



ВОЄВОДИН

Віктор Миколайович — член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, директор Інституту фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України

ПРО ВИКОНАННЯ ЦІЛЬОВОЇ КОМПЛЕКСНОЇ ПРОГРАМИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ «НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ СУПРОВІД РОЗВИТКУ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ГАЛУЗЯХ ЕКОНОМІКИ»

**Стенограма наукової доповіді на засіданні
Президії НАН України 3 лютого 2016 року**

У доповіді висвітлено основні результати, отримані під час виконання цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки». Виконання цієї програми сприяло посиленню науково-технічної підтримки безпечного і надійного функціонування та розвитку ядерної енергетики України, її ресурсної бази та використанню радіаційних технологій.

Вельмишановні члени Президії!

Вельмишановна академічна громадо!

Моя доповідь — це фактично звіт про виконання цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки».

Незважаючи на трагедії Чорнобиля і Фукусіми, нинішні реалії світової економіки та екології змусили людство повернутися до пріоритетного розвитку ядерної енергетики, оскільки на сьогодні ще не винайдено джерел виробництва дешевшої і екологічно чистішої електроенергії. Чим же є атомна енергетика для України? По-перше, це тепло і електроенергія. За останні роки частка атомної енергетики у загальному енергетичному балансі України помітно зростає. Якщо у 2013 р. вона становила 43 %, то в 2014 р. — вже 48 %, а в 2015 р. — 57 %, причому в окремі місяці, наприклад у лютому, її частка сягала 62 %. По-друге, це донорство економіки, оскільки оптова ринкова ціна на елек-

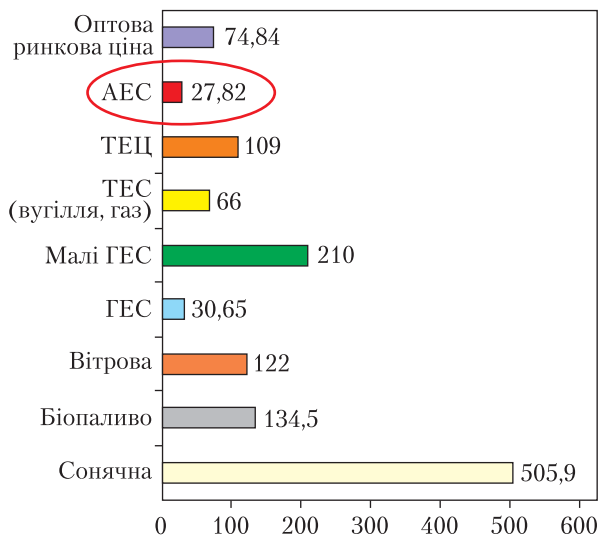


Рис. 1. Відпускна ціна на електроенергію в Україні (коп. за 1 кВт·год) станом на 01.04.2014

троенергію більш як удвічі вища за відпускну ціну з АЕС (рис. 1). Економія для бюджету завдяки зростанню частки атомної енергетики у загальному енергобалансі станом на грудень 2015 р. становила 247 млн грн порівняно з тарифами на виробництво електроенергії для ТЕС, а внесок у ВВП країни – 1,09 млрд грн.

Цільову комплексну програму наукових досліджень НАН України «Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки» було започатковано постановою Президії НАН України від 17.11.2010 № 319, а потім розпорядженням Президії НАН України від 08.02.2013 № 76 термін виконання Програми було подовжено на 2013–2015 рр. За цей період за Програмою виконувалося 65 наукових проектів із залученням 23 установ з 8 відділень НАН України, а саме: ядерної фізики та енергетики, фізико-технічних проблем матеріалознавства, фізико-технічних проблем енергетики, фізики і астрономії, механіки, хімії, загальної біології, економіки. Обсяг фінансування у 2013 і 2014 рр. становив 10,636 млн грн на рік, що в 2013 р. відповідало \$1,33 млн, тобто \$20,5 тис. на проект, а в 2015 р. – 9,785 млн грн, що відповідало вже \$410 тис. на рік, або

\$6,3 тис. на проект. Дослідження виконувалися за 11 розділами:

1. Обґрунтування подовження ресурсу і безпеки роботи основного обладнання АЕС, його модернізація та розробка методологічних основ виведення енергоблоків з експлуатації (керівник – чл.-кор. НАН України В.В. Харченко).

