

Б. ПАТОН, В. БАР'ЯХТАР, О. БАКАЙ, І. НЕКЛЮДОВ**МАЙБУТНЄ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

За півстоліття свого розвитку ядерна енергетика пройшла складний і суперечливий шлях: від грандіозних планів розбудови мережі АЕС до потрясіння Чорнобилем і згорання атомних програм в Україні і деяких країнах Заходу.

Постчорнобильські реалії спонукали світову громадськість до глибшого осмислення проблем безпечного функціонування АЕС. Адже використання сучасних ядерних технологій потребує не тільки фахівців з високим рівнем кваліфікації і відповідальності, а й відповідного рівня культури, освіченості й екологічної свідомості суспільства.

Атомна енергетика вже сьогодні відіграє визначальну роль у виробництві електроенергії в Україні. Частка АЕС у вітчизняній електроенергетиці становить 22,7% за встановленою загальною потужністю і 48% — за обсягами енерговиробництва. В 2004 р. атомними станціями країни було вироблено 87 млрд кВт·год електроенергії, що на 5,6 млрд кВт·год (або на 6,4%) більше, ніж у 2003 р. Коефіцієнт використання встановленої потужності АЕС у 2005 р. становив 75% (у 2004 р. — 81,4%). Ця галузь, безперечно, може стати основою енергетичної незалежності нашої держави, оскільки Україна посідає шосте місце у світі за розвіданими запасами урану. Як енергоносіє уран здатний забезпечити енергетичні потреби нашої держави на

багато сотень років навіть за сучасного стану ядерних водяних реакторів. Перехід на новий тип реакторів, у яких використовується не тільки уран-235, а й уран-238, на тисячоліття забезпечить Україні енергонезалежність.

Майбутнє вітчизняної атомної енергетики слід розглядати у контексті розвитку цієї галузі в світі і необхідності створення ядерних технологій XXI століття.

Останнім часом країни Європи, оговтавшись від постчорнобильського шоку, почали критично переосмислювати свою відмову від розбудови атомної енергетики. До цього їх спонукає не тільки неминучість вичерпання вуглеводневих носіїв (це далека перспектива), а насамперед зростання цін на газ і нафту, необхідність диверсифікації енергоджерел,

© ПАТОН Борис Євгенович. Академік НАН України. Президент НАН України.

БАР'ЯХТАР Віктор Григорович. Академік НАН України. Директор Інституту магнетизму НАН України та МОН України (Київ).

БАКАЙ Олександр Степанович. Доктор фізико-математичних наук. Керівник теоретичного відділу Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

НЕКЛЮДОВ Іван Матвійович. Академік НАН України. Академік-секретар Відділення ядерної фізики та енергетики НАН України. 2006.

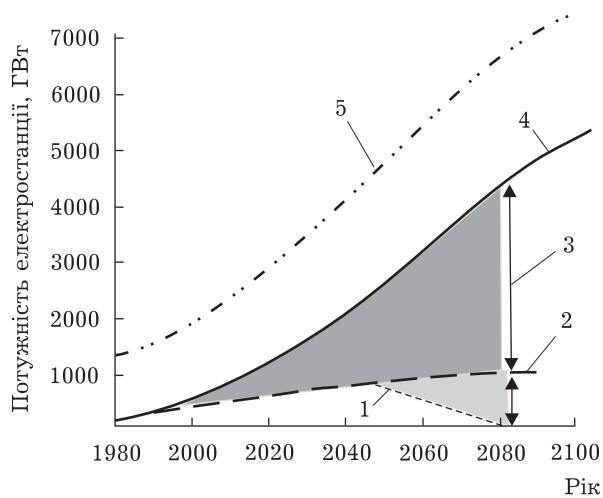


Рис. 1. Прогнози нарощування ядерних енергогенеруючих потужностей:
 1 — реактори на ^{235}U , 2 — теплові реактори на $\text{Th-}^{233}\text{U}$ паливі, 3 — «швидкі» реактори (U — Pu), 4 — теплові та «швидкі» реактори, 5 — сумарні ядерні та неядерні потужності

зміцнення національної безпеки, що є вже викликом сьогодення, на який слід реагувати негайно. Так, країни Балтії приступили до будівництва нової атомної електростанції на території Литви. Франція ще під час енергетичної кризи 70-х років минулого століття зробила чіткий вибір на користь ядерної енергетики, і сьогодні вона забезпечує 75% потреб країни. Японія теж посилено розвиває атомну енергетику: 40% електроенергії у цій країні виробляється на АЕС. У Китаї, Індії, Кореї розроблено великі атомні програми.

Розглядаючи перспективи розвитку атомної енергетики в Україні, слід враховувати особливості ядерного статусу нашої держави.

