



**Борис Патон**

доктор техн. наук,  
академік НАН України,  
президент НАН України,  
директор Інституту  
електрозварювання  
ім. Є.О. Патона НАН України,  
м. Київ



**Олександр Бакай**

доктор фіз.-мат. наук,  
академік НАН України,  
завідувач відділу Інституту  
теоретичної фізики ННЦ  
"Харківський фізико-технічний  
інститут" НАН України,  
м. Харків

## 1. Преамбула

У березні 2006 р. Кабінет Міністрів України схвалив Енергетичну стратегію України на період до 2030 року [1], у відповідності до якої до кінця цього періоду сумарна потужність атомних і теплових електростанцій країни повинна збільшитися в 2.2 рази. Саме в цей час у світі відбудеться розробка і впровадження ядерних технологій наступного (четвертого) покоління. Розвиток атомної енергетики України не є самодостатнім. Він базується на імпорті ядерних технологій. Через велику інерційність і ресурсоемність атомної енергетики вибір стратегії її розвитку в умовах революційних змін технологій є складним завданням. Це не знайшло належного відображення в Енергетичній стратегії. Обговоренню перспектив ядерної енергетики України з урахуванням цих обставин і присвячено цю статтю.

## 2. Вступ

Останніми роками глобальні економічні та геополітичні процеси проходять під знаком заклопотаності глобальними змінами клімату і загострення проблем енергетики. Проблеми екології й енергетики тісно пов'язані між собою, і на сьогодні їхній коефіцієнт зв'язку є негативним, тобто: консервативний сценарій розвитку енергетики веде до збільшення загрозливих змін клімату. У свою чергу, необхідність усунення гострих наслідків кліматичних змін ляже важким тягарем на глобалізовану економіку, а отже, і на енергетику, що є рушійною силою економіки. У зв'язку з цим відбувається перегляд глобальних і національних доктрин розвитку економіки й енергетики, зокрема й ядерної енергетики, з метою пошуку прийняттого розв'язку екологічних і енергетичних проблем. Загальновизнано, що актуальними і для енергетики, і для екології є такі принципи.

- Жорстка і всебічна економія енергії, впровадження енергозберігальних технологій у промисловості та побуті.
- Створення технологій уловлювання двоокису вуглецю при виробництві енергії з вугілля, нафти і газу.
- Перехід до відновлюваних джерел енергії (біопаливо, гідроенергетика і т. ін.).
- Розвиток ядерної енергетики. Проголошення її створення і розвитку головним державним пріоритетом.

Та обставина, що енергетичні ядерні реактори, які нині діють, використовуються і для виробництва збройових ізотопів, передусім плутонію, визначає особливий геополітичний статус ядерної енергетики. Кожна країна вибирає стратегію розвитку ядерної енергетики і приймає регулятивне законодавство залежно від рівня розвитку, забезпеченості енергетичними ресурсами і сформованою суспільною думкою. Спектр національних програм досить широкий — від заборони на розвиток ядерної енергетики до проголошення її створення головним державним пріоритетом.

Україна має потужний економічний потенціал, що включає і ядерну енергетику, структура й технічне оснащення якої успадковане від СРСР. Будучи молодою державою, Україна розв'язує складні економічні проблеми в умовах проведення докорінних економічних реформ і становлення нового громадянського суспільства. Тому правильний вибір стратегії розвитку економіки й енергетики є винятково важливою і відповідальною державною справою.

Вибір національної енергетичної стратегії відбувається у взаємозв'язку зі світовими тенденціями розв'язання енергетичних проблем. Кожна держава бере пряму або непряму участь у розвитку глобалізованої економіки й у міжнародних екологічних і енергетичних проектах. Ця участь може бути пасивною, тобто відстороненою як від активного створення нових технологій, так і від вироблення регулятивних міжнародних норм. За наявності значного економічного і науково-

# Про стратегію розвитку ядерної енергетики в Україні

технічного потенціалу Україна не може дозволити собі пасивну участь у розв'язанні енергетичних проблем, тому що цей шлях веде до економічної й енергетичної залежності, наслідки якої тим тяжчі, чим могутнішим є потенціал країни. Активний же розвиток вимагає участі країни в подоланні глобальних і локальних енергетичних та екологічних проблем.

Ми почнемо з короткого огляду проблем екології і перспектив енергетики у світі, яким було присвячено окрему публікацію [2]. Далі докладніше обговоримо перспективу розвитку ядерної енергетики в Україні.

### 3. Глобальні аспекти екології

Походження екологічних загроз є добре відомим. Усі види господарювання засновані на споживанні й використанні природних ресурсів, починаючи від повітря, води й ґрунтів і закінчуючи паливом — вугіллям, нафтою, газом. У переважній своїй більшості паливні та сировинні ресурси не відновлюються, а їх видобуток, переробка й використання спричиняють нагромадження відходів, що забруднюють довкілля. Водний баланс, склад атмосфери, структура і якість придатних для сільського господарства ґрунтів підтримуються за рахунок глобальних процесів кругообігу під дією сонячної енергії за участю зеленого покриву й, певною мірою, фауни Землі. Їх відтворення відбувається доти, доки не порушено баланс. Життєзабезпечення 6,7 мільярдів людей, що наразі населяють Землю, при досягнутому рівні й зростанню обсягів господарювання порушило екологічний баланс, який існував ще 100 років тому. Ці порушення зовсім не малі. Висвітлимо деякі з них.

