

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ТА РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УКРАЇНІ

© 2014 МАТЮШЕНКО І. Ю.

УДК 330.3+332.1

Матюшенко І. Ю. Перспективи розвитку атомної енергетики та радіаційних технологій в Україні

Наведено основні напрямки і проблеми розвитку атомної енергетики в Україні. Встановлено, що при плануванні розвитку енергосистеми України в умовах дії Угоди про асоціацію з ЄС необхідно буде поєднувати вимоги до рівня цін і надійності поставок електроенергії, що можливо досягти лише на основі розвитку атомної енергетики як основного джерела базової електроенергії. Показано, що в Україні, де ядерна енергетика забезпечує 50% виробництва електроенергії, з 15 блоків АЕС чотири перевищили плановий термін експлуатації (30 років), а дев'ять пропрацювали понад 20 років, тобто вже сьогодні в урядових програмах необхідно передбачати технологічні та економічні заходи, спрямовані на подовження терміну експлуатації працюючих енергоблоків і поступове їх закриття. Визначено, що для атомної енергетики України необхідно провести диверсифікацію ядерних технологій і здійснити поступовий перехід на використання реакторів четвертого покоління, що будуть застосовуватися при добудовуванні нових енергоблоків, а також реалізувати ефективні рішення для розвитку ядерно-паливного циклу та поводження з радіоактивними відходами й відпрацьованим ядерним паливом. Представлено результати виконання Державної програми фундаментальних і прикладних досліджень з проблем використання ядерних матеріалів, ядерних і радіаційних технологій у сфері розвитку галузей економіки на 2004 – 2010 рр., а також Цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки» за 2011 – 2013 рр.

Ключові слова: ядерна енергетика, радіаційні технології, керований термоядерний синтез, ядерно-паливний цикл, ядерні матеріали.

Рис.: 1. **Табл.:** 1. **Бібл.:** 16.

Матюшенко Ігор Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри міжнародних економічних відносин, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна (пл. Свободи, 4, Харків, 61022, Україна)

E-mail: igormatyushenko@mail.ru

УДК 330.3+332.1

UDC 330.3+332.1

Матюшенко І. Ю. Перспективы развития атомной энергетики и радиационных технологий в Украине

Представлены основные направления и проблемы развития атомной энергетики в Украине. Установлено, что при планировании развития энергосистемы Украины в условиях действия Соглашения об ассоциации с ЕС необходимо будет объединять требования к уровню цен и надежности поставок электроэнергии, что возможно достичь только на основе развития атомной энергетики как основного источника базовой электроэнергии. Показано, что в Украине, где ядерная энергетика обеспечивает 50% производства электроэнергии, из 15 блоков АЭС четыре превысили плановый срок эксплуатации (30 лет), а девять проработали свыше 20 лет, то есть уже сегодня в правительственных программах необходимо предусматривать технологические и экономические меры, направленные на продолжение срока эксплуатации работающих энергоблоков и постепенное их закрытие. Определено, что для атомной энергетики Украины необходимо провести диверсификацию ядерных технологий и осуществить постепенный переход на использование реакторов четвертого поколения, которые будут применяться при достройке новых энергоблоков, а также реализовать эффективные решения для развития ядерно-топливного цикла и обращения с радиоактивными отходами и отработанным ядерным топливом. Представлены результаты выполнения Государственной программы фундаментальных и прикладных исследований по проблемам использования ядерных материалов, ядерных и радиационных технологий в сфере развития отраслей экономики на 2004 – 2010 гг., а также Целевой комплексной программы научных исследований НАН Украины «Научно-техническое сопровождение развития ядерной энергетики и применения радиационных технологий в отраслях экономики» за 2011 – 2013 гг.

Ключевые слова: ядерная энергетика, радиационные технологии, управляемый термоядерный синтез, ядерно-топливный цикл, ядерные материалы.

Рис.: 1. **Табл.:** 1. **Библ.:** 16.

Матюшенко Игорь Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры международных экономических отношений, Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина (пл. Свободы, 4, Харьков, 61022, Украина)

E-mail: igormatyushenko@mail.ru

Matyushenko I. Y. Prospects of Development of Nuclear Energy and Radiation Technologies in Ukraine

The main directions and problems of development of nuclear energy in Ukraine are presented. It has been determined, that in planning the development of the energy system of Ukraine under the Ukraine-European Union Association Agreement will be needed to combine the requirements to the level of prices and the security of supply of electricity, which can be achieved only on the basis of development of nuclear energy as a primary source for basic electric energy. It has been displayed, that in Ukraine, where nuclear power provides 50% of electricity production, four of 15 blocks of the NPP have already exceeded the planned operating life (30 years), and the other nine have worked for more than 20 years, thus in the current government programmes should be provided for technological and economic measures aimed at the continuation of life of the working reactors and their gradual closure. It has been determined also, that nuclear energy in Ukraine needs a diversification of nuclear technologies and to implement a gradual transition to using the fourth-generation reactors, which are to be applied in the construction of new power plants, as well as to implement effective solutions for the development of the nuclear fuel cycle and the management of radioactive waste and spent nuclear fuel. Results of implementation of the State program of fundamental and applied research on the use of nuclear materials, nuclear and radiation technologies in the sphere of development of economic sectors for 2004 – 2010, as well as results of comprehensive target program of research by the National Academy of Sciences of Ukraine «Scientific and technical support for the development of nuclear energy and the application of radiation technology in the sectors of the economy» for 2011-2013 are presented.

Key words: nuclear energy, radiation technologies, controlled thermonuclear fusion, nuclear fuel cycle, nuclear materials.

Pic.: 1. **Tabl.:** 1. **Bibl.:** 16.

Matyushenko Igor Yu. – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of International Economic Relations, V. N. Karazin Kharkiv National University (pl. Svobody, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine)

E-mail: igormatyushenko@mail.ru

Атомна енергетика в Україні – це характерний приклад того, як формувався атомний комплекс колишнього СРСР. З моменту розпаду Радянського Союзу минуло вже 25 років, але ще й зараз можна констатувати, що [1]: корпус реактора виробляють у Колпіно, на Іжорському заводі (м. Санкт-Петербург РФ), а також у м. Волгодонськ (Ростовська область РФ); уран збагачується в м. Ангарськ (на Байкалі, РФ); цирконієвий прокат – на Чепецькому механічному заводі (Удмуртія, РФ); ядерне паливо фабрикується із вказаних комплектуючих під Москвою та в Сибіру (РФ); продукція поставляється за всіма стратегічними напрямками: від Чукотки до Мурманська, а заодно в Україну, Болгарію, Чехію, Словаччину, Фінляндію.

В Україні з атомного комплексу колишнього СРСР було лише два напрями: науково-проектні інститути та власне атомна генерація. На момент розпаду Союзу – 12 реакторів типу ВВЕР і три РБМК.

Для позначення орієнтирів розвитку енергосистеми країни в 2006 р. було розроблено і прийнято, а в 2013 р. доповнено «Енергетичну стратегію України на період до 2030 р.». Але ще до опублікування повного тексту енергостратегії більшість експертів зійшлися на думці, що вона не відповідає сучасним викликам енергетичної безпеки України. Так, 2014 р. повністю підтвердив ці оцінки, а отже, потрібна термінова переорієнтація енергостратегії. І це можливо і слід зробити в найкоротший термін.

Відповідно до «Енергетичної стратегії України на період до 2030 р.» основними напрямками розвитку енергетики країни залишаються традиційні джерела енергії – вугілля і мирний атом. Для інших типів генерації (ГЕС, ГАЕС, ПДЕ тощо) хоча й прогнозується зростання, але все ж таки їм залишаються другорядні ролі, як це вказано на *рис. 1* [2].

Якщо в перших начерках енергостратегії починали з прогнозу будівництва до 2030 р. понад десяти нових атомних блоків, то в останніх варіантах ця цифра скоротилася вже до трьох-чотирьох. Та й ця цифра під великим сумнівом через брак у держави потрібних фінансових ресурсів. З огляду на нинішній стан вітчизняної економіки, Україна в доступному для огляду майбутньому не зможе профінансувати нові проекти в атомній енергетиці, тобто можемо розраховувати тільки на те, що є сьогодні.

Водночас, існує низка проблем, які потребують вирішення:

1) до 2026 р. більшість блоків АЕС вироблять плановий ресурс. Термін їх експлуатації треба буде подовжувати, що спричинить зростання ризиків під час експлуатації;

2) видобуток уранових руд і виробництво уранового концентрату здійснюється в Україні, але збагачення урану – тільки за кордоном, насамперед в Російській Федерації;

3) основним гравцем на українському ринку ядерного палива є російські компанії (75 – 95%). Є певний досвід використання на наших АЕС ТВЕЛів виробництва американської компанії Westinghouse, але поки що він не має широкого розвитку.