По-перше, атомна енергетика і промисловість, зважаючи на відсутність замкненого паливного циклу й організацій, які розробляють, проектують і будують атомні реактори, не є у нас самодостатніми. Тому Україна поки що використовує реакторні технології, паливо і засоби з переробки відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) інших країн. Однак у нас є чимало вітчизняних природних, виробничих й інтелектуальних ресурсів у цій сфері. Так,

виробляється цирконій, виплавляються конструкційні сталі, видобувається уран, створено потужне виробництво труб, розробляються засоби контролю, а також виготовляються турбіни, пристосовані для роботи на АЕС. Науковці працюють над створенням фізичних основ реакторного матеріалознавства, успішно розвивається радіаційна фізика.

По-друге, існуюча міжнародна система заборони розповсюдження ядерних технологій і матеріалів поділяє світ на ядерні та неядерні держави, причому останні є підконтрольними споживачами атомної енергії. Сьогодні міжнародна спільнота занепокоєна можливостями несанкціонованого поширення цих матеріалів і технологій з метою виробництва ядерної зброї. Боротьба з розповсюдженням ядерних матеріалів і технологій стала потужним економічним і геополітичним інструментом. Україна, хоч і володіє ключовими ядерними технологіями, матеріалами і розвиненою атомною енергетикою, належить до умовно ядерних держав, оскільки не має промисловості з розділення ізотопів, збагачення урану і виробництва палива. Вона здала свою ядерну зброю і зобов'язалася не виробляти її.

З цих причин розвиток атомної енергетики в Україні сьогодні є реальним тільки за умов тісної кооперації з провідними ядерними державами.

Оскільки атомна енергетика — лише один із секторів енергетики й істотно залежить від економічності інших секторів, її майбутнє можна оцінювати тільки з урахуванням тенденцій розвитку енергетики в цілому. Крім того, екологічні наслідки господарської діяльності людей на Землі стали справді загрозливими у зв'язку з викидами в атмосферу парникового газу (двоокису вуглецю), забрудненням повітря, водойм і ґрунтів токсичними відходами підприємств енергетики. АЕС не викидають в атмосферу парникових газів і не споживають кисень. Проте нинішні атомні реактори не відповідають вимогам гарантованої безпеки, а поводження з радіоактивними

відходами — екологічним нормативам. З урахуванням цих міркувань, а також прогнозу зростання енергетичних потреб і складаються плани використання атомної енергії у розвинених країнах, де їй відводиться одне з основних місць. Ми розглянемо ключові тенденції та проблеми, пов'язані з майбутнім атомної енергетики в Україні і світі.

БІОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЕНЕРГЕТИКИ

Статистичні дані, якими послуговуються експерти, вказують на безперечну кореляцію між тривалістю життя і споживанням енергії на душу населення. Це свідчить про те, що, крім технічного і технологічного прогресу, споживання енергії, зрештою, є основою поліпшення якості життя людини.

Тривалість життя може бути інтегральним показником життєвого рівня населення певної країни (табл. 1).

Таблицю складено за даними Всесвітнього Банку [1], міністерств охорони здоров'я, палива та енергетики України, Інституту економіки та прогнозування НАН України.

Як бачимо з табл. 1, люди в індустріальних країнах (20% населення Землі) споживають енергії багато, живуть довго і за високими економічними стандартами. У країнах «третього

світу» і країнах з перехідною економікою (80% населення планети) енергоспоживання значно менше, тривалість життя приблизно на 10 років нижча і його якість невисока. Природне прагнення людей до гідних життєвих стандартів є потужним чинником нарощення виробництва і споживання енергії.

ЕНЕРГЕТИКА Й ЕКОЛОГІЯ

За прогнозами ООН, аналітичних інститутів США і Європейського Союзу, населення Землі впродовж найближчих 50–100 років зросте до 10–12 млрд, тобто приблизно вдвічі. Очікується, що це призведе до збільшення споживання енергії не менш як утричі [4, 5]. Сучасну структуру виробництва електроенергії у світі подано у табл. 2.

Сьогодні 64% світової електроенергії виробляється за рахунок спалювання вугілля, нафти і газу (вогневі, або традиційні технології). У загальному балансі енергії зазначеним енергоносіям належить близько 80% [2, 4, 5]. Різниця у джерелах одержання електроенергії пов'язана з експлуатацією автомобілів, авіації, опалюванням будинків і т. д. Використання вогневих (традиційних) технологій призводить до інтенсивного витрачання кисню і великих викидів парникового газу (табл. 3).

Таблиця 1. Рівень споживання електроенергії і тривалість життя у різних країнах світу

Показник	США	Велика Британія	Японія	Франція	Канада	Україна	Росія	Китай	Індія	Замбія
Е	12,5	5,8	7,3	8,2	18,5	4,1 (3,6)	5,9	0,7	0,4	0,8
Д	29,3	21,4	32,4	24,9	20,0	0,85	2,3	0,75	0,43	0,33
<Л>	76	77	80	78	78,5	67,5	67	70,5	59,5	45,5
Л (ч/ж)	76/80 (67,5/73)	74/80	77/83	74/82	75/82	62/73	58/72	69/72	59/60	45/46
Населення, млн осіб	270	59	126	59	30	47	147	1240	980	9,7

Примітка. Е — споживання електроенергії на душу населення на рік, МВт-год;

Д — дохід на душу населення, тис. дол. США;

<Л> — приблизні межі тривалості життя, роки;

Л (ч/ж) — середня тривалість життя чоловіків / жінок, роки. У колонці для США цей показник наведено стосовно білого населення і негритянського (у дужках).