Уклад господарювання, що існує у світі, є таким, що кожна держава стимулює розвиток власної економіки і піклується про державну (політичну, економічну, військову) безпеку. Економічний розвиток спирається на споживання доступних природних ресурсів. Заохочений бізнес процвітає завдяки збільшенню обсягів і прискоренню обертів засобів, тобто за рахунок збільшення обсягів споживання ресурсів.

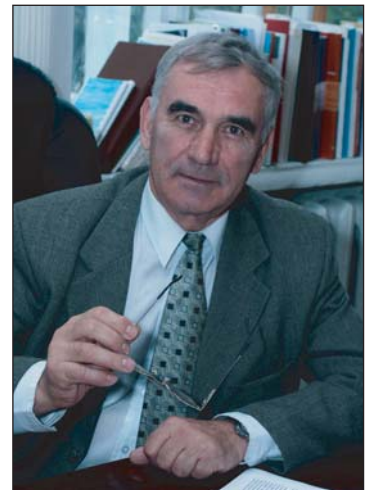
Конкурентний характер розвитку державних економік утруднює прийняття міжнародних регулятивних норм, що стримують і контролюють цей процес. Внутрішньодержавні норми екологічної безпеки, засоби екологічного контролю й відповідні правові норми не уніфіковані на міжнародному рівні. Опис усіх серйозних глобальних екологічних загроз виходить за межі цієї публікації. Тут ми викладемо лише результати аналізу однієї з них, прямо пов'язаної з енергетикою. Мова йтиме про зареєстровану в останні десятиліття істотну зміну складу атмосфери, основною причиною чого є викид в атмосферу не лише пилових часток, але й "парникового" газу — двоокису вуглецю.

Газ утворюється в результаті згоряння тих видів палива, що містять вуглець, — вугілля, нафти, газу, деревини. Теплові електростанції, наземний і повітряний транспорт, металургійна й хімічна промисловість, пристрої для обігріву приміщень є основними споживачами такого палива й постачальниками в атмосферу. Через швидке переміщення повітряних мас процес нагромадження є глобальним, тобто таким, що не локалізується в межах окремого материка, регіону або держави.