Таким чином, можна зробити висновок, що сьогодні на 75 – 95% атомну енергетику України контролює Росія через відповідні російські компанії, які зазвичай частково або повністю належать державі. Це означає, що за рішенням уряду РФ вони, наприклад, пославшись на технічні проблеми, можуть створити реальні проблеми з поставками ТВЕЛів на українські АЕС.

Крім того, підписання *Угоди про асоціацію з ЄС* ставить економіку України перед необхідністю провес-

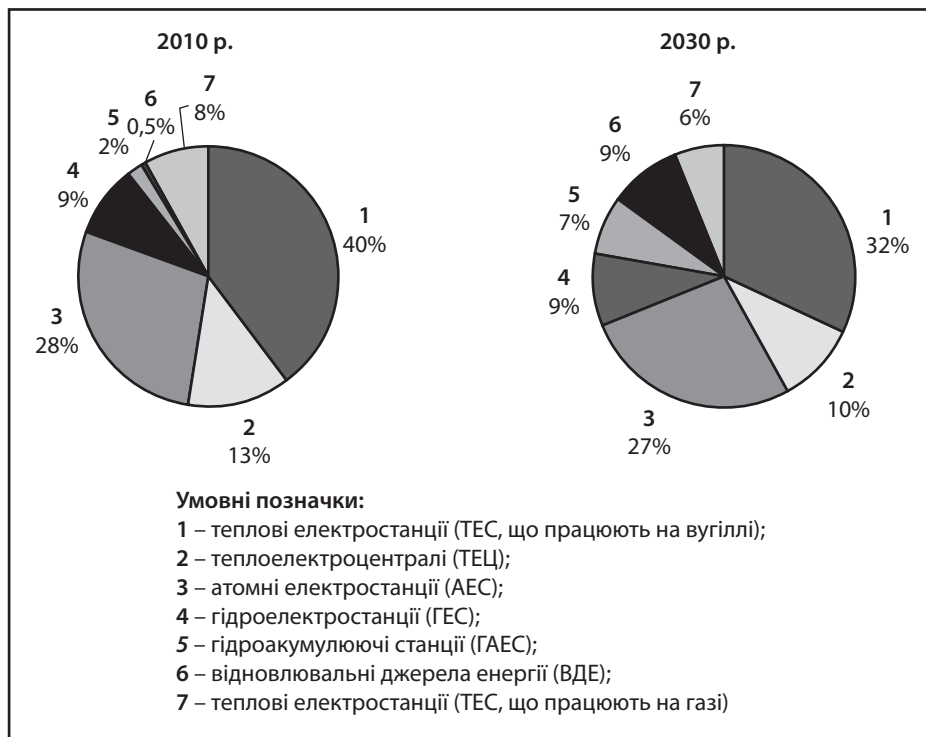


Рис. 1. Баланс енергопотужностей згідно з «Енергетичною стратегією України на період до 2030 р.» зі змінами у 2013 р. [2]

ти дуже складні й амбіційні реформи. При цьому перетворення в країні доведеться здійснювати, очевидно, на тлі економічного, політичного, ідеологічного та воєнного протистояння з РФ. У такій ситуації Україні потрібно ретельно вивіряти кожен крок у пошуку балансу між економічною ефективністю і безпекою [3].

Енергетика при цьому вже стала найважливішою сферою євроінтеграційних реформ і пошуку такого балансу. При плануванні розвитку енергосистеми України, зокрема у сфері низьковуглецевих джерел енергії, необхідно буде поєднувати вимоги до рівня цін і надійності поставок електроенергії. А досягти цього можливо лише на основі *розвитку атомної енергетики як основного джерела базової електроенергії*.

Для реалізації такої мети в Україні є всі підстави:

- ✦ на території України зосереджено *найбагатіші родовища урану та цирконію*, що, попри Чорнобильську катастрофу, визначило майбутній розвиток атомної енергетики. На відміну від газу, Україна от уже понад 20 років має можливість для локалізації критичних елементів ядерно-паливного циклу. Тобто, уран – свій, цирконій – свій (однойменне НВО тільки нещодавно остаточно було ліквідовано – знищували його планомірно з 1990-х, але технологію зберегли). Побудувати завод ядерного палива цілком можливо, на що потрібна тільки політична воля очільників уряду;
- ✦ *реактори* є можливість виготовляти на ВАТ «Турбоатом» (м. Харків) або на Краматорському машинобудівному заводі.

Однак розвиток усіх цих напрямів у цілому та кожного окремо штучно гальмувалося задля різних поступок із боку РФ (наприклад, заради газу по 50 дол. за тисячу кубометрів). Крім того, енергоємність вітчизняного промислового виробництва майже не змінилася з 80-х років минулого століття. При цьому атомна галузь тривалі роки залишалася залежною від російського монополіста як постачальника базових реакторних технологій.

Майже 15 років триває, штучно стримуючись, кваліфікація альтернативного російському постачальника ядерного палива – Westinghouse (США). Було проведено декілька інформаційних війн, інспірованих російським конкурентом американської компанії. При цьому аналогічні інформаційні війни розпочиналися на всіх рівнях, щойно українські атомники виносили як предмет дискусії вибір альтернативних російським реакторних технологій.

Сьогодні проблема диверсифікації та максимальної локалізації в ядерних технологіях зрушила з мертвої точки: НАЕК «Енергоатом» згортає співробітництво з російськими контрагентами за дуже широким спектром напрямів – від виготовлення комплектуючих для автоматизованих систем керування технологічним процесом до будівництва в Україні власного *Централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива*.

З іншого боку, використання реакторів поділу (АЕС) неминуче ставить дві інші глобальні проблеми –

утилізації високоактивного відпрацьованого палива (ТВЕЛів) та інших радіоактивних відходів, а також ядерної безпеки. Нині у світі накопичено близько 200 тис. т відпрацьованих ТВЕЛів, по 1 млн т відходів середньої активності й дуже активної води та понад 10 млн т відходів низької активності. Щороку ці цифри збільшуються на 5% [4].

Для відпрацьованого палива поки що безальтернативним для всього світу (й Україні) є відкладене рішення: складування відпрацьованих ТВЕЛів на невідзначено тривалий термін після первинної переробки, досі – у РФ. Проблему безпеки повністю не вирішено навіть у країнах із передовою технологією.

Особливо актуальна ця проблема в Україні, де ядерна енергетика забезпечує 50% виробництва електроенергії. Але при цьому з 15 блоків АЕС чотири перевищили плановий термін експлуатації (30 років), а дев'ять пропрацювали понад 20 років. Тобто вже сьогодні в урядових програмах необхідно передбачати технологічні та економічні заходи, спрямовані на подовження терміну експлуатації працюючих енергоблоків і поступове їх закриття.

При цьому необхідно враховувати такі фактори [3]:

1) *подовження строку експлуатації існуючих в Україні блоків АЕС*. Для водо-водяних енергоблоків строк подовження експлуатації понад нормативні 30 років становить 10 – 20 років;

2) *державна стратегія розвитку енергетики*. Для України можливі два її варіанти:

- ✦ пріоритетний розвиток традиційної енергетики, що означатиме зростання обсягів встановленої потужності АЕС і коефіцієнта використання їхньої потужності;
- ✦ пріоритетний розвиток відновлюваної енергетики, що може привести до зменшення коефіцієнта використання потужності АЕС і більш ранніх термінів початку виведення їх з експлуатації;

3) *ефективність використання тандема споживачів – регуляторів*. Найімовірніше, до 2020 р. буде введено в експлуатацію два нові блоки на Хмельницькій АЕС (ХАЕС), після чого встановлена потужність АЕС становитиме 15,8 ГВт.

При оптимістичному для атомної енергетики сценарії термін роботи для всіх енергоблоків буде подовжено на 20 років. При цьому, крім нових блоків ХАЕС, до 2030 р. будуть побудовані кілька енергоблоків на двох трьох АЕС, і сумарна потужність атомної генерації становитиме 25,8 ГВт.

Базовий сценарій передбачає, що терміни експлуатації енергоблоків з реакторами ВВЕР-440 і першого побудованого енергоблоку з реактором ВВЕР-1000 будуть подовжені на 10 років, а для решти блоків – на 20 років. Також до 2030 р. буде побудовано нові енергоблоки сумарною потужністю 8 ГВт.

