

ПЕРСПЕКТИВИ МОДУЛЬНИХ МАЛИХ АЕС

Ключовими моментами у парадигмі розвитку енергетики України є диверсифікація джерел енергопостачання і децентралізація систем енергозабезпечення. Стосовно ядерної енергетики, то другу вимогу в цій парадигмі можуть задовольнити малі ядерні реактори, створені на модульній основі.

Автори акцентують на важливості розробки програми розвитку модульної ядерної енергетики, в якій Україна має всі можливості стати регіональним лідером.

Сучасна енергетична парадигма України — вкрай зношена теплова енергетика, яка невпинно втрачає акційний баланс (із 70 до 40% упродовж останніх 14 років) у напрацюванні електроенергії, та 15 реакторних блоків радянської конструкції на чотирьох атомних станціях, що вже забезпечили собі абсолютну «перевагу» в енергетичному балансі країни. Перевага, справді, в лапках, бо з 2010 р. добігатиме кінця регламентний ресурс роботи діючих реакторів. За рішеннями уряду до 2030 р. на заміну старих в Україні треба ввести до ладу 11 нових ядерно-енергетичних блоків. Знову-таки об'єктивна, зрештою, зрозуміла, пострадянська спадщина (кадрова, ідеологічна, технологічна), залежність від російського ядерно-енергетичного комплексу провокує неприпустиму інерційність галузевих та науково-технологічних установ, владних структур, яка неминуче призведе до внутрішніх, міждержавних та геополітичних проблем у найближчому майбутньому.

Ідеться про невідворотність зміни концептуального підходу до розвитку ядерної енергетики в Україні. У світі визнана її безаль-

тернативність. Це засвідчують небачені інвестиції в ядерну енергетику в Південно-Східній Азії та на Близькому Сході. Саме тепер у розвинених країнах Заходу наголошують на потребі повернення до ядерно-енергетичних комплексів з їх напрацьованим досвідом, науково-технологічним потенціалом та інфраструктурою. На межі глобальних й історичних викликів Україна не може ані стояти осторонь, ані покірно, без визначеної незалежної політики, гойдатися на чужих хвилях*.

Філософський термін «парадигма» визначає висхідну концептуальну схему, модель проблеми та її розв'язання, методи дослідження, панівні протягом певного історичного періоду. Парадигма наукового підходу до будь-якого явища чи проблеми базується на уявленнях про реальний стан речей, які формують учені, фахівці, практики. Але й самі ці уявлення, особливо з плином часу, впливають на те, що в тій чи іншій галузі вважається реальністю. Парадигма стає не актуаль-

* У статті використано матеріали, опубліковані в ЗМІ та Інтернетвиданнях.

© ДРЯПАЧЕНКО Ігор Павлович. Кандидат фізико-математичних наук. Старший науковий співробітник відділу електростатичних прискорювачів Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ).

ТОКАРЕВСЬКИЙ Володимир Васильович. Доктор фізико-математичних наук. Директор Київської філії ДСП «Техноцентр».

ТРОФИМОВА Ніна Анатоліївна. Кандидат фізико-математичних наук. Українське ядерне товариство (Київ). 2006.

ною, коли її базові поняття втрачають адекватність або її адепти тримаються за неї усупереч здоровому глузду. Зміна парадигм неминує, є певним еволюційним переходом.

Важко знайти кращий об'єкт дослідження щодо зміни його парадигми, ніж сучасна ядерна енергетика загалом, особливо українська. Саме з України у 1986 р. пролунав застережний «дзвоник» щодо небезпеки екстенсивного зростання ядерної енергетики. У 80-х роках у світі будували в середньому 23 нових ядерних реактори щороку (максимум — 43 у 1983 р.). На той час за Україною було «закріплено» восьме місце у світі за часткою ядерної енергетики у загальному енергетичному балансі країни, яке вона зберігає й досі. Тодішня 30%-ва частка за ці роки збільшилася до 50% — «завдяки» деградації теплоенергетичної інфраструктури. Важко з цього радіти, бо така зростаюча «відповідальність» ядерно-енергетичної галузі не підкріплена адекватним технологічним супроводом. На чотирьох атомних станціях України задіяні 15 реакторів, найстаріший з яких треба зупинити у 2011 р. згідно з чинним регламентом (за його дотриманням стежить МАГАТЕ). До 2025 р. така доля очікує ще 10 реакторів. Але проблема не просто в кількісних показниках — ті самі тенденції, «вузькі місця» та вимоги характеризують і світову ядерно-енергетичну галузь, яка тільки тепер почала виходити з чорнобильської коми.

У непростий час соціально-політичних змін у самій Україні та геополітичних трансформацій ми змушені змінити парадигму ядерно-енергетичної стратегії країни. За необхідності оновлення протягом 20–30 років усього ядерно-енергетичного комплексу ми не зможемо зберегти свою державну та національну ідентичність за умов науково-ідеологічної і технологічної монополії пострадянської Росії в українській ядерній галузі. Події грудня 2005 р. змушують замислитися над можливістю холодної енергетичної війни між двома державами. Це завдання диверсифі-

кації та гармонізації науково-технологічних й економічних вимог та умов подальшого існування і розвитку ядерно-енергетичного комплексу України. Наголошуємо саме на існуванні, бо навіть за гіпотетичної відмови від розбудови АЕС Україна повинна супроводжувати впродовж сотень років усю інфраструктуру (чи її залишки) ядерної енергетики, що ми й моделюємо, вдало чи ні, вже 20 років у Чорнобилі. До речі, пролунала думка, що саме газовий конфлікт Росії з Україною змусив світову спільноту подивитися на ядерну енергетику як на високотехнологічне чисте джерело задоволення енергетичних потреб людства, яке зможе диверсифікувати чийсь об'єктивний чи суб'єктивний монополізм.

НАРОЩЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ АЕС: «ЗА» І «ПРОТИ»

Пошук нових джерел енергії і дедалі зростаюче її виробництво — майже безальтернативний шлях розвитку цивілізації. У 1986 р. Україна «пригальмувала» процес розвитку атомної енергетики, отримавши можливість наздогнати (хоча більше у проблемах) інші країни ядерно-енергетичного пулу для спільного руху далі.

Протягом ХХ ст. світовий валовий продукт і населення планети зростали набагато швидше, ніж до того, так само, як й енергетичні витрати, насамперед нафти і газу, а також гідрота ядерної енергетики. Найвищим цей показник був в індустріальних державах, де витрати комерційного палива на душу населення вдсятеро більші, ніж у країнах, що розвиваються.

Наукова думка напружено працює у напрямі генерації, використання та збереження енергії. Йдеться, наприклад, про застосування паливних елементів для транспорту, які можуть удвічі збільшити ефективність пального порівняно з двигунами внутрішнього згоряння, а також розподілені джерела тепла та електроенергії за місцем їхнього використання. Інша ситуація у країнах, що розвиваються, де мільярди людей ледь животи-

ють, не кажучи вже про підвищення їхніх життєвих стандартів. Для досягнення рівня розвинених країн повинні задовольнятися їхні потреби в енергії, які подвоюються кожних 15 років. Якщо припустити, що за умов підвищення енергетичної ефективності там використовуватимуть тільки половину енергії на душу населення порівняно з розвиненими країнами, тоді світові енергетичні витрати зростуть більш як утричі. Країни, що розвиваються, потребуватимуть у найближчі десятиліття близько $5 \cdot 10^6$ МВт нових електрогенеруючих потужностей (сьогодні вони мають $1 \cdot 10^6$ МВт). (Електрогенеруючі потужності працюють тільки на одну п'яту кінцевих енергетичних витрат, решта в основному використовується для транспорту й обігрівання приміщень.)

Пошук шляхів задоволення зростаючих енергетичних потреб людства є такою нагальною проблемою, що треба розглядати всі можливі джерела та оцінювати їх з максимальною об'єктивністю. Для цього має сенс застосовувати критерії обсягів, ціни, безпечності, реалізації, екологічності.

Найуживанішим енергоносієм поки що є нафта. Але у процесі спалювання вона дає викиди, які значно забруднюють довкілля. Це

Таблиця 1. Глобальні витрати первинної енергії за роками, млн т*

Енергетичне джерело	1860	1900	1950	2000
Традиційні (деревина, гній тощо)	270	330	470	~1000
Вугілля	100	470	1300	2220
Нафта		20	470	3400
Природний газ			170	2020
Гідроенергія		10	120	230
Ядерна енергія				630
Відновлювані джерела				~200
Загалом	370	830	2530	~9700

* У перерахунку еквівалентної кількості нафти (toe).

стосується і природного газу. Попри істотні зусилля у розвитку відновлюваної електроенергетики, сонце та вітер додають менше 0,5% до загального видобутку енергії. Лишається вугілля як головне джерело енергії на кілька століть. Однак теплові станції, де його спалюють, викидають на рік 11 млн т двоокису вуглецю, 1 млн т — попелу, 500 тис. т — гіпсу, 29 тис. т — окису азоту, 21 тис. т — шламів, 16 тис. т — двоокису сірки, 1 тис. т — пилу та менші кількості інших хімікатів — таких, як кальцій, натрій, титан, миш'як. Для виробництва 1 ГВт електроенергії потрібно спалити 3,5 млн т вугілля, що еквівалентно 5 т урану. Більшість із цих побічних продуктів відфільтровується, але тисячі тонн попелу з відповідною часткою урану викидаються. Ця радіоактивність безпосередньо пов'язана з тепловою енергетикою. Всі газові відходи потрапляють у повітря, яким ми дихаємо, і руйнують наше здоров'я. Крім того, спалювання вугілля є одним із факторів, що спричиняють непередбачувані кліматичні зміни. За прогнозами фахівців, упродовж наступних 100 років середня глобальна температура підвищиться на кілька градусів, а рівень моря — на 50–100 см. Більшість з цих потенційно спустошливих ефектів безпосередньо пов'язана з двоокисом вуглецю, який виділяється під час спалювання викопного палива. Його домішки зумовлюють і кислотні дощі, що негативно впливають на річки, озера та ліси.

Недарма на початку 2006 р. патріарх руху «зелених» 85-річний англійський учений Джеймс Лавлок виступив із заявою про те, що людству найближчими десятиліттями загрожує екологічна катастрофа планетарних масштабів. Земля має «контрольний механізм», який підтримує сталість біосфери, але щодо змін клімату людство перейшло «межу неповернення» і цивілізація навряд чи вціліє. Ще 2 роки тому Д. Лавлок закликав екологів відмовитися від протидії використанню атомної енергії.