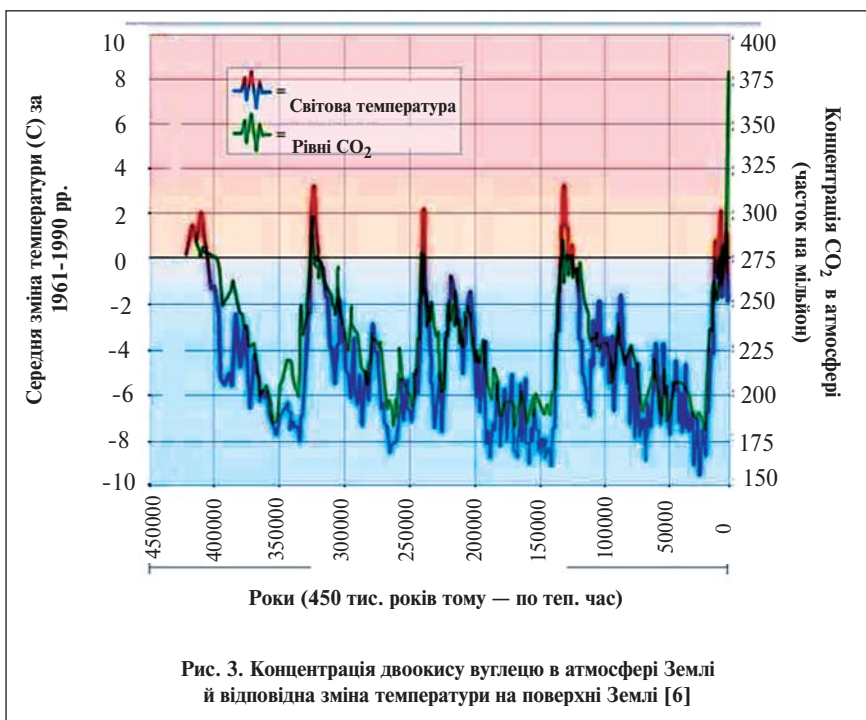
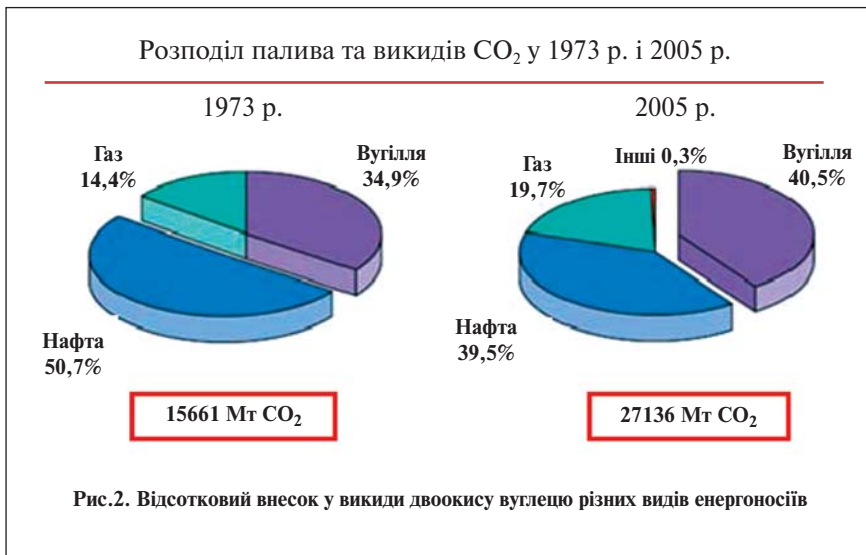
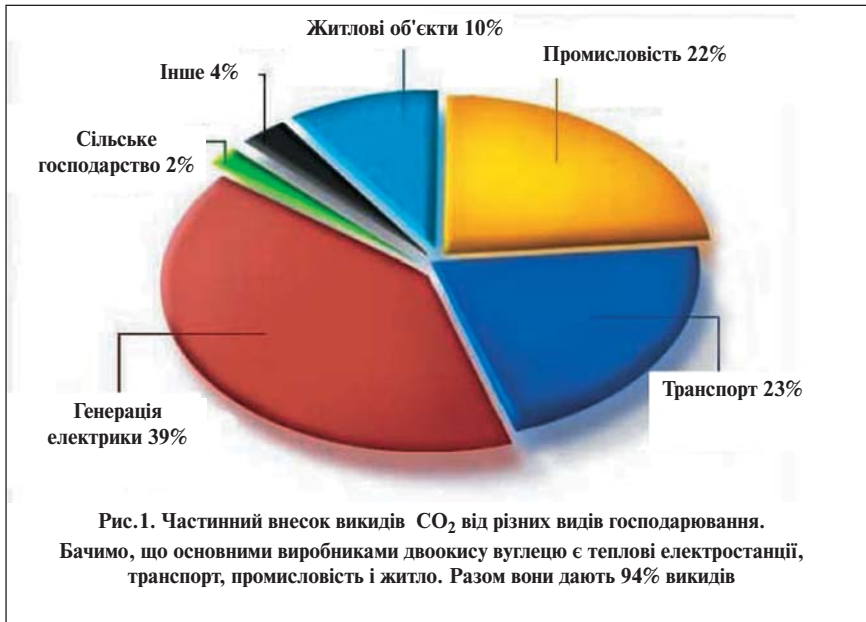
На рис. 1 [3] подано діаграму частинного внеску викидів двоокису вуглецю від різних видів господарювання. Ми бачимо, що основними виробниками двоокису вуглецю є теплові електростанції, транспорт, промисловість і житло. Разом вони дають 94% викидів. Таблиця 1 демонструє частинний внесок викидів тих держав, які є лідерами в забрудненні атмосфери двоокисом вуглецю. Для порівняння додано в цю таблицю і Україну. Часова динаміка нагромадження двоокису вуглецю в атмосфері між 1973 і 2005 роками зображена на рис. 2 [5].



**Віктор Бар'яхтар**  
доктор фіз.-мат. наук,  
академік НАН України,  
директор  
Інституту магнетизму  
НАН України,  
м. Київ



**Іван Неклюдов**  
доктор фіз.-мат. наук,  
академік НАН України,  
академік-секретар Відділення  
ядерної фізики та енергетики  
НАН України,  
директор ННЦ "Харківський  
фізико-технічний інститут",  
м. Харків



Порівняння даних за 2005 і 1973 роки показує, що за 32 роки викиди збільшилися на 44%. На рис. 3 [6] наведені дані про зміну температури й концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері. Дослідження показують, що середньорічна температура чітко відтворює коливання вмісту CO<sub>2</sub>. Це означає, що вміст CO<sub>2</sub> в атмосфері є "регулятором" теплового балансу Землі. Звернемо увагу на те, що протягом останніх 10 років вміст CO<sub>2</sub> в атмосфері досяг рівня 380 молекул на мільйон, що перевищує на 30% пікові показники за попередні 50 років.

При відсутності вироблених людьми викидів CO<sub>2</sub> зелений покрив Землі легко справляється з утилізацією цього газу, що надходить у результаті окислювання органічних залишків фауни й флори й від пожеж, які займаються при грозах або вулканічних виверженнях. У наш час не винищені поки що ліси й інші зелені покриви явно не справляються із цим завданням. Тим часом крива накопичення настільки стрімко піднімається догори, що повномасштабна парникова екологічна катастрофа може вибухнути вже в найближчі 4-5 десятиліть (рис. 4а, крива IS92а).