Згідно з песимістичним сценарієм, до 2030 р. загальна встановлена потужність енергоблоків АЕС із подовженим строком експлуатації становитиме 9 ГВт, при цьому нові блоки побудовані не будуть.

Передбачається, що після 2030 р. виведені з експлуатації енергоблоки АЕС компенсуватимуться новими. Їхня потужність становитиме: для оптимістичного сценарію – 3-4 ГВт; для базового – 5-6 ГВт; для песимістичного – 6-7 ГВт [3].

При добудовуванні енергоблоків потрібно врахувати необхідність диверсифікації ядерних технологій. Так, після 2030 р. на стадію комерційної реалізації можуть вийти реактори четвертого покоління, які базуватимуться на еволюційних проектах або будуть побудовані на принципово нових технологіях – швидких нейтронах, інших видах палива (U-Th, U-Pu).

Прикладом можливої співпраці України з європейськими партнерами в галузі виробництва і постачання обладнання для ядерної енергетики є перспективні спільні проекти з будови двох нових блоків на Хмельницькій АЕС. У провідних країнах світу є й інші технології – це реактори PWR, BWR, EPR, CANDU та інші. Але добудовування ХАЕС найбільш реальне тільки з використанням дизайну радянських реакторів ВВЕР, оскільки великогабаритне обладнання для реакторів цього типу може бути доставлене залізничним транспортом (інші варіанти доставки на ХАЕС надзвичайно важкі). Слід також урахувати, що будівельна готовність третього та четвертого енергоблоків ХАЕС оцінюється відповідно в 75% (28% від повної кошторисної вартості) і 28% (10% від повної кошторисної вартості). Існуючі будівельні конструкції та споруди недобудованих енергоблоків було ретельно обстежено. Після оцінки їхнього технічного стану було зроблено висновки про можливість забезпечення їхньої надійної експлуатації з урахуванням проведення комплексу ремонтно-відновлювальних робіт. Відповідно до Закону України «Про розміщення, проектування та будівництво енергоблоків № 3 і № 4 Хмельницької АЕС» від 6 вересня 2012 р. на кожному з енергоблоків передбачене розміщення реакторної установки типу ВВЕР-1000/В-392 [1].

Беручи до уваги неможливість подальшого співробітництва із РФ за даним проектом, єдиним альтернативним виробником відповідного обладнання залишається компанія ŠKODAJSa.s. Слід уточнити, що від чеської компанії передбачається поставка лише окремого обладнання реакторної установки, що, у свою чергу, становить близько 10% від загальної вартості добудовування двох енергоблоків ХАЕС. Інша річ – майданчики Південноукраїнської та Запорізької АЕС, куди можна доставити будь-який реактор будь-якого дизайну водним шляхом – Дніпром і Південним Бугом.

Компанія ŠKODA JS a.s. є як юридично, так і фактично чеською компанією, яка працює відповідно до норм і вимог Євросоюзу. Таким чином, співробітництво між українським «Енергоатомом» і ŠKODA JS a.s. регламентовано європейським законодавством і захищено від прямого впливу російського власника – ВАТ «Об'єднані машинобудівні заводи» (ОМЗ). ОМЗ – це приватна, а не державна компанія, яка конкурує на зовнішніх, а іноді й на внутрішньому ринку з російською державною корпорацією «Росатом» (який, у свою чергу, упродовж кількох років шукає варіанти одержання контролю над ОМЗ,

але холдинг залишається незалежним гравцем на ринку ядерних технологій) [1].

У свою чергу, ŠKODA JS a.s. поставляє обладнання для європейських реакторів EPR (European Pressurized Water Reactor), які будуються у Фінляндії та Китаї. ŠKODA JS a.s. – багаторічний партнер французької AREVA, прямого конкурента «Росатома» на світовому ринку послуг зі спорудження нових енергоблоків АЕС. У 2009 р. зі ŠKODA JS a.s. було укладено контракт на добудовування третього та четвертого енергоблоків словацької АЕС «Моховець». Цей контракт на сьогодні є найбільшим інвестиційним проектом компанії. Вочевидь, якби обладнання чеської компанії не відповідало європейським вимогам до безпеки АЕС, то воно б ніколи не було допущено до будівництва реакторів на території ЄС.

Майже 40 років тому ŠKODA JS a.s. одержала ще в колишньому СРСР первинну ліцензію на інжиніринг, виготовлення та поставку основного обладнання для атомної енергетики Союзу. Відтоді чеська компанія виготовила 21 комплектний реактор типу ВВЕР-440 і три реактори типу ВВЕР-1000. Лише завдяки постійному вдосконаленню базових технологій, переданих Радянським Союзом, компанія змогла успішно розвивати свою діяльність у Східній Європі, поставляючи обладнання до Словаччини, Угорщини та України. За минулі роки чеські фахівці внесли величезну кількість поліпшень і доповнень в обладнання для реакторів типу ВВЕР. Крім того, 20 років тому ŠKODA вийшла на новий для себе ринок обладнання для реакторів типу PWR і BWR. Для двох блоків шведської АЕС «Форсмарк» (реактори BWR) було поставлено два комплекти модернізованих внутрішніх частин киплячого реактора. Обладнання містило в собі решітку та вигородку активної зони реактора для кожного блоку. Для двох аналогічних блоків з киплячими реакторами фінської АЕС «Олкіуото» у період 2004 – 2005 рр. було виготовлено два комплекти внутрішньокорпусних пристроїв реактора – сушителі пари. На фінську АЕС «Олкіуото» ŠKODA поставила опорне кільце для реактора типу EPR. Позитивні відгуки за цим проектом сприяли укладанню контракту на виробництво внутрішніх частин реактора типу EPR для першого блоку споруджуваної АЕС «Тайшань» (Китай). Усі ці контракти дають вичерпну оцінку надійності та безпеці чеського обладнання для АЕС із реакторами як радянського (російського), так і західного дизайну [1].

Добудова в першу чергу саме Хмельницької, а не Південноукраїнської або Запорізької АЕС, є для України стратегічним напрямом, якщо існує перспектива експортувати електроенергію до Європи, а не РФ. Один із ключових для українського «Енергоатома» інвестпроектів – це приєднання одного з енергоблоків ХАЕС до європейської енергосистеми та початок експорту електроенергії в рамках проекту «Енергетичний міст Україна – Європейський Союз» по лінії ХАЕС – Жешув (Польща). Якщо ж Україна зволікатиме з добудовуванням Хмельницької станції, на європейському ринку електроенергії її може випередити Білоруська АЕС, будівництво якої зараз веде державний «Росатом» (аналог російського «Газпрому»).

Крім того, слід врахувати, що в рамках усіх сценаріїв для атомної енергетики Україні необхідно реалізувати ефективні рішення для розвитку ядерно-паливного циклу та поводження з радіоактивними відходами й відпрацьованим ядерним паливом.

При цьому пріоритетними питаннями *поводження з радіоактивними відходами* будуть:

- ✦ модернізація існуючих і створення нових технологічних ліній попередньої та глибокої переробки твердих і рідких радіоактивних відходів на АЕС;
- ✦ дістання зі сховищ і переробка раніше накопичених радіоактивних відходів;
- ✦ удосконалення контейнерного парку для збирання, транспортування і зберігання радіоактивних відходів.

Також необхідно розробити основні технічні рішення *системи поводження і тривалого зберігання високоактивних відходів* і реалізувати першочергові заходи, пов'язані з прийманням і поводженням з радіоактивними відходами від переробки відпрацьованого ядерного палива.

Для відпрацьованого ядерного палива нині реалізується так зване *відкладене рішення* – тривале (до 50 років) зберігання з подальшим прийняттям рішення про його переробку або поховання.

У перспективі Україні слід забезпечити:

- ✦ безпечну експлуатацію пристанційного сховища відпрацьованого ядерного палива сухого типу на Запорізькій АЕС;
- ✦ створення централізованого сховища сухого типу для відпрацьованого ядерного палива для діючих реакторів і перспективних енергоблоків;
- ✦ розробку стратегії та технології безпечного поводження з відпрацьованим ядерним паливом після закінчення терміну його тривалого зберігання.

Необхідно буде також фінансувати роботи з *підвищення ефективності та безпеки* енергоблоків.

Таким чином, сумарна вартість заходів, пов'язаних з розвитком атомної енергетики до 2030 р., за оптимістичним сценарієм становитиме 255 млрд дол., за базовим – 282 млрд, за песимістичним – 227 млрд дол. Зрозуміло, що для України в її сьогоденньому становищі вказані суми є майже недосяжними. Як наслідок, триває пошук інших шляхів розвитку української енергетики.