Таблиця 2. Структура світового виробництва електроенергії

Джерело	Частка, %
Вугілля	39
Ядерна енергетика	16
Газ	15
Нафта	10
Гідроелектростанції	19

Таблиця 3. Витрати кисню і викиди вуглекислого газу під час спалювання різних видів палива

Паливо, на кг	Витрати і викиди, кг	
	кисню	двоокису вуглецю
Вугілля	2,7	3,7
Нафта	3,5	4,5
Газ	4,0	5,0

Витрати кисню настільки великі, що вже нині потужностей лісів Сибіру й Амазонки ледь вистачає для їхньої компенсації. Інакше кажучи, масштаби господарської діяльності людини загрожують стабільності вмісту кисню в атмосфері. Сьогодні техногенні викиди двоокису вуглецю у повітря становлять близько 25% [6, 7, 9] загальних надходжень цього забрудника внаслідок вулканічної діяльності та з інших природних джерел. У разі нарощення виробництва енергії традиційними методами обсяг викидів може зрости до 40–50%. За рекомендаціями Кіотського протоколу й інших форумів з проблем екології кількість викидів вуглекислого газу порівняно з нинішнім рівнем необхідно зменшити вдвічі [6, 9].

Як відомо, більшість екологів, фізико-хіміків, географів вважають, що у змінах клімату Землі істотним чинником є потрапляння в атмосферу значних обсягів двоокису вуглецю. З цієї причини ми неминуче доходимо парадоксального, на перший погляд, висновку: **хочеш жити краще, виробляй більше енергії. Отримуєш більше енергії за вогневими**

технологіями — змінюєш клімат Землі, і твої діти та внуки житимуть гірше.

Сформулюємо цей висновок дещо інакше, і тоді зникне уявна парадоксальність суджень, а вибудується строгий логічний ланцюжок: **хочеш жити краще, раціонально використовуй ресурси планети і вироблювану енергію. Розвивай науку, яка дасть змогу компенсувати збитки, завдані навколишньому середовищу від господарської діяльності. Дбай про освіту дітей не тільки у своїй країні, а й у всьому світі, бо знедолені і неосвічені люди у сусідніх країнах, рятуючи себе від зубожіння, можуть порушити планетарний екологічний баланс.**

Як свідчать прогнози оцінки експертів, запаси нафти і газу вичерпаються в осяжному майбутньому — впродовж 50–100 років [7, 8, 10]. Це зменшить техногенний тиск на довкілля, але водночас може призвести до енергетичного колапсу, якщо вже тепер не розробляти стратегію використання альтернативних енергетичних джерел.

З відомих нині технологій виробництва енергії не пов'язані зі споживанням кисню і викидами парникових газів тільки ті, які ґрунтуються на використанні:

- ♦ енергії річок, припливів тощо (гідротехнології);
- ♦ енергії вітру;
- ♦ сонячної енергії;
- ♦ технологій виробництва теплової енергії з біомаси;
- ♦ ядерних реакцій поділу (атомна енергетика);
- ♦ ядерних реакцій синтезу (промисловий варіант цієї технології ще не створено).

Коротко прокоментуємо зазначені напрями розвитку енергетики.

Використовувати енергію річок людина почала дуже давно. У цій сфері нагромаджено великий досвід. Однак сьогодні більшість можливостей для виробництва електроенергії на ГЕС уже вичерпано. А технології використання енергії вод океану (припливи і від-

пливи) у промислових масштабах поки що практично не реалізовані, оскільки тут існують чималі технічні труднощі.

Вітрова енергія — один з найбільш освоєних видів відновлюваної енергетики. Впровадженню вітрових енергоустановок протягом останнього десятиліття приділялася велика увага у США, Німеччині, Нідерландах. Проте вітрова енергетика має певні особливості, що обмежують її широке освоєння. По-перше, такі енергоустановки розташовані здебільшого у приморській зоні: саме тут дмуть постійні, досить інтенсивні вітри. По-друге, це джерело енергії порівняно малопотужне. Тому окремі вітрові установки об'єднують у батареї або використовують у побутових цілях. По-третє, такі джерела енергії не є постійно діючими, вони ефективні за умови роботи спільно з акумуляторами енергії. Однак у процесі використання великих батарей вітрових установок у США було виявлено їхній шкідливий вплив на природне середовище. Щоправда, згодом цю проблему вдалося розв'язати.

Сьогодні фахівці сформулювали такі висновки щодо розвитку вітрової енергетики: вона ефективна для задоволення потреб розподілених споживачів малих енергетичних потужностей. Зокрема, у невеликих населених пунктах, особливо у сільській місцевості. Розвиток тут вітрової енергетики сприятиме забезпеченню сільських жителів не лише енергією, а й робочими місцями. Для постачання енергії «точковим» споживачам великих потужностей вітрові енергоустановки малоефективні.