На рис. 4а показані розрахункові сценарії темпів викиду CO<sub>2</sub> при різних еволюційних картинах розвитку структури енергетики. При розрахунках вважали, що чисельність людей до 2050 року досягне приблизно 9 мільярдів осіб, і це буде вимагати відповідного збільшення обсягу споживаної енергії. Найвища крива, IS92а, відповідає випадку, коли структура енергетики залишиться незмінною. При цьому вміст CO<sub>2</sub> в атмосфері буде стрімко рости. Нижні криві, позначені на рис. 4а як S450-S1000, отримані в припущенні про істотне скорочення сектора теплової енергетики порівняно з наявним. Динаміка стабілізації рівня CO<sub>2</sub>, зумовлена зменшенням темпів викиду газу порівняно з поточним рівнем, показана на рис. 4б. Видно, що навіть при істотному зменшенні темпів викиду (крива S450) стабілізація вмісту CO<sub>2</sub> в атмосфері відбудеться тільки до 2050 року. Ці залежності демонструють, що зміни клімату досить інерційні, а їхнє регулювання вимагає жорсткого глобального контролю викидів упродовж десятиліть.

З діаграми (рис. 5 [8]) видно, що "вогневий" сектор світової енергетики нині становить близько 80% серед інших секторів.

Наведені на рис. 2, 4 і 5 дані показують, що для запобігання екологічній катастрофі сектор "вогневої" енер-

Таблиця 1. Емісія CO<sub>2</sub> (N × 10<sup>9</sup> метричних тонн).

Частинний і кількісний внесок викидів основних країн — забруднювачів атмосфери.  
Дані ООН стосуються 2002 року [4].  
На частку цих країн припадає близько 76% всіх викидів

Місце	Країна	CO <sub>2</sub>	Відсоток	Тонн CO <sub>2</sub> / душу
	Світ у цілому	24,1	100	3,6
	Європейський Союз	3,7	15,3	
1	США	5,8	24,3	20,1
2	КНР	3,5	14,5	2,7
3	Росія	1,4	5,9	9,9
4	Індія	1,2	5,1	1,2
5	Японія	1,2	5,0	9,4
6	Німеччина	0,80	3,3	9,8
7	Велика Британія	0,54	2,3	9,2
8	Україна	—	—	6,4

гетики необхідно помітно скоротити уже в найближчі десятиліття.

Цього результату можна досягти, по-перше, за рахунок твердої політики енергозбереження у всіх основних сферах господарювання: промисловість, транспорт, житловий сектор; по-друге, за рахунок зміни структури світової енергетики. Очевидно, що ця зміна може бути пов'язана з серйозним розширенням ядерного сектору енергетики. Ядерна енергетика не виробляє CO<sub>2</sub>. Цей сектор виробляє у наш час дещо більше ніж 6% загальної кількості енергії. Іншим сектором, з яким не пов'язані викиди CO<sub>2</sub>, є гідроенергетика. Разом ці два сектори становлять 8,5%. Ресурси гідроенергетики практично вичерпані. Тому надалі головну роль повинна грати ядерна енергетика. На шляху реалізації сценарію розвитку ядерної енергетики є кілька серйозних перешкод.

Це, перш за все, величезні розвідані запаси вугілля, ціни на вугілля й уже створена промисловість його видобутку й використання для одержання енергії. Обсяг покладів вугілля (їх може вистачити на 500 років і більше) і вартість спричиняють те, що вугілля буде використовуватись завжди. Тому створення безвідходних (такі, що істотно зменшують викиди парникових газів в атмосферу) технологій одержання енергії з вугілля сприятиме відверненню екологічної катастрофи [23].

Такою ж перешкодою є запаси й ціни на нафту й газ. Очевидно, що обсяги використання нафти і газу помітно не зменшаться, аж до їх істотного

виснаження. Серйозними перешкодами є інерційність енергетики, міркування комерційної вигоди, конкуренція національних економік і, нарешті, відсутність нових швидких реакторів на урані й промислових термоядерних реакторів.

Зазначені труднощі на шляху трансформації структури сучасної енергетики в інтересах порятунку від екологічної катастрофи вимагають величезної роботи із суспільною думкою й чималим самообмеженням буквально від усіх країн разом із вдосконаленням міжнародного регулювання.

#### 4. Проблеми сучасної ядерної енергетики

Реактори, які нині діють, працюють на урановому ядерному паливі. Реактори на повільних нейтронах (теплові ядерні реактори) спалюють <sup>235</sup>U і частково <sup>238</sup>U, після перетворення останнього під дією нейтронів у плутоній-239 (<sup>239</sup>Pu). Ефективний поділ ядер <sup>238</sup>U відбувається тільки в ре-