Внесок досліджень з *фізики плазми* в розвиток сучасних і майбутніх технологій, перш за все, визначається в таких напрямках [5; 6]:

1) в *енергетичній безпеці*. Уже сьогодні завдяки розвитку плазмових технологій досягнуто:

- ✦ підвищення ефективності горіння традиційних палив, а також виробництва нових видів палив (синтез-газ, водень, біопаливо);
- ✦ виготовлення сонячних елементів та енерго-ефективних освітлювальних приладів;
- ✦ зміцнення поверхонь турбін та іншого енерго-обладнання тощо;

2) в *економічному розвитку*. Плазмові технології стали потужним, а часто й безальтернативним інструментом для виготовлення величезної кількості промислових виробів, у тому числі для повсякденного користування. Найпоширенішими з них є плазмові освітлювальні лампи, плоскі дисплеї, функціональні покриття, мікросхеми для комп'ютерів, сотових телефонів та інших електронних приладів;

3) у *підвищенні екологічної безпеки*. Цьому сприяє перехід від хімічних до значно чистіших плазмових технологій обробки поверхонь матеріалів і переробки відходів, у тому числі хімічно небезпечних і радіоактивних;

4) в *охороні здоров'я*. Широке використання плазмових технологій для стерилізації інструментів та обробки живих тканин у хірургії, виготовлення високоякісних імплантатів тощо;

5) для *розвитку космічної техніки*. Плазма стала важливою складовою у плазмових двигунах для корекції орбіт космічних апаратів і просування далеких космічних місій;

6) у *створенні принципово нових прискорювачів часток* і багатьох інших галузей науки і техніки.

Нинішній стан світової енергетики, що ґрунтується переважно на використанні органічного палива, стимулює пошук нових енергоджерел, зокрема нетрадиційних або відновлюваних. Беззаперечним пріоритетом у сфері розвитку перспективної енергетики є керований термоядерний синтез (КТС), який уже в цьому столітті має забезпечити людство екологічно чистим, практично безпечним і невичерпним джерелом енергії. Крім того, на основі гібридної схеми «синтез-ділення» можна запропонувати новий підхід до забезпечення паливного балансу масштабної ядерної енергетики й утилізації відпрацьованого ядерного палива.

Вирішальний прогрес у проблемі КТС з магнітним утриманням плазми буде досягнуто на основі міжнародного дослідницького реактора-токамака *ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)*, який споруджується у французькому містечку Кадараш поблизу Марселя в рамках одного з найграндіозніших міжнародних проектів, у реалізації якого беруть участь США, Росія, Євросоюз, Японія, Китай, Південна Корея та Індія. Основним завданням цього проекту є досягнення стаціонарної термоядерної реакції з виділенням дейтерію і тритію з виділенням енергії на рівні 500 МВт, що заплановано здійснити у 2018 р. після введення реактора в експлуатацію. Початок використання керованої термоядерної енергії в промислових масштабах прогнозується вже через два десятиліття. У ЄС дослідження високотемпературної плазми проводять у межах єдиної програми, фінансування якої становить понад 90% видатків на дослідження Євроатому, причому лише на 2012 – 2014 рр. було виділено більш як 2,2 млрд євро. Аналогічні скоординовані програми є в США, Японії, Росії, Китаї, Індії, Бразилії та інших країнах.

Дієвим інструментом приєднання України до міжнародних термоядерних програм є Угода про співробітництво між Кабінетом Міністрів України та Європейським співтовариством з атомної енергії в галузі керованого

термоядерного синтезу, ратифікована Законом України від 07.03.2002 р. № 3104-III (3104-14), згідно з якою до основних галузей співробітництва належать [7]:

- ✦ експериментальні та теоретичні дослідження утримання плазми, процесів переносу, розігріву та керування плазмою, (включаючи розвиток відповідних височастотних систем) і діагностики в тороїдальних магнітних пристроях;
- ✦ дослідження з теорії плазми, зокрема, фізики швидких іонів та альфа-частинок у тороїдальних магнітних пристроях, і вивчення турбулентної плазми та нелінійних хвильових взаємодій у плазмі;
- ✦ технологія термоядерного синтезу;
- ✦ прикладна фізика плазми;
- ✦ політика щодо програм і планів.

У зв'язку з тим, що Україна офіційно не входить до об'єднання країн, задіяних у спорудженні реактора, її участь обмежується вирішенням окремих допоміжних завдань у межах співробітництва з лабораторіями Європи і Росії.

Внутрішня структура фізики плазми визначається широким колом універсальних фізичних явищ, характерних не тільки для плазмових, а й для багатьох інших об'єктів. Тому важливою складовою досліджень з фізики плазми і керованого термоядерного синтезу є їхня фундаментальна складова. Необхідність прецизійного керування складними технологічними плазмовими системами вимагає поглиблення фундаментальних досліджень притаманних їм фізичних процесів. І навпаки, фундаментальні дослідження створюють базу для розвитку нових технологічних застосувань. Важливим завданням фундаментальних досліджень є розробка надійних методів прогнозування поведінки плазмових систем. Створення таких методів прогнозування стало можливим завдяки поєднанню двох факторів: розробці надійних теоретичних моделей і відповідних складних обчислювальних кодів; розвитку прецизійних діагностичних методів з використанням сучасних високотехнологічних засобів. Застосування цих методів значно зменшує фінансові та часові затрати і при тому дає цілком вірогідні результати (наприклад, моделювання турбулентності процесів перенесення в пристроях КТС, режимів роботи технологічних плазмових джерел, тощо).

Визначальними рисами плазмової науки є:

- ✦ міждисциплінарний характер;
- ✦ динамічне розширення сфери досліджень.

Процеси взаємодії плазми з поверхнями твердих тіл, розуміння яких потребує поєднання фізики плазми з матеріалознавством, багато років були предметом низькотемпературних плазмових технологій обробки матеріалів, а останнім часом набули особливої гостроти в проблемі першої стінки пристроїв КТС. Новими об'єктами досліджень плазмової науки стали комплексні (або мультифазні) плазми, які виникають при взаємодії звичайної плазми з речовиною в неплазмовому стані (нейтральні гази, поверхні твердих чи рідких тіл, у тому числі мікрочастинок, тощо). Важливим прикладом таких об'єктів є запорошена плазма.

Роботи з теорії та чисельного моделювання процесів у термоядерних системах, діагностики плазми, вирішення проблем матеріалів і технологій термоядерного реактора активно розвиваються в таких наукових установах НАН України, як Інститут фізики плазми ННЦ ХФТІ, Інститут ядерних досліджень, Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова, Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій ННЦ ХФТІ, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона, Інститут прикладної фізики, а також у Харківському національному університеті ім. В. Н. Каразіна, НТУ «Львівська політехніка», Київському національному університеті ім. Т. Г. Шевченка.

У НАН України діє Наукова рада з фізики плазми та плазмової електроніки, у межах якої представники провідних установ НАН України й організацій МОН України здійснюють дослідження в напрямі фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та технологічних застосувань плазми. За рішенням уряду України Координаційний комітет з виконання угоди про співробітництво між Україною та ЄС у галузі керованого термоядерного синтезу сформовано з числа співробітників НАН України.

В Україні збережено низку унікальних дослідницьких установок (прискорювачі часток і реактори), споруджених за часів СРСР [8].

Так, Дослідницький реактор ВВР-М *Інституту ядерних досліджень НАНУ (ІЯД)* є одним з найперших дослідницьких реакторів, побудованих і введених в експлуатацію за часів СРСР. Він був створений за ініціативою академіка І. В. Курчатова на виконання програми забезпечення ядерних регіональних центрів дослідницькими реакторами, які стали базою для багатьох наукових, науково-технічних та освітніх закладів.

У травні 2002 р. відповідно до чинного законодавства на підставі заяви ІЯД була видана ліцензія на право провадження діяльності «експлуатація ядерної установки» у складі дослідницького реактора ВВР-М і сховища відпрацьованого ядерного палива. Згідно з ліцензією термін експлуатації дослідницького ядерного реактора ВВР-М обмежувався 31.12.2008 р.

Відповідно до Закону України «Про дозвілну діяльність у сфері використання ядерної енергії» від 31.10.2008 р. ІЯД подав до Держатомрегулювання України заяву про внесення змін до ліцензії на провадження діяльності «експлуатація ядерної установки» у складі дослідницького реактора ВВР-М і сховища відпрацьованого ядерного палива. У заяві пропонувалося продовжити термін експлуатації реактора ВВР-М до 31.12.2017 р.