У галузі використання сонячної енергії також уже нагромаджено чималий досвід. Енергія Сонця має ті самі особливості, що й вітрова. У середніх і високих широтах «запаси» сонячної енергії порівняно невеликі. Окреме її джерело, як правило, малопотужне і не може бути стабільним стосовно часового параметра. Для нарощування потужностей потрібні величезні площі, внаслідок чого відразу вини-

кає проблема очищення поверхні сонячних батарей. Загальні висновки щодо сонячної енергетики збігаються з висновками стосовно розбудови вітрових енергоустановок: сонячна енергетика ефективна для задоволення потреб розподілених споживачів лише малих енергетичних потужностей.

Останнім часом у розвинених країнах активно працюють над технологіями виробництва теплової енергії з біомаси та інших видів палива (деревні відходи, соломка, торф тощо), біогазу — із гною великої рогатої худоби, біодизелю — з ріпаку. Допмагаючи переробляти в енергію відходи, стічні води, метан, такий напрям відновлюваної енергетики досить перспективний з екологічного погляду, однак розробка і впровадження цих технологій потребують чималих інвестицій. Окрім того, енергоустановки, які працюють на таких джерелах, розраховані на забезпечення енергією невеликих населених пунктів.

Атомна енергетика базується на ядерних реакціях поділу. В цій галузі енергетики накопичено значний досвід. На нашу думку, АЕС мають великі перспективи в Україні і світі, які ми обговоримо далі.

Перевагами атомної енергетики, по-перше, є те, що АЕС не споживають кисень і не викидають парникових газів. По-друге, паливо для АЕС коштує значно дешевше, ніж нафта, газ і навіть вугілля, до того ж воно добувається в Україні. «Факторами стримування» розвитку атомної енергетики є те, що з економічного погляду АЕС досить капіталомісткі, враховуючи витрати на досягнення дуже високого рівня безпечності.

АЕС сьогодні не можуть розв'язати всіх питань енергетики, наприклад, функціонування авіації, автотранспорту, опалювання приміщень тощо. Атомну енергетику необхідно буде розвивати спільно, скажімо, з водневою енергетикою. Одразу відзначимо, що це — надзвичайно складна проблема, яка ще потребує свого розв'язання.

ЯДЕРНИЙ РЕНЕСАНС

З початку XXI ст. у світі спостерігається відродження атомної енергетики. У США, Франції, Фінляндії, низці азійських країн (Китай, Індія) прийнято рішення про спорудження нових атомних енергоблоків. Це зумовлено передусім підвищенням світових цін на нафту і газ, необхідністю посилення енергетичної безпеки країни, зниження викидів парникових газів. Коротко охарактеризуємо ситуацію з атомною енергетикою в окремих країнах.

Росія. Сьогодні Російська Федерація має 33 ядерних блоки, частка АЕС у загальній електроенергетиці країни сягає 17%. Уряд Росії планує впродовж найближчих 5–7 років підвищити виробництво електроенергії у європейській частині з 30 до 40–50%.

Керівництво російської атомної галузі бере курс на збільшення частки АЕС у виробництві електроенергії. Так, глава «Росатому» Сергій Кириєнко заявив, що протягом 25 років у країні необхідно побудувати 40 нових енергоблоків. За оцінками фахівців, це коштуватиме близько 60 млрд дол. США. До 2020 р., згідно з Енергетичною стратегією Росії, виробництво електроенергії має становити майже 1350 млрд кВт·год, з яких 23% генеруватимуть атомні електростанції. Це означає, що загальна потужність усіх ядерних енергоблоків у країні через 15 років дорівнюватиме 45 ГВт. Прості розрахунки показують, що для досягнення планового рівня, з урахуванням нинішнього стану ядерної енергетики, необхідно впродовж 2012–2020 років щорічно вводити в експлуатацію по 3 ГВт потужностей.

Стосовно реакції громадської думки на розбудову АЕС, то 59% населення Росії підтримують розвиток атомної енергетики.

РФ має всі компоненти замкненого ядерного циклу — від наукового супроводу до захоронення ВЯП. Росія займає активну позицію щодо розвитку АЕ у себе в країні і світі. У реакторах і паливі для них, які виготовляє Російська Федерація, зацікавлено чимало

країн Східної Європи (Угорщина, Чехія, Словенія, Словаччина).

«Розвиток атомної енергетики абсолютно неминучий не тільки всередині країни, а й у світі. Ми не повинні прогавити момент. У певному значенні ми маємо зробити експансію за межі країни, насамперед у регіони Південно-Східної Азії, де необхідні величезні енергоресурси», — такий ключовий напрям стратегії «Росатому».

Китай. Уряд Китаю планує збільшити до 2020 р. виробництво електроенергії за рахунок АЕС ушестеро. Передбачається ввести 30 нових блоків і забезпечити 4% потреб промисловості в електроенергії.