Чи зможе ядерна енергетика забезпечити зростаючі потреби людства? Вона вже нині генерує близько 20% світової електроенергії; в Західній Європі це 50, у Франції — 80%. Довготермінові витрати на ядерну енергетику такі самі, як і на теплову, але вона спричинює незначний парниковий ефект і безпечніша за всі інші джерела, крім, можливо, природного газу.

Західний світ свідомо висуває на порядок денний розвиток ядерної енергетики. До цього спонукали кліматичні зміни, регламентні вимоги зупинки багатьох реакторів у різних країнах, політичні та економічні проблеми, ризики щодо забезпечення вуглеводневим паливом. У 2003 р. 15 країн Європейського Союзу імпортували 80% необхідної їм нафти та 49% — газу. «Головний біль» європейців — залежність від імпорту енергоносіїв. Після кількарічної перерви Велика Британія знову обговорює питання будівництва нових атомних станцій. Канцлер Німеччини А. Меркель, до речі, колишній фізик, заявляє про бажання подовжити термін роботи АЕС до їх повної зупинки. У Китаї однозначно віддають перевагу ядерній енергетиці, у Фінляндії споруджується новий блок потужністю 1600 МВт. Литва заявила, що розглядає можливість відтермінування закриття атомної електростанції в Ігналіні, хоча виведення її з експлуатації було однією з ключових умов приєднання країни до ЄС. Вільнюс вирішив не поспішати із закриттям АЕС до створення альтернативної системи енергетичного забезпечення. Стимулом став візит представників російського «Газпрому», які заявили, що надалі ціни на газ для Литви коливатимуться залежно від ринкових чинників. Парламент Ірану, країни, не обділеної запасами вуглеводнів, ратифікував законопроект щодо будівництва атомних електростанцій загальною потужністю 20 тис. МВт.

Головні аргументи на користь ядерної енергетики — майже повна відсутність забруднення атмосфери двоокисом вуглецю та

визначальна роль у диверсифікації джерел енергії. Подолання залежності від імпорту нафти і газу дасть можливість уникнути того чи іншого заручництва на державному рівні. Не менш відома й аргументація проти — громадськість панічно боїться ядерної енергетики (АЕС можуть бути мішенями для терористів), потенційно великих витрат на утилізацію небезпечних відходів. Більшість цих проблем у майбутньому мають бути розв'язані. Фізики-ядерники, зрозуміло, відіграють ключову роль у підвищенні безпечності експлуатації таких станцій, розробці нових типів ядерних реакторів. Існує думка, що викопних палив вдосталь і вони менш витратні, ніж ядерна енергетика. Однак оцінки стосовно світових запасів нафти і газу істотно різняться. Більше того, кількість видобутку вуглеводнів залежить від того, скільки ми готові заплатити за них. Відносні витрати на функціонування АЕС важко оцінити, оскільки вони залежать від часу експлуатації реактора. Незначна частина прибутку, відраховувана щороку, зможе легко компенсувати витрати на зняття з експлуатації певного блоку, а сучасні реактори розробляються з вимогою спрощення цього процесу.

Витрати на ядерну енергетику порівняно з тепловою істотно відрізнятимуться, якщо враховувати реальну вартість забруднення довкілля та кліматичних змін. Уряд Бельгії створив комісію для аналізу умов генерації електроенергії. Враховуючи у вартості палива непаливні витрати, зовнішні (забруднення повітря, шуми та парникові гази), а також кошти на спорудження ліній електромереж та зняття з експлуатації енергоблоків, комісія дійшла висновку: ядерна енергетика не тільки надійніша, безпечніша і менш шкідлива для навколишнього середовища, ніж альтернативні джерела, а й значно дешевша.

Як сонячна, так і вітрова енергетика, які разом дають тільки 0,15% вироблюваної у світі енергії, займають значні земельні площі. Вони також досить витратні та вп'ятеро не-

безпечніші за ядерну, якщо врахувати смертельні випадки під час роботи цих енергоустановок. Тому практично єдиною альтернативою викопного палива є ядерна енергетика. У 1988 р. на атомних станціях світу було вироблено $1,9 \cdot 10^{12}$ кВт. Таку кількість можна було б отримати спалюванням 900 млн т вугілля чи 600 млн т нафти. Інакше кажучи, ядерна енергетика запобігла викидам 3000 млн т двоокису вуглецю.

Нині будується багато нових газових станцій, які викидають удвічі менше двоокису вуглецю, хоча залишається проблема метану, що має «потенціал глобального потепління» у 60 разів більший, ніж двоокис вуглецю. Ці два ефекти приблизно збалансовані, що означає: ми не можемо сподіватися на зменшення глобального потепління завдяки переходу від вугілля до газу. Навіть якщо цим метановим ефектом знехтувати, то за умов використання газу до 43,5% від загального виробництва і зниження частки вугілля до 2,5% можна очікувати скорочення викидів двоокису вуглецю на 10%. А якщо ядерна енергетика становитиме 43,5%, ці викиди знизяться на 20%.

Якщо продовжувати спалювати викопні палива, ми не тільки забруднимо Землю та зіниціємо глобальне потепління, а й позбавимо майбутні покоління цінних матеріалів, основи нафтохімічної індустрії.