2. Розвиток сировинної бази ядерної енергетики (керівник – чл.-кор. НАН України Г.В. Лисиченко).

3. Технологічні основи виготовлення ядерного палива з матеріалів, які видобуваються на території України; наукова підтримка будівництва та функціонування заводу з фабрикації ядерного палива (керівник – к.ф.-м.н. В.С. Красноруцький).

4. Розробка нових радіаційно стійких конструкційних і функціональних матеріалів для потреб атомної галузі (керівник – чл.-кор. НАН України В.М. Воєводін).

5. Дослідження і розробка ядерно-енергетичних установок четвертого покоління з високою ефективністю та гарантованою керованістю, а також перспективних паливних циклів (керівник – к.ф.-м.н. В.С. Красноруцький).

6. Створення методик і технологій переробки активних відходів атомно-промислового комплексу, а також іммобілізації високоактивних відходів для довгострокового зберігання і захоронення (керівник – чл.-кор. НАН України Г.В. Лисиченко).

7. Розробка науково-технологічних рішень щодо будівництва у Чорнобильській зоні сховища довгострокового зберігання відпрацьованого ядерного палива і високоактивних радіаційних відходів (керівник – академік НАН України І.М. Вишневський).

8. Вдосконалення систем моніторингу та контролю щодо впливу підприємств ядерно-паливного циклу на довкілля (керівник – чл.-кор. НАН України Г.В. Лисиченко).

9. Створення та впровадження новітніх радіаційних технологій для промисловості, охорони довкілля, матеріалознавства, сільського господарства, медицини, діагностики матеріалів та технологічних процесів (керівник – академік НАН України І.М. Вишневський).

10. Одержання та використання короткоживучих радіоактивних ізотопів для потреб медицини і сільського господарства (керівник — чл.-кор. НАН України А.М. Довбня).

11. Удосконалення технологій фізичного захисту ядерних матеріалів, ядерних установок, радіоактивних відходів, джерел іонізуючого випромінювання (керівник — академік НАН України І.М. Вишневський).

Я зупинюся лише на окремих результатах, які, на мою думку, становлять найбільший інтерес для шановної аудиторії.

Розроблення вдосконалених методик оцінки окрихчування металу для розрахунків опору руйнування елементів обладнання першого контуру АЕС (Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка). Проведено аналіз сучасних методик оцінки радіаційного окрихчування металу елементів обладнання 1-го контуру АЕС. Виявлено переваги та недоліки методик, які сьогодні використовуються у світовій та вітчизняній практиці. Проведено чисельні розрахунки, результати яких дозволяють оцінити резерви міцності з урахуванням кривих тріщиностійкості, отриманих з використанням різних моделей радіаційного окрихчування. Результати цієї роботи було використано під час виконання державної експертизи з ядерної та радіаційної безпеки документів щодо результатів оцінки технічного стану корпусів реакторів енергоблоків № 1 і 2 Запорізької АЕС, а також для вирішення важливих для атомної енергетики України завдань з подовження ресурсу безпечної експлуатації діючих АЕС України, і отримано відповідні акти впровадження.

Подовження ресурсу трубопроводів та інших зварних елементів обладнання АЕС шляхом розробки комплексу зварювальних технологій з керованим формуванням зварних з'єднань (Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона). Розроблено технологію зварювання з керованим формуванням зварних з'єднань, яка забезпечує якісне формування зварних з'єднань у всіх просторових положеннях без формувальних пристроїв.

