон В.Є., Бакай О.С., Бар'яхтар В.Г., Неклюдов І.М. *Про стратегію розвитку ядерної енергетики в Україні*. Харків, 2008.]
7. Vyshnevsky I.M., Haydar H.P., Kovalenko O.V. et al. *Radiation and Nuclear Technology in the Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine*. (Kyiv, 2014). [Вишневіський І.М., Гайдар Г.П., Коваленко О.В. та ін. *Радіаційні та ядерні технології в Інституті ядерних досліджень НАН України*. К.: Ін-т ядерних досліджень, 2014.]
8. Europe's Energy Security Strategy. http://www.inogate.org/documents/5_Hans_Van_Steen_EU_Energy_Security_RUSSIAN.pdf
9. Horizon 2020. Framework Program EU. <http://h2020.com.ua/uk/>
10. The Law of Ukraine. On basic principles and requirements for safety and quality of food. 1997. 771/97-VR. [Закон України «Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів» від 23.12.1997 № 771/97-ВР. Редакція від 01.01.2016. <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/771/97-%D0%B2%D1%80>]
11. Vakumenko O. State control of foodstuffs: what should be the system. *Golos Ukrainy*. 2016. [Бакуменко О. Державний контроль харчових продуктів: якою має бути система. *Голос України*. 27 липня 2016. <http://www.golos.com.ua/article/273239>]

O.V. Kovalenko, V.V. Davydovsky, I.M. Vyshnevsky

Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

THE DEVELOPMENT OF NUCLEAR TECHNOLOGY
AT THE INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH OF NAS OF UKRAINE

The article examines perspective directions of development of nuclear technologies. Innovative components for the use of material and technological base, scientific and human potential of the Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine on the basis of a review of foreign sources and projections are identified. Promising and competitive results of the Institute's work in recent years are presented.

Keywords: nuclear technology, nuclear medicine, material and technological base, scientific potential, innovative development.