Проте постановою Колегії Держатомрегулювання від 19.12.2008 р. було зупинено експлуатацію дослідницького реактора, оскільки обсяг наданої заявником інформації не дозволив зробити висновки щодо можливості продовження терміну його експлуатації.

Інститут ядерних досліджень провів певну роботу з усунення одержаних зауважень, пройшов державну експертизу ядерної та радіаційної безпеки. Для перевірки готовності ІЯД до продовження терміну експлуатації дослідницького ядерного реактора комісія Держатомрегулювання провела інспекційне обстеження. Усе це дало підстави Державному комітету ядерного регулю-

вання України прийняти рішення про можливість повернутися до розгляду питання про продовження терміну експлуатації зазначеного реактора до 31.12.2013 р. Слід зазначити, що уряд України схвалив розроблену фахівцями НАНУ концепцію створення *нового багатопільового дослідницького ядерного реактора*.

За роки незалежності створено нові ядерно-фізичні установки:

- ✦ *електростатичний перезарядний прискорювач (тандем) ЕПП-10К* Інституту ядерних досліджень НАНУ, введений в експлуатацію у 1996 році. З його допомогою можна отримувати пучки протонів і дейтронів з енергією у межах 3 – 10 МеВ та α -часток – 5 – 15 МеВ. Тандем дає можливість прискорювати важкі іони в широкому діапазоні мас. Струм пучку досягає 5 мкА, монохроматичність – 10^{-3} ;
- ✦ *прискорювачі з мікронучками* в Інституті прикладної фізики НАНУ;
- ✦ *потужні прискорювачі електронів у діапазоні енергій 10^{100} MeV* у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАНУ (ННЦ ХФТІ). Активно використовується в дослідницьких програмах України та Європи прискорювач ELIAS, який було побудовано в ННЦ ХФТІ за допомогою Центру ядерних досліджень (м. Юліх, Німеччина).

Крім того, в Інституті прикладної фізики НАНУ здійснюється монтаж прискорювачів Pelletron-b і CV-28, переданих Україні німецькими науково-дослідними установками.

На завершальній стадії знаходиться реконструкція прискорювача електронів ЛПЕ-300 ННЦ ХФТІ з установкою «НЕСТОР», введено в дію дільницю на 30 МеВ та інжектор на 60 МеВ для нагромаджувача Н-100М. У ННЦ ХФТІ буде запущено комплекс з виробництва медичних радіонуклідів, який включає потужний прискорювач електронів та радіохімічну лабораторію з «гарячими» камерами.

ННЦ ХФТІ разом з Аргонською національною лабораторією (США) розробили концептуальний проект дослідницької ядерної установки «Джерело нейтронів, засноване на підкритичній збірці, що керується лінійним прискорювачем електронів» (ДЯУ). Установа призначена для отримання нейтронів та використання їх у фундаментальних і прикладних дослідженнях, а також для навчання та підготовки фахівців для атомно-енергетичної промисловості України.

На ядерно-фізичних установках НАНУ виконуються фундаментальні дослідження в галузі ядерної та радіаційної фізики, реакторного матеріалознавства, фізики конденсованого стану, геології, екології, біології тощо. Вони також використовуються для виробництва радіоізотопів для медицини та промисловості, радіаційної стерилізації, обробки напівпровідникових структур, вивчення наноструктур, збереження артефактів. Важливу роль ці установи мають для розв'язання завдань сучасної ядерної енергетики

України, розробки реакторів майбутніх поколінь і термоядерних установок.

На Національну академію наук України (НАНУ) покладено обов'язок науково-технічного супроводу атомної енергетики. З метою ефективного виконання цього завдання за ініціативи Б. Є. Патона було створено Відділення ядерної фізики та енергетики НАНУ. Одним із його найважливіших завдань було активне вивчення перспективних напрямів розвитку атомної енергетики в Україні та напрацювання відповідних пропозицій для Енергетичної стратегії.

Таким чином, для розв'язання проблем досліджень в галузі ядерної та радіаційної фізики, реакторного матеріалознавства, фізики конденсованого стану, геології, екології, біології і, перш за все, керованого термоядерного синтезу установи НАН України мають відповідну матеріально технічну базу, а саме [5; 6]: найбільший у Європі *стеларатор «Ураган-2М»*, який було введено в дію 2006 р.; *торсастрон «Араган-3М»*; *електромагнітну пастку «Юнітер-2М»*; найпотужніший у світі *квазістаціонарний прискорювач плазми КСПП X-50*; інші *термоядерні установки*, зокрема нині будується *плазмовий прискорювач нового покоління* для дослідження матеріалів ядерної й термоядерної енергетики в екстремальних умовах.

Комплекс досліджень, спрямованих на вирішення цілого спектра проблем термоядерної енергетики установками НАН України і заводами МОН України, було проведено в рамках виконання двох важливих програм:

- ✦ Державної програми фундаментальних і прикладних досліджень з проблем використання ядерних матеріалів, ядерних і радіаційних технологій у сфері розвитку галузей економіки на 2004 – 2010 рр. [9];
- ✦ Цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки» на 2011 – 2012 рр. [10].

Так, у 2004 р. була прийнята *Державна програма фундаментальних і прикладних досліджень з проблем використання ядерних матеріалів та ядерних і радіаційних технологій у сфері розвитку галузей економіки на 2004 – 2010 рр.* (затверджена постановою КМУ від 8 вересня 2004 року № 1165).

Головною метою Програми було виконання фундаментальних і прикладних досліджень у галузі використання ядерних матеріалів і радіаційних технологій для потреб атомної енергетики та інших сфер економіки, їх розвитку з метою реалізації.

Над виконанням 283 проектів цієї Програми працювали понад 40 наукових установ НАНУ, вищих навчальних закладів та організацій інших міністерств. Були отримані важливі результати для *науково-технічного супроводження атомної енергетики* як ключової для економіки України галузі, а саме [11]:

- 1) з підвищення безпеки експлуатації діючих атомних електростанцій;