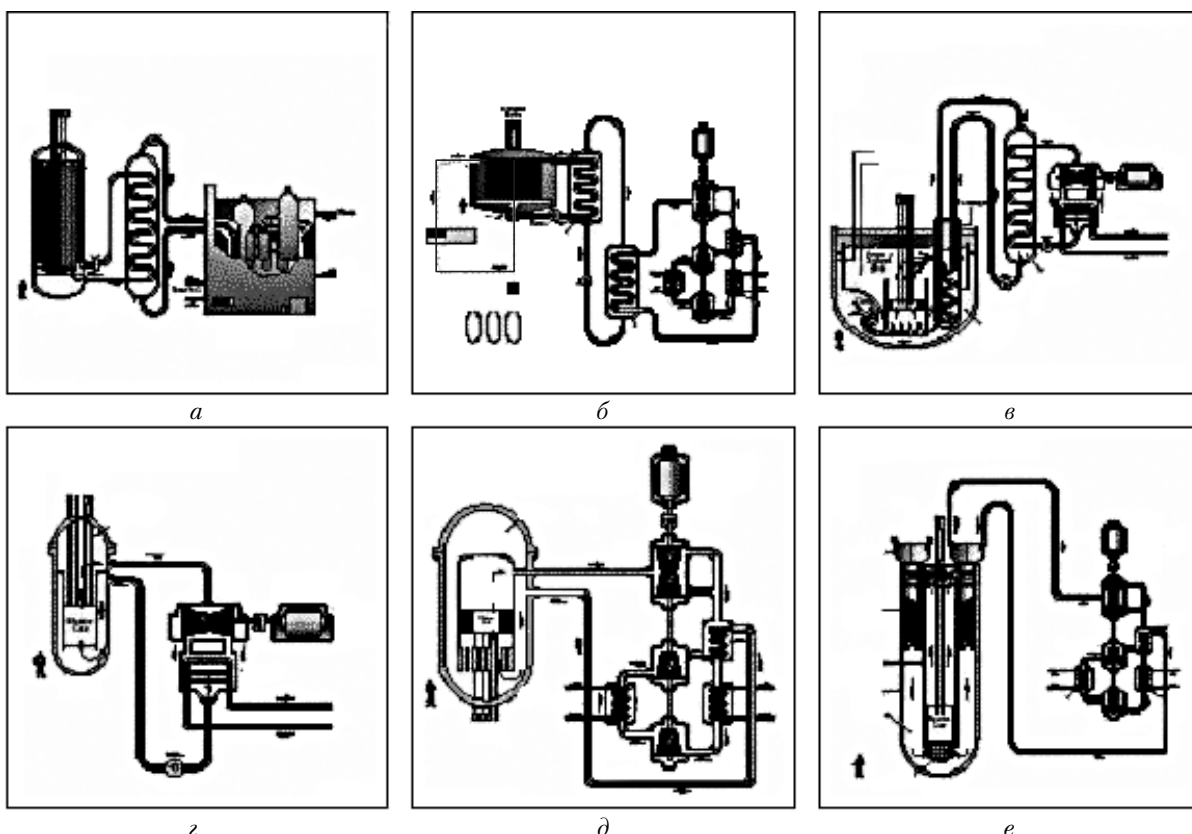
МОДУЛЬНА ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА

Зростаючі енергопотреби людства стимулювали пошук нових підходів щодо безпечної ядерної енергетики. Однак світ раніше почне переходити з вуглеводневого палива на водневе. Необхідна кількість електроенергії і термохімічне виробництво водню як основи «водневої» економіки найближчого майбутнього з використанням реакторів поглиблює розуміння того, що ядерна енергетика відіграватиме важливу роль у гарантуванні економічної стабільності світу. Тому існує гостра потреба у новому поколінні ядерних реакторів. На помезів'ї тисячоліть

десять країн (Аргентина, Бразилія, Велика Британія, Канада, Південно-Африканська Республіка, Південна Корея, США, Франція, Швейцарія, Японія) об'єдналися на Міжнародному форумі «Покоління IV» (GIF) для узгодження рамок кооперації у розвитку ядерно-енергетичних систем, які можна ліцензувати, конструювати та задіяти конкурентоспроможним шляхом, враховуючи вимоги безпечності й інші аспекти громадського сприйняття.

Мета проекту — підготувати до впровадження системи «четвертого покоління» (Gen IV) — з 2030 р. Починаючи з 2001-го, понад сто експертів з перелічених країн — учасниць GIF, МАГАТЕ та Агентства з атомної енергії ОЕСР — розробили Технологічну дорожню Карту Gen IV як керівництво до пошуку та створення найкращих у світі проектів ефективних і безпечних ядерно-енергетичних систем. Наприкінці 2002 р. результати цієї спільної діяльності були узагальнені у пропозиції шести найперспективніших систем (рисунки).