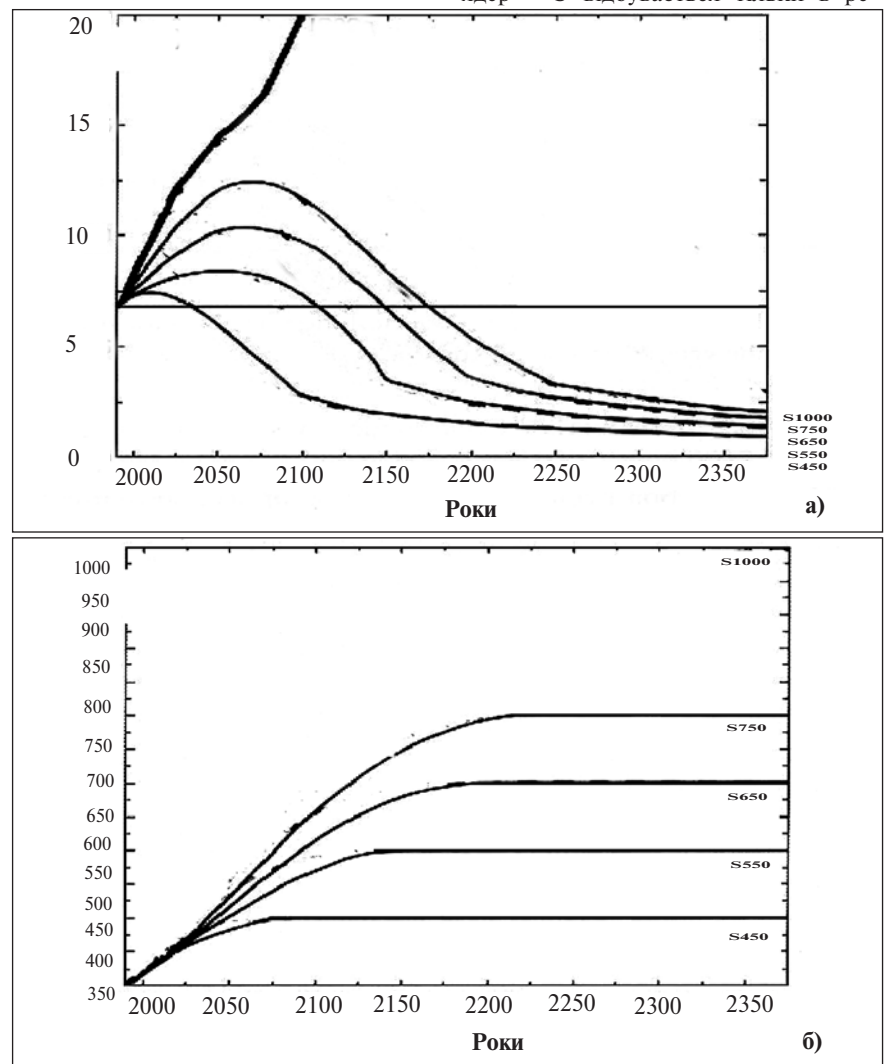


Рис. 4. Залежність від часу рівня вмісту CO<sub>2</sub> в атмосфері при різних темпах викиду цього газу в атмосферу [7]. Рівень насичення на рівні 2050 р. тим вищий, чим вищий темп викидів CO<sub>2</sub>

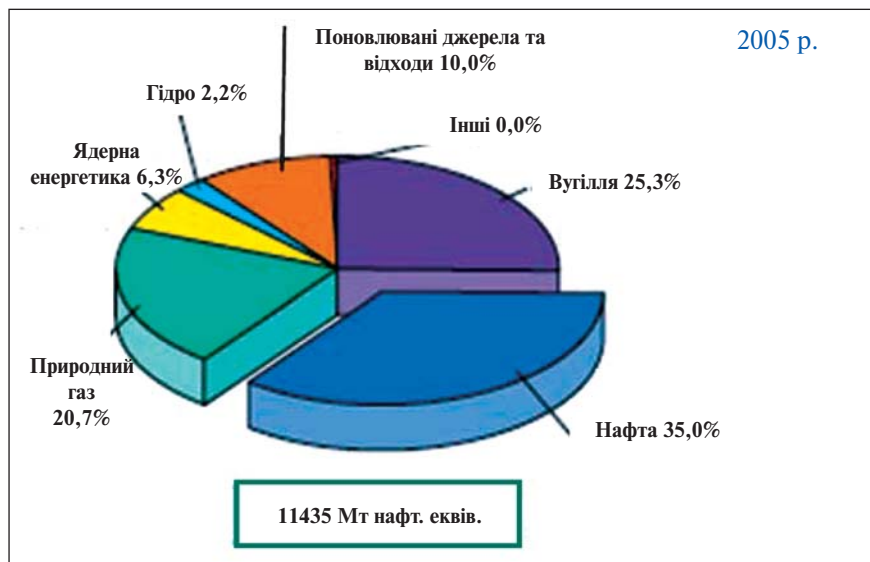


Рис. 5. У 2005 р. у світі [7] було вироблено енергії, що дорівнює 11 435 мегатонн нафтового еквівалента. На діаграмі показано внесок у загальне виробництво окремих видів енергоносіїв. Головними джерелами енергії є нафта, вугілля й газ. Їхня сумарна частка — 81%. Частка атомної енергетики — 6,3%, поновлюваних видів енергії — 10%

акторах на швидких нейтронах (їхня коротка назва — "швидкі реактори"). Швидкі реактори здатні забезпечити глибоке вигорання урану й радіотоксичних ізотопів, але технологія створення й будівництва потужних реакторів такого типу, розрахованих на тривалі строки експлуатації, досі перебувають на стадії розробки. Їхня повномасштабна експлуатація планується десь після 2030 року. Керівництво й фахівці атомної промисловості Росії мають намір виставити на продаж реактор-мільйонник до 2025 р. [9].