Індія. Нині в Індії 14 блоків АЕС генерують 3,3% електроенергії, або 17 млрд кВт·год. Уряд країни ухвалив рішення збільшити виробництво електроенергії на АЕС упродовж найближчих 7 років у 10, а до 2050 р. — в 100 разів. До 2040 р. передбачається почати ефективну експлуатацію АЕС на торії.

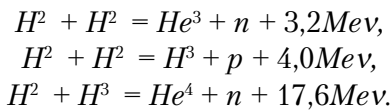
США. Уряд Сполучених Штатів планує відійти від використання нафти і газу для виробництва електроенергії і нарощувати потужності для її отримання за рахунок вугілля й АЕС. Нині у США експлуатуються 103 енергоблоки, частка атомної енергетики у виробництві електроенергії становить 20%. Країна має всі компоненти ядерного циклу — від наукового супроводу до захоронення ВЯП.

Південна Корея. Сьогодні тут функціонують 20 блоків (водо-водяний енергетичний реактор + Канду). Частка атомної енергетики у генеруванні електроенергії — 40%. У Південній Кореї налагоджено виробництво власного палива, працює завод з переробки ВЯП, є сховище для відпрацьованого ядерного палива. Планується до 2027 р. збільшити кількість блоків до 28.

ТЕРМОЯДЕРНИЙ СИНТЕЗ

Ядерна енергетика може базуватися не тільки на реакціях поділу, а й реакціях синтезу. Можливими реакціями термоядер-

ного синтезу є такі:



Нагадаємо, що в 1938 р. Г. Бете і К. Вейцеккер розглянули механізм виробництва енергії на Сонці й інших зірках головної послідовності. Вони довели, що основною реакцією з виробництва енергії є реакція синтезу ядер водню (протонів) у гелій, який починається з реакції $H_1^1 + C_5^{13} = N_6^{14} + hv$. Далі відбувається ланцюжок реакцій з участю протонів, у результаті яких чотири протони утворюють ядро гелію і вуглецю $He_2^4 + C_5^{13}$. У проміжних реакціях циклу виникають два позитрони і виділяється енергія. Під час цих реакцій кількість ядер вуглецю не змінюється, а вуглець слугує своєрідним каталізатором. Вуглецево-азотний цикл згоряння водню з перетворенням у гелій є основним для зірок з високою температурою.

За роботи з теорії ядерних реакцій, особливо відкриття циклу термоядерних реакцій, що є джерелом енергії зірок, Г. Бете 1967 р. присудили Нобелівську премію.

Прокоментуємо третю з наведених реакцій. Як відомо, тритій $H^3 \equiv T$ є радіоактивним елементом з періодом напіврозпаду $T_{1/2} = 12,35$ року. Природний тритій утворюється за рахунок бомбардування азоту нейтронами космічного проміння у реакції $N_7^{14} + n_0^1 \equiv T_1^3 + 3He_2^4$.

Техногенний тритій виникає внаслідок взаємодії літію з нейтронами в реакції $Li_3^6 + n_0^1 \equiv T_1^3 + He_2^4$.

Ідею використання літію для виробництва тритію у водневій термоядерній бомбі, а саме — твердої речовини дейтериду літію (LiH^2), уперше висловили науковці колишнього СРСР. Її сформулював В.Л. Гінзбург (березень 1949 р.) і незалежно від нього — О.А. Лаврентьєв (липень 1950 р.). О.А. Лаврентьєв запропонував також використовувати реакції синтезу ізотопів водню для промислового виробництва електроенергії. Таку

саму пропозицію (застосувати дейтерид літію-6 у гетерогенній водневій бомбі) ще раніше (1947 р.) висловив Є.Теллер у США, але її реалізували тільки після випробування водневої бомби в СРСР.

Конструкція водневої бомби була запропонована А.Д. Сахаровим. Реакції синтезу з дейтерієм і тритієм і з напрацюванням тритію під час опромінювання дейтериду літію у бланкеті, що оточує тороїдальну камеру з дейтерій-тритієвою плазмою, планується здійснити в установках керованого термоядерного синтезу (КТС). Нагадаємо, що у листопаді 1952 р. у США було випробувано перший наземний термоядерний пристрій типу «бомба» вагою до 80 т, де використали рідкий дейтерій. Перша транспортабельна воднева бомба потужністю майже до мегатонни була випробувана у серпні 1953 р. в СРСР.

Роботи з керованого термоядерного синтезу почалися в СРСР за ініціативою І.В. Курчатова, А.Д. Сахарова та І.Є. Тамма (1951 р.). А.Д. Сахаров запропонував використовувати для утримання плазми магнітне поле соленоїда, згорнутого у тор: пропускати електричний струм через плазму, щоб уникнути її втрат вздовж магнітних силових ліній і виключити дрейф плазми впоперек магнітного поля, який виникає через неоднорідність тороїдального магнітного поля. На основі цієї ідеї у Лабораторії вимірювальних приладів (пізніше — Інститут атомної енергії ім. І.В. Курчатова) була розроблена концепція токамака. Перші токамаки в інституті створили в середині 50-х років І.М. Головін і Н.А. Явлінський.