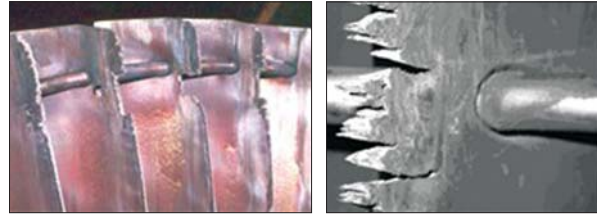


Рис. 2. Ерозійне руйнування 5-го ступеня лопаток циліндрів низького тиску парових турбін при експлуатації

Розробка концепції комбінованого протиерозійного захисту лопаток останніх ступенів турбін АЕС (ННЦ ХФТІ спільно з Інститутом проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного). Розроблено і погоджено з ВАТ «Турбоатом» нову концепцію протиерозійного захисту лопаток потужних парових турбін АЕС (рис. 2). Ця концепція основана на поєднанні активних і пасивних методів захисту, які передбачають як загартовування струмами високої частоти вхідних крайок, так і нанесення наноструктурного захисного покриття та вибір відстані між ступенями лопаток. Ерозійна стійкість покриття, розробленого в ННЦ ХФТІ, більш ніж утричі вища порівняно з електроіскровим зміцненням поверхні, яке зараз застосовується в «Турбоатомі». Ця робота є також важливим елементом імпортозаміщення, оскільки передбачає виробництво лопаток останніх ступенів турбін АЕС, які раніше постачав Ленінградський металевий завод у Санкт-Петербурзі.

Розробка та реалізація на енергоблоках АЕС України сучасних методів діагностичного контролю технічного стану металу корпусів реакторів та трубопроводів (ННЦ ХФТІ). Уперше розроблено, виготовлено та випробувано на стенді Южно-Української АЕС оптико-механічний модуль для дистанційної підготовки поверхні та визначення залишкових напружень і твердості металу корпусів реактора ВВЕР-1000 (рис. 3). Методика впроваджується для експлуатаційного контролю корпусів реакторів, устаткування і трубопроводів енергоблоків АЕС України.

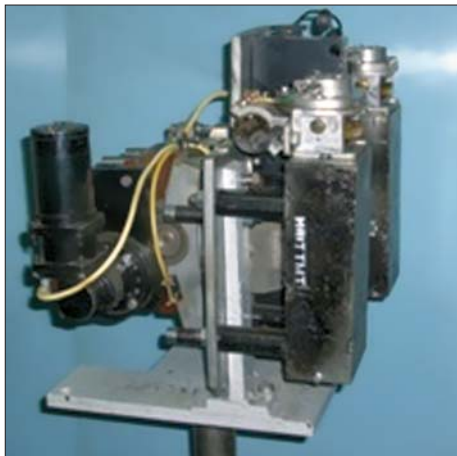


Рис. 3. Оптико-механічний модуль для дистанційної підготовки поверхні та визначення залишкових напружень і твердості металу корпусів реактора ВВЕР-1000

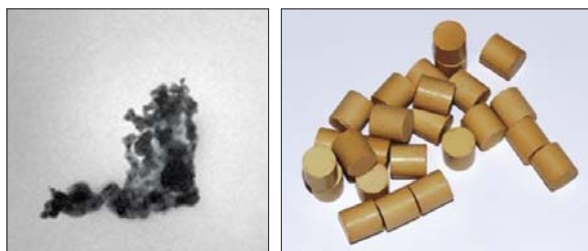


Рис. 4. Порошок (40–60 нм) і таблетки гафнату диспрозію (Du_2HfO_5)

Розробка методики і визначення критичних рівнів крихкої міцності опроміненого корпусного металу реакторів ВВЕР-1000 при перепризначенні їх ресурсу (Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова, Інститут ядерних досліджень, ННЦ ХФТІ). Запропоновано та апробовано методику прогнозування граничної величини нейтронного опромінення корпусного металу, яка дає змогу зменшити консерватизм розрахунків під час оцінювання радіаційного окрихчення металу за до- і над-проектних флюенсів і прогнозування здатності опроміненого металу чинити опір руйнуванню в умовах аварійного завантаження корпусу реактора (термошоку). Це надзвичайно важливий аспект для подовження терміну експлуатації атомних енергоблоків. Результати

цих досліджень використано при обґрунтуванні 30-річного терміну безпечної експлуатації корпусу реактора енергоблока № 4 Запорізької АЕС.