Більшість із запропонованих реакторів мають закритий паливний цикл, що максимізує ресурсну базу та мінімізує кількість радіоактивних відходів високого рівня, які слід відправляти на зберігання. Три системи — це «швидкі реактори», тобто ті, що працюють на швидких нейтронах, один — епітепловий і тільки два працюватимуть на повільних нейтронах, як на сучасних блоках. Лише один охолоджується легкою водою, два — гелієм, а в інших як охолоджувач використовують свинець із вісмутом, натрій чи фтори натрію. Три останні працюють в умовах низького тиску і мають значні переваги щодо безпечності. Температура охолоджувачів змінюється у діапазоні 510–1000 °C порівняно з менш як 330 °C у нинішніх легководяних реакторах. Це означає, що чотири із запропонованих систем можуть використовуватися для термохімічного нагрівання водню.



Найперспективніші ядерно-енергетичні системи: *a* – високотемпературні графітові реактори з гелієвим охолоджувачем потужністю 250 МВт; *b* – реактори, паливо в яких розчинене в охолоджувачі зі фториду натрію потужністю 500–1500 МВт; *c* – натрієві «швидкі» реактори потужністю 150–500 або 500–1500 МВт; *d* – охолоджувані гелієм «швидкі» реактори потужністю 288 МВт; *e* – реактори з охолодженням природною конвекцією рідкого металу (Pb чи Pb–Bi) потужністю 50–150, 300–400 або у «пакеті» до 1200 МВт

Розміри (за потужністю) – від 150 до 1500 МВт електричною (або еквівалентною тепловою). Але, скажімо, реактор зі свинцевим охолоджувачем може бути оптимальним як «батарея» на 50–150 МВт-е із значним терміном використання (15–20 років без перезавантаження палива), як змінна касета або повноцінний реакторний блок. Цей проект особливо цікавий з погляду розподілу потужностей або, наприклад, опріснення морської води. Для чотирьох систем напрацьовано чималий досвід оперативної роботи за більшістю проектних параметрів. Це є запорукою того, що вони можуть викликати комерційний інтерес значно раніше 2030 р.

Ядерні енергетичні системи четвертого покоління мають забезпечити:

- ✦ переваги щодо кошторису витрат порівняно з іншими джерелами енергії;
- ✦ стабільну генерацію енергії, яка не забруднює повітря, сприятиме довготривалому використанню систем та ефективному споживанню палива для глобального виробництва енергії;
- ✦ мінімальний рівень фінансових ризиків;
- ✦ якісні відмінності щодо безпечності і надійності функціонування;
- ✦ низьку вірогідність ушкодження активної зони;
- ✦ відсутність необхідності аварійної евакуації з проммайданчика;

- ♦ мінімізацію ядерних відходів, помітне зменшення супровідного довготривалого навантаження на природне середовище з поліпшенням захисту здоров'я населення та стану довкілля;
- ♦ упевненість у неможливості диверсії, захист проти терористичних актів або викрадення матеріалів для військових цілей.

Найперспективніші підходи пов'язують з концепцією малої атомної енергетики на основі модульних ядерних реакторів. Модульна енергетика аналогічна звичайним «батареям» або принтерним картриджам — має автономні, легко замінні елементи, **які повністю виготовляють і складають на централізованих підприємствах**, у готовому вигляді доправляють на місце використання, де вони можуть працювати десятки років, відтак замінюватися на нові. Така модульність може започаткувати справжню «модульно-ядерну» революцію у масовому виробництві малих АЕС. Але для цього необхідно створити принципово нову індустрію світового рівня — індустрію модульної ядерної енергетики, модульних ядерних міні-АЕС.

Зазвичай очікується, що сучасні малі реактори для генерації енергії мають спрощену конструкцію, забезпечують економію за рахунок масового виробництва та менших витрат на розміщення. У більшості з них також передбачено високий рівень пасивної, або внутрішньої, безпеки у прогнозованих випадках. Традиційні системи безпечності реактора є «активними» в тому сенсі, що вони вмикають електричні або механічні пристрої за командою. Деякі інженерні системи діють пасивно, наприклад клапани тиску. В обох випадках необхідне додаткове паралельне обладнання. Внутрішня, або повна пасивна безпека, залежить тільки від фізичної природи — конвекції, гравітації чи опору за високої температури, без монтування додаткового обладнання.

Такі модулі розробляють як для території, де немає ліній передач і є значні навантажен-

ня, так і для кластерів, що конкурують з великими станціями. Уважний аналіз ситуації з малими ядерними реакторами свідчить про початок світових змагань у цій галузі. Так, сьогодні у США малі АЕС вважають цілком конкурентоспроможними з тепловими енергоустановками (ціна 6 центів за кВт·год). Уже починають спорудження однієї станції на Алясці, а також заявлено про будівництво 7 реакторів в іншому регіоні країни. Південноафриканська компанія «Escom», яка отримала права на створення реактора RBMR, ще у 1999 р. сповістила про наміри до 2016 р. виготовити на експорт 216 міні-реакторів, значна частина яких використовуватиметься для розвитку нових територій. Вартість електроенергії від блоку 50 МВт-е оцінюється в межах 5,4–10,7 цента за кВт·год (для порівняння: витрати на Алясці чи Гаваях становлять від 5,9 до 36 центів за кВт·год). Конгрес США фінансує дослідження як щодо створення малих ядерних модульних станцій (які монтуються із окремих модулів «фабричного» виробництва), так і вдосконалених реакторів з газовим охолодженням (вони модульні в тому сенсі, що до десятка готових блоків виготовляються як кластер для заміни великої АЕС).