Головні переваги керованого термоядерного синтезу такі:

- величезні, фактично необмежені запаси дейтерію містяться в океані; за оцінками фізиків такої кількості дейтерію достатньо для виробництва енергії за нинішніх темпів її споживання приблизно на мільярд років;
- відсутність прямих радіоактивних відходів;

♦ за умови виробництва енергії в установках КТС не споживається кисень і не продукуються парникові гази.

З 60-х років ХХ ст. започаткована міжнародна співпраця зі створення керованої термоядерної установки, однак вона і досі не розроблена, хоча й досягнуто в цьому напрямі значущих наукових результатів. Очікується, що такий пристрій, за умови відповідного фінансування, створять до кінця першої половини ХХІ ст. [3].

В Україні найбільших успіхів у галузі теорії й експерименту з керованого термоядерного синтезу досягнуто у Харківському фізико-технічному інституті НАН України. Підґрунтя цих досліджень заклали видатні фізики — К.Д. Синельников, О.І. Ахієзер, Я.Б. Файнберг, В.Т. Толок. Нині їхні ідеї розвивають основоположник високочастотного нагрівання плазми член-кореспондент НАН України К.М. Степанов, піонер робіт з мирного використання термоядерного синтезу О.О. Лаврентьев. У ХФТІ діє унікальна термоядерна установка «Ураган-3».

Термоядерна енергетика в світі перебуває поки що на етапі науково-дослідних робіт і створення конструкційних матеріалів. Нині важко спрогнозувати реальні терміни введення в дію навіть демонстраційного реактора.

На думку вчених, створення промислової термоядерної установки до 2050 р. не слід очікувати.

Участь у міжнародних проектах зі створення і випробування великих плазмових пасток, особливо розробки перспективних матеріалів для термоядерних реакторів, вважаємо, є найприйнятнішим шляхом розвитку цих досліджень в Україні.

АТОМНІ РЕАКТОРИ

Основою ядерної енергетики раніше були теплові реактори, робота яких забезпечувалася обмеженою кількістю дешевого палива. На українських АЕС працюють реактори типу ВВЕР, що виготовляються у Росії.

Вони достатньо надійні: про це свідчить хоча б той факт, що такі реактори функціонують на багатьох європейських АЕС.

Упродовж найближчого десятиліття Україні належить побудувати (чи закупити) 10–12 реакторів, оскільки, починаючи від 2011 р., завершується проектний термін роботи 12 енергоблоків на вітчизняних АЕС.

Слід зазначити, що останнім часом у реакторобудуванні з'явилися якісно нові технології. Це передусім реактори на швидких нейтронах (РШН). Як відомо, теплові реактори працюють на урані-235, якого у природному урані міститься всього 0,7%, тобто паливо використовується дуже нераціонально, та й поклади висококонцентрованого урану на Землі обмежені. А головне, що внаслідок його використання утворюється досить багато відпрацьованого ядерного палива.

Під час експлуатації РШН можна використовувати й уран-238, а перевівши його у плутоній-239, досягати цілковитого його спалювання. Це означає, що такий реактор у процесі роботи сам створює собі паливо. Він переробляє весь уран і за часом роботи стає «вічним двигуном». Таким чином, потреба у природному урані для атомної промисловості знижується майже вп'ятеро. Реактор на швидких нейтронах може працювати і на торії, запаси якого в Україні значні і перевищують поклади урану.

Ідею створення «швидких» реакторів розробили майже одночасно і незалежно один від одного академік АН УРСР О.І. Лейпунський (1946–1948 рр.) і Е. Фермі у США. Слід зазначити, що Олександр Ілліч Лейпунський був палким апологетом і науковим керівником робіт зі створення РШН у СРСР.

Коефіцієнт корисної дії реакторів на швидких нейтронах уже нині досягає 42% (Росія) замість 33% для реакторів, які працюють на повільних нейтронах, коефіцієнт вигорання палива — 11%. Очікується, що в реакторах майбутнього останній показник буде не мен-

ше 40%. Звичайно, РШН, як і реактори на повільних нейтронах, виробляють радіоактивні відходи, але їхній обсяг набагато менший і від самого початку виключає уран та плутоній.

У Росії 25 років успішно працює на Білоярській АЕС реактор БН-600. Багато років експлуатувався реактор такого типу в м. Шевченко для опріснення води Каспійського моря. Російська Федерація планує до 2030 р. створити і запустити на ринок реактор БН-1800 потужністю 1800 МВт.

У галузі фізики і техніки реакторів, які працюють на швидких нейтронах, Росія приблизно на десятиріччя випереджає США, Францію, Німеччину, Велику Британію, Японію й Індію, де нині також ведуться розробки подібних реакторів.