Оцінка металогенічного потенціалу торію кристалічних порід Українського щита (Інститут геохімії навколишнього середовища). Обґрунтовано принципи класифікації і виділено генетичні типи та підтипи руд торію залежно від їх зв'язку зі структурно-геологічними і фізико-хімічними процесами. Визначено коефіцієнти інтенсивності рудоутворення для різних типів руд. Виділено та охарактеризовано торієносні території Українського щита, визначено найперспективніші ділянки. Оцінено металогенічний потенціал торію кристалічних порід Українського щита.

Загалом, враховуючи всі регіони і генетичні типи рудопроявів торію, Україна має необхідні ресурси, реалізація яких здатна повністю задовольнити її внутрішні потреби в торії і створити належну мінерально-сировинну базу ядерної енергетики.

Виготовлення нейтронпоглинальних матеріалів на основі гафнату диспрозію (ННЦ ХФТІ). Як відомо, основним нейтронпоглинальним матеріалом є карбід бору. Під час виконання Програми створено новий вітчизняний матеріал на основі гафнату диспрозію (Du_2HfO_5) з більш високими експлуатаційними характеристиками. Досліджено процеси синтезу Du_2HfO_5 , отриманого спіканням порошків індивідуальних оксидів ($Du_2O_3 + HfO_2$), а також гафнату диспрозію, одержаного хімічним осадженням. Розроблено процеси виготовлення високощільних таблеток Du_2HfO_5 з використанням нанопорошків, отриманих співосадженням гідроксидів із сольових розчинів (рис. 4). НАЕК «Енергоатом» прийняв рішення щодо створення в Україні виробництва поглинаючих елементів і поглинаючих стрижнів систем управління та захисту реакторів ВВЕР-1000.

Підвищення корозійної стійкості і зниження насичення воднем цирконієвих сплавів модифікацією поверхні за рахунок комплексної іонно-плазмової обробки (ННЦ

ХФТІ). Це завдання постало після аварії на АЕС Фукусіма і зараз привертає увагу дослідників у всьому світі. В Україні створено бездефектні наноструктурні радіаційно стійкі покриття $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x$ з високими механічними і корозійними властивостями, які забезпечать довговічність і цілісність оболонок ТВЕЛів при експлуатації і в аварійній ситуації з нагріванням до 1100°C упродовж 3600 с (рис. 5).

Розробка технологій отримання реакторних сталей, зміцнених нанорозмірними виділеннями оксидів (ODS-сталей), і функціональних наноструктурованих керамік з високою радіаційною стійкістю та полішеними фізико-механічними властивостями (ННЦ ХФТІ). Ця робота була спрямована на отримання нових реакторних матеріалів. Аустенітні сталі мають високу технологічність, але низьку радіаційну стійкість. Було розроблено новий вид сталей, дисперсійно зміцнених нанорозмірними виділеннями оксидів, так звані ODS-сталі, та вивчено вплив на їх структуру складу оксидного нанопорошку, режимів механічного сплаву і механотермічної обробки. Міцнісні параметри ODS-сталі в 2–3,5 раза вищі, ніж базової сталі, а радіаційне розпухання в 5 разів менше.