Світові запаси урану оцінюють у 14,8 млн. тонн. З них доступних для розробки розвіданих запасів — 4,7 млн. тонн, причому на травень 2007 року вартість становить 275 доларів за кілограм  $U_3O_8$  [3,4]. Світові потреби урану для ядерної енергетики в 2005 р. склали 67 тис. тонн. Вважається, що до 2025 року ця потреба виросте приблизно до 100 тис. тонн на рік [5]. При цьому споживання урану в розвинених країнах залишиться близьким до наявного рівня. Для ядерної енергетики, заснованої на теплових реакторах, запасів уранового палива вистачить десь на 50 років. Розвіданого у світі уранового палива для швидких реакторів ( $^{238}U$ ) вистачить на десятки сторіч.

Як ядерне паливо можна використовувати торій-232 ( $^{232}Th$ ). Запуск ланцюгової реакції на  $^{232}Th$  можливий тільки при наявності потужного нейтронного джерела, яким на початковій стадії можуть служити ізотопи, що діляться  $^{235}U$ ,  $^{233}U$  або  $^{239}Pu$ . У процесі наступних ядерних перетворень торію виробляється ізотоп  $^{233}U$ , поділ якого

надалі може підтримувати необхідний нейтронний баланс. Якщо у свіже торієве паливо спочатку додати деяку кількість  $^{235}U$  чи  $^{239}Pu$ , то ініційована цими ізотопами ланцюгова реакція надалі може підтримуватися за рахунок напрацювання в реакторі  $^{233}U$ . Час виходу реактора на самопідтримуваний (за рахунок  $^{233}U$ ) режим дорівнює приблизно 30 дням. Торієвого палива вистачило б на строк у 4-5 разів більший, ніж  $^{238}U$ .

Для запобігання екологічній катастрофі через глобальне потепління ядерна енергетика до кінця 2050 року повинна забезпечувати 23-25% споживаної енергії, тобто ядерний сектор має вирости в 3,5-4 рази за найближчі 40 років. Сьогодні у світі працює 440 ядерних реакторів на теплових нейтронах першого й другого покоління. Якби ядерні технології не зазнавали революційних змін, то до 2050 р. число таких реакторів досягло б 1,5-2 тисячі.

Незважаючи на безальтернативні переваги ядерної енергетики при розв'язанні наявних глобальних енергетичних і екологічних проблем, ядерні технології містять кілька серйозних загроз. Однією з них є розповсюдження ядерної зброї. Крім того, що нинішні теплові реактори забезпечують виробництво електроенергії, вони використовуються для напрацювання збройового плутонію, необхідного для виготовлення ядерної й термоядерної зброї. Щоб забезпечити нерозповсюдження ядерної зброї, створено систему міжнародного контролю. Досвід показує, однак, що в низці країн третього світу відбулося "несанкціоноване" виробництво ядерної зброї. Якщо протя-

гом найближчих десятиліть відбудеться потроєння числа ядерних реакторів другого й третього покоління (кілька вдосконалених конструкцій з поліпшеною надійністю), проблема нерозповсюдження ядерної зброї засобами чинних міжнародних регулятивних органів стане практично нерозв'язною, оскільки основну кількість реакторів буде побудовано в досі неядерних країнах третього світу.

Нерозповсюдження ядерної зброї — не єдина гостра проблема, що посилюється зростанням ядерної енергетики. Разом з нею необхідно підвищувати надійність експлуатації реакторів і вирішити проблему накопичення радіоактивних ізотопів-довгожителів, що утворюються в ланцюжках ядерних перетворень у реакторному паливі. У відпрацьованому ядерному паливі (ВЯП) сучасних реакторів на урані міститься значна кількість радіотоксичних ізотопів, періоди розпаду яких сягають 300 тисяч років. Очевидно, якщо ці відходи просто складати, то вони будуть становити загрозу довкіллю протягом сотень тисячоріч. Саме обслуговування (тобто контрольоване зберігання) ядерних відходів, накопичених після використання в реакторах усього урану, доступного для виробництва ядерного палива, перетвориться в довгострокову проблему для прийдешніх поколінь. Використане ядерне паливо необхідно не тільки зберігати, але й охороняти, щоб виключити його потрапляння в руки терористів і уникнути руйнування сховищ ВЯП при можливих бомбових атаках терористів.

Розгляд глобальних загроз, що виникають при простому збільшенні числа реакторів першого, другого й третього покоління показує, що необхідно розробляти та впроваджувати реактори нового покоління, що забезпечують вищу надійність та виключають нагромадження збройових ізотопів, які забезпечують багаторазове зменшення кількості радіотоксичних ізотопів-довгожителів у ВЯП і, нарешті, які працюють на  $^{238}U$  або  $^{232}Th$ . Всім цим умовам будуть задовольняти реактори наступного, четвертого покоління, розробка яких зараз триває у рамках міжнародних і національних програм.

## 5. Ядерна енергетика четвертого покоління

Ядерна енергетика четвертого покоління покликана усунути або істотно послабити три основні загрози:

— поширення технологій одержання збройових ізотопів і виробництво на їхній основі ядерної зброї;

— масштабне радіоактивне забруднення навколишнього середовища при аваріях;

— радіоактивне забруднення навколишнього середовища внаслідок ненадійного зберігання або розпилення радіоактивних відходів при терористичному бомбовому ударі.