У Національному науковому центрі «ХФТІ» НАН України під керівництвом професора О.С. Бакая розробляють досить перспективний з погляду спалювання відпрацьованого ядерного палива проект швидкого реактора — рідинно-сольово-ядерний.

АТОМНА ЕНЕРГЕТИКА УКРАЇНИ

У наукових колективах, і на рівні владних структур нині обговорюється питання про доцільність і можливість створення в Україні замкненого ядерного циклу. У нас для цього існують певні передумови, але ще більше — неподоланих труднощів.

Не слід забувати, що Україна за статусом — не ядерна держава. Однак ми реально працюємо у тих напрямках, які необхідні для створення власного замкненого циклу.

По-перше, країна має великі перспективи у виробництві цирконієвих сплавів і прокату.

По-друге, у нас є база для розвитку сучасного атомного машинобудування; вітчизняні підприємства випускають конкурентоспроможні автоматичні системи управління АЕС. Харківський завод «Турбоатом» готовий виготовляти турбіни для водно-водяних російських реакторів ВВЕР-1500.



О.І. Лейпунський

У ННЦ «ХФТІ» НАН України є перспективні розробки у галузі тепловидільних елементів для високотемпературних газових реакторів, високо оцінені зарубіжними фахівцями: українських учених запросили до співпраці у комісії МАГАТЕ з розробки таких реакторів.

Найближчим часом необхідно налагодити промислове виробництво цирконієвих сплавів та прокату з них, що є дуже важливим елементом ядерного машинобудування, а також інтенсивніше розробляти уранові рудники.

Стосовно наукового супроводу розвитку атомної енергетики, то в Україні є для цього висококваліфіковані колективи вчених та інженерів. Це 20 академічних інститутів відділень ядерної фізики та енергетики, фізико-технічних проблем матеріалознавства, фізико-технічних проблем енергетики. Чотири вищих навчальних заклади (Київ, Харків, Одеса, Севастополь) ведуть підготовку кадрів для АЕС, проектно-конструкторські інститути розробляють проблеми атомної енергетики.

Нині в Україні повністю сформована й успішно працює Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом», яка 2005 р. відпускала електроенергію вартістю 7,14 коп./кВт-год за собівартості — 5,03 коп./кВт-год. Зазначимо, що на теплових електростанціях собівартість такої кількості електроенергії

приблизно 10 коп. НАЕК «Енергоатом» працює на 13 російських реакторах ВВЕР-1000 та двох ВВЕР-440 і тільки на російському паливі.

Разом з тим для створення власного замкненого ядерного циклу в Україні немає ключових складників: палива, потужностей з переробки відпрацьованого ядерного палива, сховищ для його зберігання. Щоправда, останнім часом побудували сухе тимчасове сховище ВЯП на Запорізькій АЕС.

Але найбільшою проблемою є потужна опозиція подальшому розвитку атомної енергетики з боку громадської думки, яка сформувалася одразу після Чорнобильської катастрофи.

Для того, щоб атомна енергетика України повністю відповідала сучасним вимогам і забезпечувала енергетичну незалежність нашої держави, необхідно розв'язати низку нагальних завдань:

- ♦ створити вітчизняне виробництво палива для АЕ (для цього потрібно ~ 1 млрд дол. США);
- ♦ подовжити термін служби діючих блоків на 15 років, тобто провести їх повноцінну перевірку і виконати профілактичні роботи;
- ♦ ввести нові блоки (11–12), вибравши типи реакторів і уклавши контракти на будівництво на основі тендеру (~ 11–12 млрд дол. США);
- ♦ побудувати завод з переробки ВЯП (0,6 млрд дол. США);
- ♦ спорудити сховище ВЯП (можливо, за рахунок об'єкта «Укриття» №2) — ініціатива Президента України В.А. Ющенка;
- ♦ побудувати «Укриття» №2 на ЧАЕС (понад 1,2 млрд дол., на кошти донорів) і вивести ЧАЕС з експлуатації (за гроші України).

Виконання перелічених заходів потребує величезних коштів — близько 15 млрд дол. США. Здійснення цих робіт разом з упровадженням енергозберігальних технологій, виробництвом у необхідних обсягах енергії на

ТЕС за рахунок вугілля і мазуту допоможе Україні позбутися енергетичної залежності і зміцнити національну безпеку. Безперечно, ця програма має бути під постійним контролем Президента й Уряду України.

Національна академія наук може зробити істотний внесок у науково-технічне забезпечення реалізації цієї програми. Досі йшлося тільки про технічний аспект справи. Однак у нас існують соціальні, психологічні та моральні проблеми, які необхідно розв'язати для успішного розвитку атомної енергетики.

Двоє з авторів цієї статті — ліквідатори аварії на ЧАЕС. Ми не можемо не висловити своєї думки щодо цих проблем.

Загальновідомо, що після Чорнобильської катастрофи громадськість України різко налаштована проти «мирного атома» і будівництва нових енергоблоків. Нагадаємо, що у нас лише ліквідаторів і переселенців із забруднених радіонуклідами територій налічується близько 300 тис. осіб.