Отримання текстурованих алмазних підкладок для виготовлення детекторів іонізуючих випромінювань для дозиметричного супроводження радіаційних та ядерних технологій (ННЦ ХФТІ). Створено перші вітчизняні детектори на основі полікристалічних алмазних плівок (рис. 6) для дозиметрії електронного та гальмівного випромінювання, здатні працювати в діапазоні значень потужності поглиненої дози до 2500 Гр/с , енергії електронів і γ -квантів $10\text{--}40\text{ МеВ}$, з величиною радіаційного ресурсу не менше 107 Гр . Ці детектори призначено для детектування сильних полів електронного та γ -випромінювання, а в перспективі й теплових нейтронів, і для внутрішньореакторної дозиметрії. Удосконалено метод CVD-осадження алмазних плівок у плазмі тліючого розряду, що дало змогу збільшити кількість отриманих за один цикл детекторів до 9 шт.



Рис. 5. Вплив покриття з $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x$ на корозію цирконієвих сплавів. Макет без покриття (верхній) руйнується і оксид обсіпається, на відміну від макета з покриттям

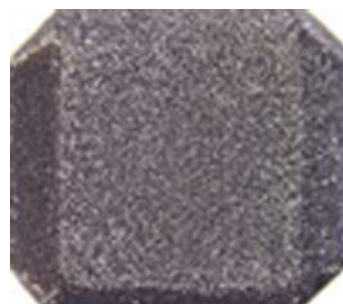


Рис. 6. Полікристалічна алмазна плівка, вирощена на підкладці з монокристалічного кремнію $8 \times 8 \times 2\text{ мм}$

Створення апаратури і проведення досліджень еволюції точкових дефектів і клас-терів вакансійного типу в конструкційних матеріалах під дією іонного випромінювання і наводнення (Інститут прикладної фізики). Розроблено і експлуатується цифровий спектрометр часу життя позитронів на базі радіоактивного джерела ^{22}Na з активністю 65 МБк , призначений для вимірювання концентрацій дефектів в опромінених конструкційних матеріалах. Для підвищення світлового виходу і поліпшення роздільної здатності за часом у 2015 р. спектрометр було модернізовано і проведено випробувальні вимірювання на зразку чистого цирконію.

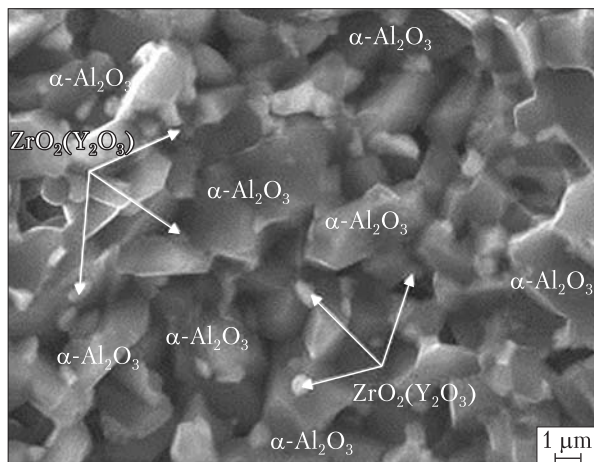


Рис. 7. Апатитоподібні захисні керамічні матеріали дрібнокристалічної структури з рівномірно розподіленою добавкою $ZrO_2(Y_2O_3)$ у структурі Al_2O_3

Розробка перехідних процесів у перспективному швидкому реакторі з хвилиною ядерного горіння та в матеріалах активної зони реакторів четвертого покоління (ННЦ ХФТІ). Досліджено перехідні процеси у швидкому реакторі з хвилиною ядерного горіння під час його запуску, примусової зупинки і повторного перезапуску. Розглянуто умови гетерогенного зародження бульбашок у перегрітому теплоносії на основі модифікованого підходу Гіббса. Класична теорія недооцінює інтенсивність зародження бульбашок у теплоносії, тобто ймовірність його закипання. Передбачається, що швидкий реактор з хвилиною ядерного горіння буде розрахований на приблизно 15 років експлуатації, ступінь вигорання ядерного палива в ньому становитиме 30 %, тоді як у нині діючих реакторах — 4–7 %. Розвитку досліджень з цього напрямку зараз у світі приділяють багато уваги, відомий підприємець Білл Гейтс залучив до цих робіт близько \$1 млрд від приватного бізнесу. Приємно, що і українські фізики не стоять осторонь цієї проблеми, хоча й без особливої фінансової підтримки.