- ✦ виконано аналіз напружено-деформованого стану п'яти корпусів реакторів ВВЕР-1000, 24-х парогенераторів і понад 1200 зварних швів трубопроводів турбінного відділення 4-х енергоблоків Запорізької та Південноукраїнської АЕС;
 - ✦ встановлено основні причини руйнування трубопроводів обв'язки, запропоновано експресну методику їхнього контролю за допомогою магнітних методів і програми обробки результатів напружено-деформованого стану металу, яка дала можливість у кілька разів скоротити час на моніторинг властивостей трубопроводів обв'язки. На енергоблоках зазначених АЕС проведено масовий контроль стану трубопроводів, у тому числі трубок парогенераторів, надано рекомендації з подальшої експлуатації і додаткового контролю процесу функціонування трубопроводів та глушіння трубок. Це дозволило знизити кількість позапланових зупинок енергоблоків;
 - ✦ на Південноукраїнській АЕС впроваджено в робочий процес контролю стану теплообмінних труб парогенераторів «Атлас експлуатаційних дефектів» і створено на його основі «Методологічні таблиці відповідності даних»;
 - ✦ створено надчутливий квантовий магнітометр для ранньої діагностики радіаційних пошкоджень конструкційних матеріалів; інфрачервоний та мікрохвильовий радіометр для контролю стану обладнання АЕС;
- 2) з подовження ресурсу експлуатації корпусів та основного обладнання реакторів:
- ✦ розроблено нову програму контролю властивостей металу корпусу реактора енергоблоку № 1 Хмельницької АЕС за зразками-свідками, яка є достатньою для супроводу блока до кінця проектного терміну служби (40 років), а також при подовженні терміну експлуатації до 60 років і більше;
- 3) зі створення елементів ядерного паливного циклу в Україні:
- ✦ створено технології виробництва труб для тепловідільних елементів (твелів) зі сплаву Zr – 1% Nb. Прийнято рішення про застосування цієї технології для виробництва твелів. Продовжувалася розробка технології виробництва магніє-термічного цирконію, а також виготовлення перспективних поглинаючих матеріалів і елементів, які вже використовуються на Запорізькій АЕС;
 - ✦ організовано дослідно-промислова ділянку для виготовлення тепловідільних і поглинаючих елементів з підвищеною надійністю і ресурсоздатністю; експериментальні стенди на основі потужних прискорювачів заряджених частинок для радіаційного матеріалознавства;
- 4) з розробки нових конструкційних і функціональних матеріалів для ядерних установок:
- ✦ створено вуглець-вуглецеві композити з високою радіаційною та термічною стійкістю;
 - ✦ розроблено нові металогідридні матеріали на основі титану як нейтронопоглинаючі елементи в контейнерах для відпрацьованого ядерного палива;
 - ✦ одержано гафній ядерної чистоти з метою використання як поглинач нейтронів у поглинаючих елементах;
 - ✦ розроблено технологію нанесення зносостійких покриттів турбінних лопаток, що працюють у волого-паровій атмосфері під високим тиском за температурою понад 3000 °С;
 - ✦ одержано нові сплави на основі мало легovanого (40 – 60% Fe – 5% Al) хрому та дисперсно-зміцнені феритні сталі для реакторів на швидких нейтронах;
 - ✦ створено радіаційно-, хімічно- та термічностійкі сполуки для захисних оболонок радіоактивних відходів та електричних кабелів систем регулювання АЕС;
- 5) зі створення нового екологічно безпечного ядерно-фізичного устаткування та нових джерел енергії:
- ✦ створено унікальний комплекс для дослідження множинних виходів фотоядерних реакцій, що дає змогу реалізувати методику виміру перерізів фотоядерних реакцій у діапазоні енергій у-квантів 35⁻¹⁰⁰ MeV;
 - ✦ надано обґрунтування нового типу ядерної енергетичної установки – високотемпературного газоохолоджувального реактора (ВТГР), який має підвищену ефективність використання уранового палива (ККД до 50%) і може виробляти як електроенергію, так і високопотенційне тепло, а також обґрунтовано можливість створення на основі ВТГР ядерно-технологічних комплексів для виробництва синтетичного вуглець-водневого палива з вугілля та водню;
 - ✦ проведено фізичний запуск стеларатора-торсатрона «Ураган-2М» з метою отримання та вивчення плазмових джерел енергії та синтезу легких ядер.
- Крім того, у процесі виконання вказаної програми було отримано такі *результати технологічного спрямування*:
- ✦ експресні методи за допомогою прискорювачів заряджених часток, які дозволяють прогнозувати деградації фізико-механічних властивостей матеріалів реакторобудування при опроміненні;
 - ✦ технології одержання металів: Zr (чистотою 99,95%), Hf (чистотою 99,95%), Nb, Ta; на їх основі створено нові конструкційні матеріали, у т. ч. із субмікроструктурною та нанокристалічною структурою, для діючих і майбутніх ядерно-енергетичних установок, що дасть можливість виготовляти вироби різної форми з однорідною структурою та високими механічними властивостями. Ці технології впроваджені в Науково-дослідному інституті атомних реакторів (м. Дімітровград, Росія);
 - ✦ процеси газофторидної переробки та дезактивації паливовміщуючих мас об'єкта «Укриття» Чорнобильської АЕС;

- ✦ методику визначення напружено-деформованого стану корпусів та обладнання реакторів ВВЕР-1000 АЕС України після тривалої експлуатації, які впроваджені на 5-ти блоках Запорізької та Південноукраїнської АЕС;
- ✦ технологію отримання різної дисперсності порошків з титано-цирконієвої сировини після очищення їх від мікродомішок;
- ✦ обладнання для електрохімічних досліджень конструкційних матеріалів ядерної енергетики та прогнозування їх руйнування при підвищених температурах і тисках теплоносія;
- ✦ лазерну тераваттну установку для отримання нейтронних, рентгенівських та γ -імпульсів фемтосекундної тривалості (30 – 50 фс);
- ✦ ділянку для обробки мішеней, опромінених на прискорювачах електронів, і проведення досліджень, спрямованих на розробку технологій одержання радіоізотопів;
- ✦ базовий апарат для орбітального зварювання трубопроводів діаметром 57 – 76 мм; багатомоторний апарат для орбітального зварювання неповоротних стиків труб діаметром до 426 мм, які дозволяють суттєво підвищити якість зварних швів;
- ✦ радіаційно- і пожежостійке устаткування для діагностики та оцінки технічного стану основного обладнання на АЕС;
- ✦ поглинаючі елементи, які забезпечують використання поглиначів, виготовлених як у вигляді таблеток, так і стрижнів, що мають підвищений рівень вигорання.

Тобто були одержані цікаві перспективні результати досліджень, готові для подальшого впровадження. Це стосується, у тому числі, технологій одержання нових металогідридних матеріалів на основі титану для контейнерів відпрацьованого ядерного палива, а також виробництва гафнію ядерної чистоти для нейтронопоглинаючих елементів.

Разом з тим фактичний рівень фінансування вказаної Державної програми склав близько 52% від передбаченого обсягу, тому не вдалося завершити низку найважливіших робіт. Хід виконання програми розглядався також на засіданні Міжвідомчої комісії з питань науково-технологічної безпеки при Раді національної безпеки і оборони 16.02.2010 р. У рішенні цієї комісії відзначалися наростання науково-технічного відставання України від розвинених країн і наявність проблеми підтримання в належному стані ядерних об'єктів на території України. Було зазначено, що недофінансування програми не дозволило виконати низку запланованих заходів у встановлені терміни, а очікувані результати у повному обсязі не були досягнуті.

Зважаючи на успішність в цілому робіт за Програмою, у НАН України виникла підтримана Радою національної безпеки і оборони України ініціатива щодо її подовження.

У 2011 р. Президія НАН України започаткувала Цільову комплексну програму наукових досліджень НАН

України «Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки» на 2011 – 2012 рр. [10].

Найважливішими науково-технічними проблемами, на розв'язання яких була спрямована програма, стали такі:

- ✦ обґрунтування подовження ресурсу і безпеки роботи основного обладнання АЕС, його модернізація та розробка методологічних основ виведення енергоблоків з експлуатації;
- ✦ розвиток сировинної бази ядерної енергетики;
- ✦ технологічні основи виготовлення ядерного палива з матеріалів, які видобуваються на території України; наукова підтримка будівництва та функціонування заводу з виробництва ядерного палива;
- ✦ розробка нових радіаційностійких конструкційних і функціональних матеріалів для потреб атомної галузі;
- ✦ дослідження і розробка ядерно-енергетичних установок четвертого покоління з високою ефективністю та гарантованою керованістю, а також перспективних паливних циклів;
- ✦ створення методик і технологій переробки активних відходів атомно-промислового комплексу, а також іммобілізації високоактивних відходів для довгострокового зберігання і захоронення;
- ✦ розробка науково-технологічних рішень щодо будівництва в Чорнобильській зоні сховища довгострокового зберігання відпрацьованого ядерного палива і високоактивних радіаційних відходів;
- ✦ удосконалення систем моніторингу та контролю щодо впливу підприємств ядерно-паливного циклу на довкілля;
- ✦ створення та впровадження новітніх радіаційних технологій для промисловості, охорони довкілля, матеріалознавства, сільського господарства, медицини, діагностики матеріалів та технологічних процесів;
- ✦ одержання та використання короткоіснуючих радіоактивних ізотопів для потреб медицини і сільського господарства;
- ✦ удосконалення технологій фізичного захисту ядерних матеріалів, ядерних установок, радіоактивних відходів, джерел іонізуючого випромінювання.

Метою програми є проведення прикладних досліджень для вирішення проблем науково-технічного супроводу ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у різних галузях економіки.

Основними завданнями вказаної ЦКП є:

- ✦ забезпечення науково-технічної підтримки безпечного і надійного функціонування та розвитку ядерної енергетики України, її ресурсної бази і використання радіаційних технологій;
- ✦ розробка ядерно-фізичних установок нового покоління та проведення прикладних досліджень з перспективних напрямів ядерної фізики, фізики плазми та прискорювачів, радіацій-

ного матеріалознавства та приладобудування, керованого термоядерного синтезу.

Враховуючи суттєві наукові здобутки проведеного комплексу досліджень в рамках вказаної програми Президія НАН України *подовжила термін виконання програми на 2013 – 2015 рр.* [12]. Основні результати виконання Цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Науково-технічний

супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки» на 2011 – 2013 рр. представлено в *табл. 1* [13 – 15].

Таким чином, можна зробити *висновок*, що при виконанні вказаних цільових комплексних програм установи НАН України та заклади МОН України здійснили комплекс досліджень, спрямованих на вирішення цілого спектра проблем термоядерної енергетики, зокрема [16, с. 129]:

Таблиця 1

Результати виконання Цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки» на 2011 – 2013 рр.