Мала атомна енергетика повинна стати основою для створення децентралізованих систем енергозабезпечення. Це можуть бути малоосвоені регіони, острови й навіть перенаселені райони мегаполісів. Так, японці, лідери в розробці мініатюрних ядерних реакторів (Rapid-L), стверджують, що кожного з них досить для забезпечення електрикою і теплом житлових або офісних хмарочосів у великих містах (завдяки можливості розміщення прямо у підвалі будинку або під землею на глибині від кількох до сотні метрів).

ВАРІАНТИ РЕАЛІЗАЦІЇ МІНІ-АЕС

Після появи у 50-х роках минулого століття ядерної енергетики потужності реакторних блоків зросли із 60 до 1300 МВт-е.

Водночас було збудовано кілька сотень менших реакторів — як для використання у судноплавстві, так і тих, які слугували потужними джерелами нейтронів. Це дало змогу нагромадити величезний досвід у розробці порівняно малих реакторів. Їх можна будувати окремо або як модулі більшого комплексу, місткість якого нарощують крок за кроком. Розглядаються варіанти малих блоків для віддалених регіонів. За визначенням МАГАТЕ «малим» вважається реактор потужністю до 300 МВт-е.

США на науковій станції МакМердо в Антарктиді ще в 1962–1972 роках успішно використовували дуже малий військовий реактор РМ-3А (11 МВт-т, 1,5 МВт-е). Зрозуміло, не менший досвід мав у цьому напрямі і колишній Радянський Союз. 40 років експлуатуються на підводних човнах реактори зі свинцево-вісмутовим охолоджувачем. Російський реактор КЛТ-40 ефективно використовувався на криголамах і нині його пропонують для опріснення води або як плаваючу електростанцію. Від 1976 р. у віддаленому регіоні Сибіру експлуатуються чотири маленьких блоки на АЕС. Ці графітові реактори (потужність 62 МВт-е) незвичної конструкції із паро-водяними каналами у поглиначі, що працюють на киплячій воді, забезпечують парою житло та генерують 11 МВт-е кожен. Важко знайти дешевше альтернативне джерело у цьому полярному регіоні. Новітня розробка меншого російського свинцево-вісмутового швидкого реактора має проектну потужність 75–100 МВт-е. Це інтегрована конструкція, в якій парогенератори разом з активною зоною (де можна використовувати паливо різного типу) розміщені у басейні зі свинцем та вісмутом за температури 400–480 °С. Такий блок виготовляють на «заводі» й транспортують як готовий модуль діаметром 4,5 та висотою 7,5 м, відтак занурюють у басейн з водою, яка забезпечує пасивне відведення тепла та захист. Передбачається, що енергетична стан-

ція із 16 такими модулями дасть електроенергію за ціною, меншою, ніж будь-яка інша новітня російська технологія.

Нині у світі існує багато проектів установок (потужністю від 200 кВт до 50 МВт) на довготривалу перспективу, а також проекти, готові до «миттєвої» реалізації. Розглянемо деякі з них (табл. 2).

Модульна атомна енергетика за екологічністю порівнянна із сонячною, геотермальною та вітровою. Але головне у тому, що питання екологічності розв'язується не тільки у технічній площині, а насамперед у площині культури праці та керування техносферою. За інерційного відтворення, ще й в умовах примітивного сучасного «ринку», жодна технічно складна енергетична установка не буде екологічною, а залишатиметься руйнівною — антиприродною, антилюдською. Екологічності модульно-ядерної та й будь-якої іншої енергетики можна досягти за умов ощадливого ставлення до енергетичних ресурсів та доквілля, висхідного проектування експериментальних укладів для конструкторів, до-

Таблиця 2. Проекти модульних ядерних реакторів

Тип реактора	Потужність, МВт	Фірма і країна-розробник
4S, Rapid-L	—	CRIEPI, Японія
HTR-10	10 (HTGR)	INET, Китай
CAREM	27 (PWR)	CNEA & INVAP, Аргентина
KLT-40	35 (PWR)	OKBM, Росія
MRX	30–100 (PWR)	JAERI, Японія
IRIS-50	50 (PWR)	Westinghouse, США
SMART	100 (PWR)	KAERI, Південна Корея
NP-300	100-300 (PWR)	Technicatome, Франція
Modular SBWR	50 (BWR)	GE & Purdue University, США
PBMR	165 10	Eskom, Південно-Африканська Республіка та ін.
GT-MHR	285 (HTGR)	General Atomics, США, Мінатом, Росія та ін.
BREST	300 (LMR)	RDIPE, Росія
FUJI	100 (MSR)	ITHMSO, Японія, Росія, США

слідників та менеджерів — особливого «специфічного розвитку», який при цьому ще й отримує створювану інфраструктуру у власність як винагороду за інноваційну працю.

Реальна вартість модульної ядерної енергетики ще цілком не досліджена, але вона, як мінімум, є конкурентоспроможною, а за правильної організації програми розвитку (створення нової індустрії та серійне виробництво модульних ядерних реакторів) буде навіть вигідною для економіки країни. Можна запропонувати такі положення програми «Модульна ядерна енергетика».