Оптимізація теплогідрравлічних характеристик теплообмінного і парогенеруючого устаткування для високотемпературної газоохолоджуваної ядерної енергетичної

установки четвертого покоління тепловою потужністю 250 МВт (Інститут технічної теплофізики). Розроблено математичну модель, програмний комплекс та алгоритм теплогідрравлічної оптимізації пластинчасто-ребристих теплообмінників. Розроблено також математичну модель високотемпературного парогенератора з гелієм як первинним теплоносієм і з використанням інтервально-ітераційної розрахункової схеми та методу теплогідрравлічної оптимізації високотемпературного парогенератора зі змійовиковими трубами. За допомогою комп'ютерного моделювання отримано оптимальні геометричні та режимні параметри проміжного і попереднього теплообмінників блока перетворення енергії ГТ-МГР та парогенератора ГТ-МГР-ВЕР для виробництва водню методом високотемпературного електролізу пари.

Ізоляція радіоактивних відходів: розробка методів отримання апатитоподібних захисних керамічних матеріалів складу $Ca_9Sr(PO_4)_6F_2$ (ННЦ ХФТІ). Проблема радіоактивних відходів стоїть в Україні досить гостро, загальна кількість рідких РАВ оцінюється в 43,34 тис. м³. Ситуація ускладнюється виходом з українського ринку російських апатитів. На заміну природним апатитам запропоновано дрібнокристалічну структуру з рівномірно розподіленою добавкою $ZrO_2(Y_2O_3)$ у структурі Al_2O_3 (рис. 7), яка дозволила поліпшити характеристики міцності кераміки, збільшивши тріщиностійкість на 30 %, міцність на вигин — на 25 %, твердість — на 10 %. Виготовлено дослідну партію захисних контейнерів для ДСП «Харківський спецкомбінат». Ці роботи дали також змогу використати розроблені апатитоподібні матеріали в інтересах медицини.

Розробка методології розв'язання геометричних обернених задач теплообміну для підвищення безпеки експлуатації сухого сховища відпрацьованого ядерного палива (Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного). Результати роботи дозволили виробити рекомендації щодо експлуатації та модернізації сухого сховища відпрацьованого ядерного палива Запорізької АЕС з точки зору теплової складової безпеки

зберігання ВЯП, дотримання прийнятних температурних режимів, за яких не відбувається руйнування оболонок ТВЕЛів. Ці рекомендації використано на Запорізькій АЕС при зведенні радіаційнозахисної стіни по периметру майданчика сховища, введенні в експлуатацію другої черги сховища, переході Запорізької АЕС на використання тепловидільних збірок альтернативної конструкції.

Розробка та апробація програмно-математичного комплексу експрес-визначення вмісту техногенних радіонуклідів у органах і тканинах тварин у зоні впливу ЧАЕС та АЕС України (Інститут ядерних досліджень). З використанням експериментальних даних розроблено та апробовано програмно-математичний комплекс для експрес-визначення вмісту радіонуклідів ^{137}Cs , ^{90}Sr і ^{131}I в органах і тканинах тварин за різних режимів їх надходження в організм. В основу розробки покладено багатоканальну модель кінетики радіонуклідів. Створено зручний і простий у використанні багатовіконний інтерфейс програми, яка передбачає одночасну роботу з різними ізотопами. Практичну значущість роботи підтверджено декларативним патентом України на корисну модель і актом впровадження при виконанні НДР в Інституті експериментальної радіології НАМН України.