Приклади реалізації цих загроз загальновідомі. Зокрема, Україна пережила жахливу Чорнобильську катастрофу, наслідки якої не ліквідовані і дотепер. Разом з тим, передавши Росії всі ядерні боеголовки ракет і іншу ядерну зброю, наша держава є першою, і поки що єдиною у світі, яка добровільно відмовилася від володіння ядерним арсеналом. Така ядерна політика не є типовою. Доти, доки ядерна зброя буде залишатися найвагомим інструментом геополітики і засобом стримування в протистояннях, багато неядерних держав будуть прагнути мати цю зброю.

З метою створення ядерних технологій четвертого покоління розроблено відкриті міжнародні програми Generation IV (четверте покоління) і INPRO [6,8,9]. Основними розробниками й учасниками цих програм є провідні ядерні держави. Через відкритість програм у них може брати участь будь-яка зацікавлена держава. Україна є учасником програми INPRO і разом з тим бере участь у деяких проектах, виконуваних у рамках програми Generation IV.

Основною відмінністю ядерної енергетики наступного покоління від наявної є її багаторівневість. Передбачається будівництво комплексів, що включатимуть реактори різного цільового призначення. Як найперспективніші обрано шість типів реакторів четвертого покоління. Їхній перелік і схематичне зображення подано на Рис.6 a-f, а короткі технічні характеристики наведені в таблиці 2.

За ознакою основного призначення реактори можна розділити на такі типи:

— *енергетичні реактори*, основною функцією яких є генерація електроенергії;

— *реактори-трансмутатори* для глибокого випалювання збройових ізоотопів і радіоактивних ізоотопів, які довго живуть;

— *реактори для виробництва екологічно чистого (безвуглецевого) палива* — водню — шляхом гідролізу води й для напрацювання синтетичного вуглеводного палива з вугілля.

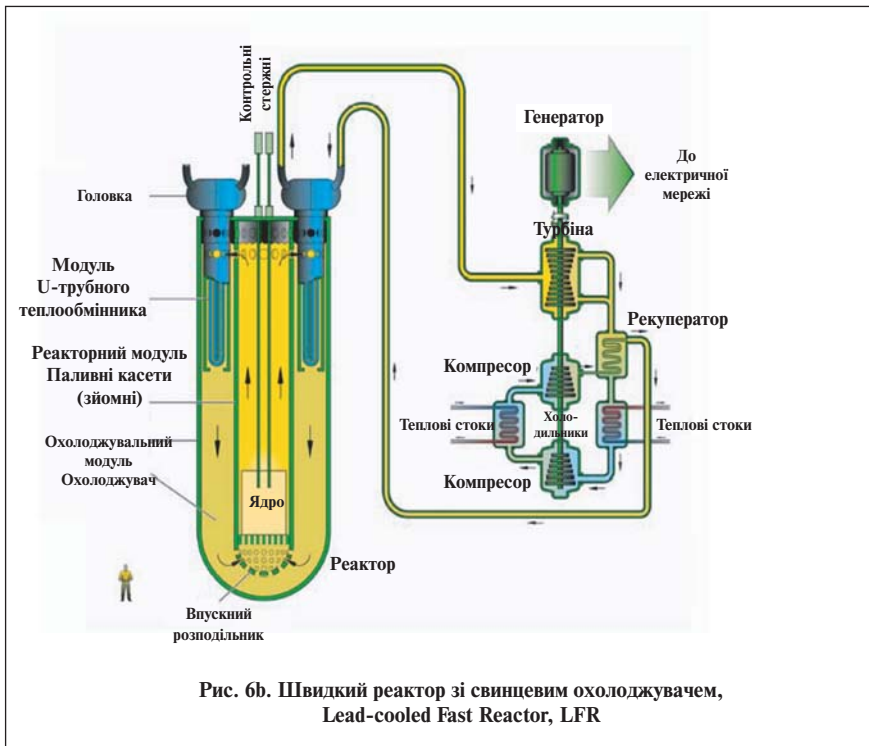
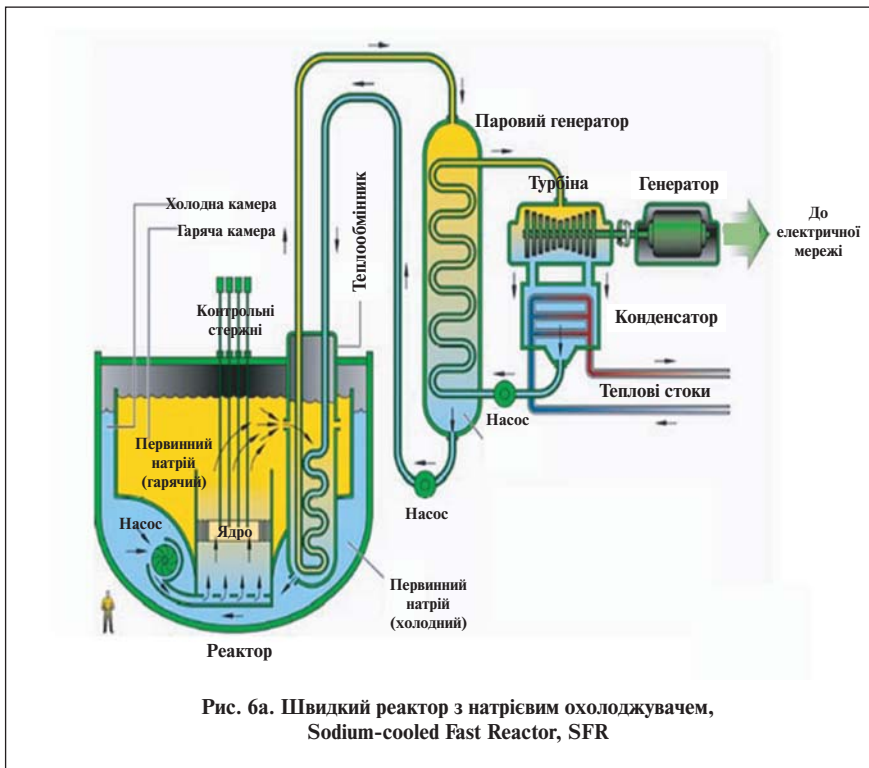
Один і той самий тип реактора може бути сконструйований і облаштований таким паливним циклом, що буде здатним поєднати різні функції (на-