- ♦ Серійне індустріальне виробництво модульних ядерних реакторів малої та середньої потужності.
- ♦ Використання цього типу енергетики як механізму розвитку регіонів та кардинального підвищення якості життя.
- ♦ Відхід країни від прив'язки до вуглеводневої сировини.
- ♦ Створення нового організаційно-промислового високотехнологічного укладу інноваційного типу. Відновлення промисловості, реабілітація кооперативних виробничих зв'язків між заводами та конструкторськими бюро в окремих регіонах і країнах з урахуванням різних форм власності та різних власників.
- ♦ Ефект від одночасного виробництва не тільки електроенергії, а й тепла, оскільки паралельна теплофікація сама по собі значно знижує витрати.
- ♦ Створення нового житлово-комунального господарства, коли вся теплофікація та енергетика отримує новий вимір — надійне забезпечення на 20–50 років.
- ♦ Урахування екологічного складника: сучасні невеликі АЕС безпечні.
- ♦ Можливість вибудовування нових схем власності, приватизації певної частини малих АЕС.
- ♦ Відновлення геостратегічної державної політики, відхід від прийняття квапливих рішень.

Хоч би як, але очевидно, що мала атомна енергетика — це сфера «довгих» грошей. Але не тільки. Це також сфера залучення людей, котрі здатні міркувати масштабно, на десятки років наперед.

УКРАЇНСЬКІ МОЖЛИВОСТІ У КОНТЕКСТІ НАШИХ РЕАЛІЙ

Глобальні і внутрішні політичні та соціально-економічні зміни змушують українську владу визначити пріоритети розвитку паливно-енергетичного комплексу. Закликаючи до диверсифікації економічних і технологічних важелів, слід пам'ятати про першість диверсифікації ідей і пропозицій. Наприклад, наша держава може до 2030 р. (!) збільшити експорт електроенергії вшестеро порівняно з 2004 р. — до 30 млрд кВт·год на рік. Таке зростання передбачає об'єднання енергосистеми України з Об'єднаною енергосистемою європейських країн. Нині ж ми залишаємося складовою частиною Єдиної енергетичної системи Росії (колишнього СРСР)...

Другий приклад — позаторішня російська енергоаварія підтвердила небезпеку надмірної централізації енергетики. Американці теж послідовно децентралізують енергетику за принципом: де створюється навантаження, туди й переміщується генерація, масово впроваджують індивідуальні потужності.

Нарешті, в галузі енергетики, яка вже нині стає критичною для існування розвинених країн (звідки й нафтові війни), прикладом планованого енергетичного прориву є ставка на водневу революцію, сенс якої — у тотальному переході до 2020 р. на водневе паливо та двигуни на його основі. Ця ідея вперше прозвучала ще у 1990 р. у доповіді Римського клубу з міжнародної програми досліджень у галузі альтернативної енергетики. Пропонувалися роботи з термоядерної енергетики та вивчення можливостей майбутньої водневої економіки на основі використання розщеплення води електролітичним і каталітичним методами для отриман-

ня водню. Але водневі двигуни не врятують атмосферу самі по собі, все залежатиме від того, звідки отримувати водень. Якщо за допомогою атомної енергії, то це перехід до чистої енергетики, а якщо ні — інерційне використання брудного вуглеводневого палива і посилення забруднення довкілля. Тому поруч з екстенсивним розвитком традиційних енергогенеруючих систем (гідро- і теплоенергетики) **світовий прорив до енергетики XXI ст. пов'язують з малою атомною енергетикою через створення індустрії з виробництва модульних малих ядерних енергетичних реакторів.** Цей шлях справедливо вважають найбільш простим переходом від сировинної до інноваційної моделі розвитку країни. Сучасні реалії українського ядерно-енергетичного комплексу потребують пильної уваги до цього перспективного технологічного напрямку.

Якщо уявити стратегію енергозабезпечення альтернативними джерелами — сонце, вітер, ріпакове дизельне пальне та ін., слід розуміти необхідність фахового «довічного» супроводу ядерно-енергетичної інфраструктури. Навіть за стовідсоткової відмови від розвитку ядерної енергетики Україна має забезпечувати — технологічно, кадрово, фінансово — виконання довгострокових та небезпечних робіт з радіоактивними відходами, відпрацьованим ядерним паливом тощо.

Останнім часом владні структури кілька разів розглядали ситуацію щодо майбутнього ядерної енергетики. Озвучено пропозицію спорудити до 2030 року 11 нових ядерних блоків. Це, безперечно, зрозумілий фахівцям приклад ідеологічної інерції наукового і технологічного чиновництва. Саме інерції, бо для заміни старих реакторних блоків, час експлуатації яких закінчується, визначено абсолютно нереальні фінансові, технологічні, часові межі виконання.

Раніше йшлося про будівництво трьох блоків до 2065 року — ХАЕС-3, РАЕС-5, ПУАЕС-4. Пропозиція спорудити 11 нових енергоблоків «підсунута» тими самими фа-

хівцями, кредо яких — «після нас хоч потоп». Федеральний міністр Німеччини Юрген Триттін зауважує, що Україна не має коштів на модернізацію реакторів, підвищення заходів безпеки на діючих блоках, не кажучи вже про будівництво нових. Свого часу Євроатом та Єврокомісія відмовилися фінансувати добудову двох блоків на Хмельницькій та Рівненській АЕС. Зрозуміло, що сусіди не забувають самі та нагадують нам про 1986 рік. Щороку на пом'якшення наслідків Чорнобильської катастрофи витрачаємо 5–7% бюджету країни. Тому політична відмова у 1990 р. від спорудження нових реакторів тільки посилила енергетичну залежність (якщо не кризу) незалежної держави. Для України 15 блоків АЕС у різних її регіонах залишаються базою енергетичної політики — це майже 50% задоволення вітчизняних потреб в електроенергії.