Визначення екологічних наслідків впровадження газофторидної переробки радіоактивних відходів атомно-промислового комплексу (ННЦ ХФТІ). Для таких проблемних у цьому аспекті міст, як Жовті Води і Дніпродзержинськ, здійснено модернізацію класичного методу оцінки ризиків, рекомендованого ВООЗ, та методу оцінки ризиків, заснованого на принципах гігієнічної регламентації.

Розробка нової прискореної технології виготовлення напівпровідникових детекторів ядерних випромінювань та їх випуск для ядерних експериментів (Інститут ядерних досліджень). Для виготовлення детекторів з великою товщиною чутливої області використано нейтронно-трансмутаційно легований Si, який є перспективним матеріалом для отримання якісних детекторів.

Розробка фотоядерної технології напрацювання медичного ізотопу Cu-67 та його виділення (ННЦ ХФТІ). Розроблено технологію одержання важливого для проведення радіоімунотерапії медичного радіонукліда ^{67}Cu опроміненням мішені з металевого цинку гальмівними γ -квантами з енергією >35 MeV з використанням вбудованої в «гарячу камеру» екстракційної системи виділення ^{67}Cu , а також створено «гарячу камеру» з виділенням важливого для медицини ізотопу Tc-99m із молібденової мішені. Запропоновано методики розрахунків напрацювання медичних радіоізотопів на нейтронному генераторі. Розроблено портативний нейтронний генератор для медичних застосувань.

Розробка систем обліку і контролю ядерних матеріалів, технологій і знань в Україні (Інститут ядерних досліджень). Створено навчальний посібник для наукових співробітників НАН України з контролю ядерних матеріалів, обладнання та технологій. На його основі розроблено навчальні й тестові матеріали за темами «Режими експортного контролю та контрольні списки як інструменти експортного контролю» і «Основи державного експортного контролю України». Розроблено комп'ютерну систему навчання і тестування.

Шановні колеги! На завершення доповіді, замість підсумку, я хотів би навести дві цитати. Перша — зі звернення президента Національної академії наук України академіка НАН України Б.Є. Патона до народних депутатів України: *«Дозвольте навести лише один вагомий приклад внеску академічної науки у вирішення проблем подовження строку експлуатації атомних електростанцій за участі Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут», інститутів ядерних досліджень, проблем міцності ім. Г.С. Писаренка, електрозварювання ім. Є.О. Патона, металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України. Проведені роботи з подовження термінів експлуатації 4 з 15 діючих енергоблоків АЕС вже дозволили на 10–20 років (у перспективі — на 30 років) відкласти їх виведення з експлуатації та будівни-*

цтво нових потужностей. За різними оцінками внесок НАН України складає близько 50%. У подальшому, згідно з розрахунками, фінансування в необхідних обсягах робіт з подовження строків експлуатації ще 6 енергоблоків АЕС дозволить відтермінувати державні капітальні витрати на будівництво нових блоків вартістю щонайменше 600 млрд грн, забезпечить протягом 2016–2020 рр. автономні кумулятивні надходження до Державного бюджету України та Пенсійного фонду України за рахунок сплати податків та єдиного соціального внеску обсягом 6,4 млрд грн».

Друга цитата — слова Президента України П.О. Порошенка, сказані під час його візиту 29 січня 2016 р. на Рівненську АЕС: «Надій-

ність нашої атомної енергетики доводить її конкурентоздатність, забезпечує енергобезпеку країни. Віру в гідне майбутнє України вселяє високопрофесійна праця колективу Рівненської АЕС. Адже атомна енергетика є індустріальною основою нашої держави».

Отже, виконання запропонованої цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Наукове забезпечення розвитку ядерно-енергетичного комплексу та перспективних ядерних технологій» на 2016–2018 рр. значною мірою гарантує економічну, енергетичну та екологічну безпеку України.

Дякую за увагу.

За матеріалами засідання підготувала О.О. МЕЛЕЖИК