Рік	Напрямок програми	Найбільш значущий результат	Практична цінність	Галузь	Глобальна проблема
1	2	3	4	5	6
2011	Науково-технічна підтримка безпечного і надійного функціонування та розвитку ядерної енергетики України	Визначено основні технологічні режими процесів одержання дослідних зразків губки магнієтермічного цирконію з вітчизняної сировини із заданим вмістом домішок, зокрема магнієтермічного відновлення тетра-хлориду цирконію, вакуумної сепарації реакційної маси	Створення українського виробництва ядерного палива для АЕС	Ядерна енергетика	Нова енергетика
		Розроблено, виготовлено і випробувано перший український детектор іонізуючих випромінювань на основі полікристалічної алмазної плівки з високою радіаційною стійкістю	Застосування в радіаційних ядерних технологіях на базі прискорювачів а також для внутрішньореакторної дозиметрії та радіаційного контролю	—	—
		Уперше отримано дані про вплив водню на властивості сталей водневоохолоджуваних роторів ТВВ-1000 після тривалої експлуатації	Дозволяє визначити режими безпечної експлуатації матеріалів роторів після термообробок, подовжує термін їх роботи на АЕС	—	—
		З метою створення екстрагентів і сорбентів токсичних радіонуклідів синтезовано нові супрамолекулярні ліганди на основі каліксаренів, функціоналізованих діалкілфосфіноксидними та діетоксифосфоновими угрупованнями	Застосування при розробці нових матеріалів, що поєднують властивості сорбентів та рідких екстрагентів, для селективного вилучення високотоксичних актинічних радіонуклідів з навколишнього середовища, а також для дезактивації радіоактивних відходів у Чорнобильській зоні	—	—
Розробка ядерно-фізичних установок нового покоління та проведення прикладних досліджень з перспективних напрямів	У рамках розробленого детерміністського підходу для опису явища «повільної хвилі ядерного горіння» досліджено можливість плавного запуску перспективного реактора на швидких нейтронах. Знайдено оптимальну конфігурацію початкового розподілу концентрації компонентів палива, теплоносія та поглинача нейтронів	Дозволяє запобігати небажаного розгону реактора при запуску	Ядерна енергетика	Нова енергетика	
	Створено радіаційно-опромінювальну установку для нейтронозахватної терапії і комбінованої діагностики в ядерно-магнітній резонансній томографії	Здійснення нейтронне опромінення біологічних об'єктів при заданій температурі	Медицина	Депопуляція та старіння населення	
		Розроблено мішеневу станцію для напрацювання радіофармпрепаратів на внутрішньому пучку циклотрона У-240 Інституту ядерних досліджень НАН України. Виготовлено циклотронні джерела з підвищеною інтенсивністю пучків згенерованих протонів та установку оптимізованої центральної оптики циклотрона	Установки для напрацювання радіофармпрепаратів	—	—

ЕКОНОМІКА ПРОМИСЛОВОСТІ
ЕКОНОМІКА

1	2	3	4	5	6	
2012	Науково-технічна підтримка безпечного і надійного функціонування та розвитку ядерної енергетики України	Створено експериментальний стенд для дослідження впливу пучків заряджених частинок на механічні властивості конструкційних матеріалів АЕС	Дозволяє реєструвати температуру, струм пучка та дозу радіаційного опромінення	Ядерна енергетика	Нова енергетика	
		Розроблено і впроваджено методику проведення експресних імітаційних радіаційних випробувань з використанням прискорювачів заряджених частинок у кисневому середовищі при температурі 400 – 10000 °С для вуглецевих матеріалів	Проведення експресних імітаційних радіаційних випробувань	--	--	
		Розроблено технологічне оснащення для високочастотного нагріву довгих (1030 мм) робочих лопаток останніх ступенів енергетичних турбін АЕС в установках атомно-іонного розпилення матеріалів	Для потреб турбобудівних і турборемонтних підприємств	--	--	
		Досліджено особливості поведінки матеріалу при складному термосиловому навантаженні, розроблені вимоги до бази даних металу корпусу реактора	Виконання договору з НТЦ НАЕК «Енергоатом», проведення державної експертизи оцінки технічного стану корпусу реактора енергоблоку № 1 Південноукраїнської АЕС	--	--	
	Розробка ядерно-фізичних установок нового покоління та проведення прикладних досліджень з перспективних напрямів	Розроблено технології одержання нових високотемпературних керамічних конструкційних і ударостійких матеріалів з високими характеристиками поглинання іонізуючих випромінювань	Перспективні для використання в ядерній енергетиці	--	--	
		Розроблено екологічну та економічно доцільну технологічну схему низькотемпературної переробки радіоактивних відходів АЕС, що полягає у використанні склокерамічних і керамічних матриць, в яких практично відсутня дифузія як радіонуклідів, так і хімічних сполук	Екологічно та економічно доцільна технологічна схема низькотемпературної переробки радіоактивних відходів АЕС	--	--	
		Створено серію експрес-методів для визначення концентрації техногенних радіонуклідів у зразках із навколишнього середовища	Дозволяють швидко, надійно і з достатньо високою точністю проводити радіоекологічні дослідження без застосування радіохімії	Охорона навколишнього середовища	Забруднення навколишнього середовища	
		Розроблено технології напрацювання короткоіснуючих ізотопів	Для медичної практики і радіотерапії захворювань людини	Медицина	Депопуляція та старіння населення	
	2013	Науково-технічна підтримка безпечного і надійного функціонування та розвитку ядерної енергетики України	За допомогою сучасних методик оцінки радіаційного окрихчення металу корпусів реакторів АЕС проведено державну експертизу оцінки технічного стану корпусів реакторів № 1 і № 2 Запорізької АЕС	Оцінка технічного стану корпусів реакторів Запорізької АЕС	Ядерна енергетика	Нова енергетика
			За допомогою методів коерцитиметрії та магнітної пам'яті металу проведено моніторинг напружено-деформованого стану металу зварних з'єднань парогенератора ПГВ-1000 енергоблоку Південноукраїнської АЕС	Моніторинг зварних з'єднань парогенератора ПГВ-1000 енергоблоку Південноукраїнської АЕС	--	--
Виконано цикл досліджень з оцінки експлуатаційної довговічності воднево-охолоджувальних швидкохідних та тихохідних турбоагрегатів для Хмельницької АЕС			Оцінка експлуатаційної довговічності турбоагрегатів для Хмельницької АЕС	--	--	

1	2	3	4	5	6
	Розробка ядерно-фізичних установок нового покоління та проведення прикладних досліджень з перспективних напрямів	Розроблено процес отримання захисних покриттів товщиною до 7 мкм на цирконієвих сплавах, які мають високі механічні властивості та термостабільність при атмосферному відпалі	Захисні покриття на цирконієвих сплавах з високими механічними властивостями	Ядерна енергетика	Нова енергетика
		Здійснено запуск джерела плазми – однієї з основних складових частин експериментального стенда для вивчення радіаційно-пучкового впливу на матеріали ядерної та термо-ядерної енергетики	Устаткування для вивчення радіаційно-пучкового впливу на матеріали ядерної та термо-ядерної енергетики	--	--
		Створено та виготовлено малогабаритні гамма-нейтронні детектори, які використовують новий спосіб реєстрації швидких нейтронів, заснований на незастосуванні механізму непружного розсіяння на ядрах атомів неорганічних сцинтиляторів	Малогабаритні гамма-нейтронні детектори швидких нейтронів	--	--
		З метою визначення герметичності тепловидільних елементів дослідницького реактора ВВР-М Інституту ядерних досліджень НАН України введено в експлуатацію стаціонарну установку для вимірювання і обробки гамма-спектрів теплоносія першого контуру	Стаціонарна установка для вимірювання і обробки гамма-спектрів теплоносія першого контуру реактора ВВР-М	--	--
		На основі дослідження торієносності головних породних комплексів Українського щита зроблено висновок, що Україна має поклади торію, достатні для повного задоволення її внутрішніх потреб	Дослідження покладів торію в Україні	--	--
		Запатентовано фотоядерний спосіб одержання ізотопу ^{67}Cu для лікування раку	Спосіб одержання ізотопу для лікування раку	Медицина	Депопуляція та старіння населення
		Визначено параметри напрацювання на циклотроні CV-28 ННЦХФТІ НАН України ізотопів $^{66}\text{Ga}/^{67}\text{Ga}$ і ^{64}Cu , які задовольняють вимогу радіохімічної чистоти радіофармпрепаратів для радіонуклідної терапії та діагностики	Ізотопи для радіонуклідної терапії та діагностики	--	--
		Запропоновано нерадіохімічну методику одночасного вимірювання активності ^{90}Sr та ^{137}Cs у зразках доквілля, яка дозволяє проводити масові вимірювання та суттєво здешевлює проведення таких робіт, що є особливо важливим для цілей радіоекологічного моніторингу забруднених об'єктів і територій	Методика масового і дешевого вимірювання вмісту шкідливих ізотопів у зразках доквілля	Охорона навколишнього середовища	Забруднення навколишнього середовища
	Обґрунтовано сценарні умови довгострокового розвитку електро-енергетичного сектора України та ядерної енергетики під впливом соціально-економічних, технічних, політичних та екологічних факторів	Сценарні умови довгострокового розвитку електроенергетичного сектора України та ядерної енергетики	Ядерна енергетика	Нова енергетика	

Джерело: складено за [13–15].