Це означає, що Уряд України, керівництво НАЕК «Енергоатом» з особливою увагою мають поставитися до громадської думки стосовно перспектив розвитку атомної енергетики. Щоб переконати суспільство у її перевагах, потрібна велика і чесна пропагандистська робота, щоб люди конкретно знали, що їм дасть розбудова АЕС. Інтереси громадян, потерпілих від аварії на ЧАЕС, безперечно, насамперед необхідно враховувати у планах розвитку атомної енергетики. Потрібно, щоб будь-який мешканець країни мав можливість будь-коли отримати інформацію про стан будь-якої з вітчизняних атомних станцій. Тоді населення буде впевненим у надійності і безпечності роботи АЕС, довірятиме професіоналізму і моральній культурі їх операторів.

У Франції, Японії, Бельгії роботі з громадськістю приділяють величезну увагу. Так, будівництво жодного з 59 блоків АЕС у Франції не починалося без узгодження з мешканцями того району, де мала споруджуватися АЕС. Жителі місцевості навколо

станції отримували певну «плату за страх» жити поряд з нею. Це — будівництво шляхів, шкіл для дітей, пільгові тарифи на електрику, тепло для парників і будинків за пільговими цінами тощо. Зрештою, люди, котрі мешкають на територіях навколо АЕС, мають доступ до інформації про радіаційну обстановку на станції та рівень її безпечності. Громадяни знають свої права, ступінь компенсації можливих збитків.

У Франції існує спеціальний центр з ліквідації можливих аварій зі своїми потягами, літаками й автобусами: транспорт оснащений не тільки необхідною кількістю дозиметрів, а й засобами для дезактивації.

В Україні поки що вся ця робота лише в зародковому стані. Мешканці прилеглих до АЕС населених пунктів не мають відповідних пільг. Більше того, деякі обіцянки, які давали їм на початку спорудження АЕС, владою не виконані. А потерпілі від катастрофи на ЧАЕС і досі не отримують адекватних грошових компенсацій.

Усі ці соціальні й етичні проблеми необхідно без зволікання розв'язувати, і фахівці НАН України готові співпрацювати з урядом у цьому напрямі.

1. World Bank: <http://www.worldbank.org/data/> (дані щодо доходів — за станом на 1998 р.).
2. World Bank: <http://www.worldbank.org/data/wdi/environment.html>; Energy production and use.
3. *Велихов Е.П.* Проблемы управляемого термоядерного синтеза в XXI столетии: Докл. на ежегодном общем собр. Международной федерации ученых, Эриче, Сицилия, авг. 1999 (не опубликовано); *Велихов Е.П., Путвинский С.В.* Термоядерная энергетика. Статус и роль в долгосрочной перспективе / ИАЭ им. И.В. Курчатова. — М., 1999. — С. 63.
4. International Institute for Applied System Analysis, I IASA / N.Nakicenovic, A.Grubler, A.MacDonald «Global Energy perspectives». — Cambridge Uni. Press, 1999. — С. 282.

5. Report «Powerful Partnership. Federal Role in International Cooperation on Energy Innovation» presented President's Committee Advisors on Science and Technology and, Panel on International Cooperation in Energy Research, Development, Demonstration, and Deployment / Ed. John P. Holden // Washington DC, US, 1999. — P. 314.
6. World Bank: <http://www.worldbank.org/data/wdi/environment.html>; Energy efficiency and emissions.
7. МАГАТЭ, Sustainable Development and Nuclear Power: <http://www.iaea.org>.
8. Encyclopedia Britannica (CD). — World Resources and Reserves, 1998.
9. *Douglas R.O. Morrison.* World Energy and Climate in Next Century // Fifteen Planetary Emergencies: World Federation Scientists Conference. — Erice, Sicily, 1999. — P. 78.
10. *Donnelle H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jurgen Randers.* Beyond Limits. Confronting Global Collapse. Envisioning a Sustainable Future. — Vermont, USA: Chelsea Publishing Company, Post Mills, 1998. — P. 415.
11. *Головинский С.А., Бойцов А.В.* Сырьевое обеспечение потребностей действующей и инновационной атомной энергетики // 25 лет работы реактора БН-600: Матер. конф. — М., 2005; *Рачков В.И.* Атомная энергетика. Состояние и перспективы. — Там само.

Б. Патон, В. Бар'яхтар, О. Бакай, І. Неклюдов

МАЙБУТНЄ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Резюме

Розглядаються перспективи розвитку ядерної енергетики України у контексті світових тенденцій і постчорнобильських реалій. Акцентується на суттєвій ролі АЕС у планах забезпечення енергетичної незалежності країни.

B. Paton, V. Baryakhtar, O. Bakai, I. Neklyudov

THE FUTURE OF NUCLEAR-POWER ENGINEERING

Summary

The prospects of nuclear power engineering of Ukraine within the frames of world trends and post-Chornobyl realities are described. The emphasis is made on essential role of nuclear power stations in the plans of Ukrainian energy independence provision.