Існуючі 15 реакторів протягом 5–10 років допрацюють регламентний термін. Пропонується пролонгувати період експлуатації реакторів (головне — їхніх корпусів) ще на 20–30 років. Загалом це досить великий проміжок часу для високотехнологічного розвитку цивілізації, але наша пострадянська конкретика не додає оптимізму щодо здійснення такого прориву.

По-перше, на фахових нарадах неодноразово визнавалася жорстка необхідність використання проммайданчиків, інфраструктури, водоєм існуючих АЕС для гіпотетичного спорудження нових (на заміну старих) реакторів.

По-друге, фактична добудова українських АЕС ще радянських часів зумовлює жорстку ідеологічну і технологічну прив'язку до ядерно-енергетичного комплексу Росії, а це аж ніяк не відповідає критеріям диверсифікації джерел енергопостачання країни.

По-третє, будівництво реакторного блоку тривало 5–7 років і коштувало приблизно 1 млрд дол. США. Таким чином, для розбудови 11 нових блоків до 2030 р. необхідно

кожні 4–5 років інвестувати по 3–4 млрд доларів. Сучасні економічні реалії України викликають недовіря до таких планів.

Тим часом слід нагадати про безальтернативність підтримки існування атомної енергетики, інфраструктури, ядерних технологій. Подовження ресурсу експлуатації блоків не виключає необхідності демонтажу кожного реактора, що відслужив свій термін, а це потребуватиме величезних коштів.

Ахіллесова п'ята енергозабезпечення України — повна залежність від російських енергоносіїв: газ, нафта — для теплоенергетичної галузі, твели — для АЕС. І це за наявності власних вугільних шахт та уранових покладів! Однак матеріальна або технологічна диверсифікація докорінно не змінить ситуацію без диверсифікації ідей. Мала атомна енергетика і є саме такою альтернативною ідеєю. Але необхідно розв'язати тактичне завдання — подовжити ресурс гарантованої безаварійної роботи всіх 15 блоків. Це потребуватиме не менш амбітних (на жаль, вельми витратних) програм супроводу такого замороженого комплексу кількома майбутніми поколіннями фахівців. Друге стратегічне завдання, яке повинні встигнути розв'язати нинішні спеціалісти, — проблема переробки, захоронення, зберігання радіаційно небезпечних матеріалів, відпрацьованого ядерного палива.

Надійним містком у майбутнє буде для України програма створення власного ядерного паливного циклу. Причому навіть інерційно зорієнтовані на російське паливо фахівці висловлюють сумнів, що Росія «потягне» задекларовані Україною обсяги ринку. Тому за наявності величезних запасів урану, цирконію, розгалуженої металургії, створення власного ядерного паливного циклу істотно посилить енергетичну незалежність нашої держави. За оцінками експертів, на це необхідно витратити 1 млрд дол., і ми мусимо знайти такі кошти. Радіючи із закупівлі ліцензій на виробництво чергової «Коли» чи ріпакового

біодизелю, не можна нехтувати можливістю забезпечити ядерним кульковим (pebble-bed) паливом світову модульну ядерну енергетику.

Нарешті, не слід забувати про ту гірю, яка висить на наших ногах. Чи зможемо ми залишити нащадкам менше проблем з мінімізації наслідків Чорнобильської катастрофи? Справді, якої реакції світової спільноти можна очікувати на атомні інновації країни, котра й досі асоціюється здебільшого з наймасштабнішою ядерною аварією в історії цивілізації.

Задля якнайшвидшого конструктивного розв'язання проблем енергетичної та політичної незалежності України пропонуємо розробити програму розвитку малої атомної енергетики на основі тісного міжнародного співробітництва та кооперації. Така енергетика, що базується на модульних ядерних реакторах, може стати основою енергозабезпечення малих держав Східної Європи, Кавказу, Близького Сходу. Геополітичне становище України, її сировинні ресурси (уран, цирконій, залізна руда), інтелектуальний та високотехнологічний виробничий потенціал — **ті фактори, які можуть вивести нашу державу у регіональні лідери з розвитку малої ядерної енергетики.**

І. Дряпаченко, В. Токаревський, Н. Трофимова

ПЕРСПЕКТИВИ МОДУЛЬНИХ МАЛИХ АЕС

Резюме

Розглядається парадигма розвитку ядерної енергетики України у контексті світових тенденцій. Наголошується на необхідності створення в країні малих атомних електростанцій, які можуть стати проривом в енергетиці XXI століття.

I. Dryapachenko, V. Tokarevsky, N. Trofymova

PROSPECTS OF SMALL MODULAR NUCLEAR POWER-STATIONS

Summary

The paradigm of nuclear power engineering in Ukraine is reviewed in the context of the world trends. The necessity of establishing of small nuclear power stations that may become a break-through in 21 century nuclear power engineering in Ukraine is highlighted.