- ✦ розвинуто методи високочастотного створення і нагрівання плазми;
- ✦ досліджено поведінку енергійних частинок у магнітних пастках;
- ✦ розроблено нові методи діагностики високо-температурної плазми;
- ✦ проведено експериментальні дослідження поведінки конструкційних матеріалів першої стін-

ки і дивертора в умовах екстремальних корпускулярних і енергетичних навантажень, що властиві термо-ядерному реактору.

Як видно з табл. 1, на основі результатів фундаментальних досліджень з фізики плазми за 2011 – 2013 рр. одержано низку важливих прикладних розробок для енергетики України [16]: нові методи нанесення функціональних покриттів; модифікація матеріалів потуж-

ними потоками плазми; плазмові джерела інтенсивного екстремального ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання; плазмові озонатори; низькотемпературні плазмові озонно-ультразвукові стерилізатори; геліконні технологічні джерела; плазмохімічні реактори; пароплазмова технологія переробки відходів; створення нових перспективних екологічно чистих плазмових технологій для промисловості, медицини, сільського господарства та охорони довкілля. ■

ЛІТЕРАТУРА

1. Маскалевич І. Гибридні «атомні» війни / І. Маскалевич // Дзеркало тижня, 29.11.2014. – № 45. – С. 8.
2. Гусак С. Стратегія енергетичного виживання / С. Гусак // Дзеркало тижня, 18.10.2014. – № 38. – С. 9.
3. Дяченко С. Атом у законі / С. Дяченко // Дзеркало тижня, 2014. – № 24. – С. 9.
4. Висоцький В. «Бридке каченя» ядерної фізики та можливий прогрес світової енергетики / В. Висоцький // Дзеркало тижня, 2014. – № 24. – С. 12.
5. Сучасні досягнення в галузі керованого термоядерного синтезу і фізики плазми та пріоритетні напрями міжнародного співробітництва / Постанова Президії НАН України від 18.03.2013 р. № 115 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/Legaltexts/nas/2013/regulations/OpenDocs/130918_115.pdf
6. Концепція цільової комплексної програми НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій» на 2014 – 2016 роки / Додаток 1 до Постанови Президії НАН України від 18.03.2013 р. № 115 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/Legaltexts/nas/2013/regulations/OpenDocs/130918_115_1.pdf
7. Угода про співробітництво між Кабінетом Міністрів України та Європейським співтовариством з атомної енергії в галузі керованого термоядерного синтезу / Закон України від 07.03.2002 р. № 3104-III (3104-14) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/994_152
8. Наукові дослідження у сфері використання ядерної енергії / Сайт з питань ядерної безпеки, радіаційного захисту та нерозповсюдження ядерної зброї [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://uatom.org/pages/53>
9. Державна програма фундаментальних і прикладних досліджень з проблем використання ядерних матеріалів та ядерних і радіаційних технологій у сфері розвитку галузей економіки на 2004 – 2010 рр. / Постанова Кабінету Міністрів України від 08.09.2004 р. №1165 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1165-2004-p>
10. Цільова комплексна програма наукових досліджень НАН України «Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки» на 2011 – 2012 рр. / Постанова Президії НАН України від 17.11.2010 р. №319 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/Legaltexts/nas/2010/regulations/OpenDocs/101117_319_concept.pdf
11. Неклюдов І. М. Про основні результати виконання Державної програми фундаментальних і прикладних досліджень з проблем використання ядерних матеріалів та ядерних і радіаційних технологій у сфері розвитку галузей економіки / І. М. Неклюдов // Наука та інновації. – 2012. – Т. 8. – № 3. – С. 84 – 87.
12. Про оголошення конкурсу за цільовою комплексною програмою наукових досліджень НАН України «Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки» на 2013 – 2015 рр. / Розпорядження Президії НАН України від 08.02.2013 р.

№ 319 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/Legaltexts/nas/2013/directions/OpenDocs/130208_76.pdf

13. Звіт про діяльність Національної Академії наук України у 2011 р. – К. : Видавничий дім «Академперіодика» НАН України, 2012. – Ч. 2. – 198 с.

14. Звіт про діяльність Національної Академії наук України у 2012 р. – К. : Видавничий дім «Академперіодика» НАН України, 2013. – 564 с.

15. Звіт про діяльність Національної Академії наук України у 2013 р. – К. : Видавничий дім «Академперіодика» НАН України, 2014. – 560 с.

16. Із зали засідань Президії НАН України (18 вересня 2013 року) // Вісник Національної академії наук України. – 2013. – № 11. – С. 127 – 133 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vnanu_2013_11_18.pdf

REFERENCES

- Diachenko, S. "Atom u zakoni" [Atoms in the law]. *Dzerkalo tyzhnia*, no. 24 (2014): 9.
- Husak, S. "Stratehiia enerhetychnoho vyzyhivannia – 2014" [Energy Strategy Survival – 2014]. *Dzerkalo tyzhnia*, no. 38 (2014): 9.
- "Iz zaly zasidan Prezydii NAN Ukrainy (18 veresnia 2013 roku)" [From the boardroom of Presidium of NAS of Ukraine (18 September 2013)]. http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vnanu_2013_11_18.pdf [Legal Act of Ukraine] (2013). http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/Legaltexts/nas/2013/regulations/OpenDocs/130918_115.pdf [Legal Act of Ukraine] (2013). http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/Legaltexts/nas/2013/regulations/OpenDocs/130918_115_1.pdf [Legal Act of Ukraine] (2002). http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/994_152 [Legal Act of Ukraine] (2004). <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1165-2004-p> [Legal Act of Ukraine] (2010). http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/Legaltexts/nas/2010/regulations/OpenDocs/101117_319_concept.pdf [Legal Act of Ukraine] (2013). http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/Legaltexts/nas/2013/directions/OpenDocs/130208_76.pdf
- Maskalevych, I. "Hybrydni «atomni» viiny" [Hybrid "nuclear" war]. *Dzerkalo tyzhnia*, no. 45 (2014): 8.
- Nekliudov, I. M. "Pro osnovni rezultaty vykonannia Derzhavnoi prohramy fundamentalnykh i prykladnykh doslidzhen z problem vykorystannia iadernykh materialiv ta iadernykh i radiatsiinykh tekhnolohii u sferi rozvytku haluzei ekonomiky" [On the main results of state program of basic and applied research on the use of nuclear materials and nuclear and radiation technologies in the development of industries]. *Nauka ta innovatsii*, vol. 8, no. 3 (2012): 84-87.
- "Naukovi doslidzhennia u sferi vykorystannia iadernoi enerhii" [Research in the field of nuclear energy]. *Sait z pytan iadernoi bezpeky, radiatsiinoho zakhystu ta nerozpovsiudzhennia iadernoi zbroi*. <http://uatom.org/pages/53>
- Vysotskyi, V. "«Brydke kachenia» iadernoi fizyky ta mozhlyvyi prohres svitovoi enerhetyky" ["The Ugly Duckling" Nuclear Physics and possible progress of world energy]. *Dzerkalo tyzhnia*, no. 24 (2014): 12.
- Zvit pro diialnist Natsionalnoi Akademii nauk Ukrainy u 2011 r.* [Annual Report of the National Academy of Sciences of Ukraine in 2011]. Kyiv: Akadempriodyka, 2012.
- Zvit pro diialnist Natsionalnoi Akademii nauk Ukrainy u 2012 r.* [Annual Report of the National Academy of Sciences of Ukraine in 2012]. Kyiv: Akadempriodyka, 2013.
- Zvit pro diialnist Natsionalnoi Akademii nauk Ukrainy u 2013 r.* [Annual Report of the National Academy of Sciences of Ukraine in 2013]. Kyiv: Akadempriodyka, 2014.