приклад, виробляти електроенергію й випалювати небажані ізоотопи). Досвід показує, що специфікація такого високотехнологічного устаткування як реактори дозволить спростити технологічні рішення з їх використання.

*Коротко охарактеризуємо кожний тип реакторів, наведених у таблиці 2.*

— **Охолоджуваний гелієм швидкий реактор (GFR)**. Особливістю цього реактора є висока температура (до 1000 °C) і високий тиск (70 бар) гелію, використовуваного як теплоносії.

Температура на виході приблизно дорівнює 800 °C. Реактор придатний для генерації електрики, напрацювання водню шляхом гідролізу води й для глибокого випалювання збройових і радіотоксичних ізоотопів. Як основний конструкційний матеріал активної зони передбачено використовувати матеріали на основі карбіду кремнію. Проблематичною є радіаційна стійкість конструкційних матеріалів активної зони при дозах опромінення, що сягають 70-90 зсувів на атом (displacement per atom = dpa). Цей тип



реакторів наразі є найбільш просунутим серед реакторів-прототипів наступного покоління.

— **Охолоджуваний натрієм швидкий реактор (SFR) із замкнутим паливним циклом.** Температура Na на виході близько 800 °С. Реактор орієнтований на генерацію електрики й випалювання збройових і радіотоксичних ізотопів. Як конструкційні матеріали активної зони передбачено використовувати спеціальні сталі, що розробляються й проходять випробування в

цей час. Проблематичною є корозійна й радіаційна (до доз 200 дпа) стійкість конструкційних матеріалів.

— **Охолоджуваний розплавами свинцю і/або свинцю-вісмуту швидкий реактор, керований прискорювачем (ADS/LFR).** Реактор абсолютно безпечний стосовно переходу в закритичний режим і до перегрівів. Конструкційні матеріали повинні мати достатню корозійну і радіаційну (до доз ~100 дпа) стійкість. Реактори орієнтовані на випалювання небажаних ізотопів і генерацію електрики.

— **Дуже високотемпературний реактор на теплових нейтронах, (VHTR).** Як охолоджувач у цьому реакторі використовується гелій з температурою на виході ~1000°С при тиску 70 бар. Орієнтований на виробництво водню. Може використовуватись для синтезу вуглеводного пального. Реактор каналного типу не вимагає будівництва корпусу. Конструкційні матеріали паливних елементів на основі вуглецю й карбїду кремнію. Інтегральна доза опромінення в активній зоні порівняно невелика, 7-25 дпа. Термін будівництва такого реактора — 2 роки, а термін експлуатації — 30 років.

— **Тепловий реактор з водяним охолодженням (SCWR) при тиску ~250 бар і температурі ~550 °С.** Вода в SCWR перебуває в закритичному стані. Висока температура води забезпечує збільшення коефіцієнта корисної дії. Реактор орієнтований на виробництво електрики й випалювання ізотопів. Можливий перехід на замкнутий і торієвий паливний цикл.

— **Рідинно-сольовий гомогенний реактор (MSR) з регульованим спектром нейтронів.** Ефективний при використанні торієвого паливного циклу й при випалюванні збройових і радіотоксичних ізотопів. За розрахунками може функціонувати як енергогенеруючий реактор із потужністю ~ 1 ГВт.

Швидкі реактори ( GFR, SFR, LFR) розраховані на досягнення глибокого вигорання й, отже, ефективного використання урану-238. При освоєнні цієї технології земних запасів урану може вистачити на 5 тис. років, а при освоєнні торієвого циклу і більше. При розробці реакторів цього типу буде потрібно вдосконалення наявних ядерних технологій (еволюційний складник), а також розробка й впровадження принципово нових технологій (революційний складник), особливо ж при освоєнні паливного циклу і створенні конструкційних матеріалів.

Реактор SCWR буде ґрунтуватися на вдосконалених ядерних технологіях, розроблених при створенні родини важководних теплових реакторів типу CANDU. Революційним елементом цих технологій у четвертому поколінні стане використання в ролі охолоджувача води в закритичному стані. Створення реактора пов'язане з необхідністю розробки нових конструкційних матеріалів, що мають високу стійкість при контакті з потоком води в закритичному стані під інтенсивним опроміненням.

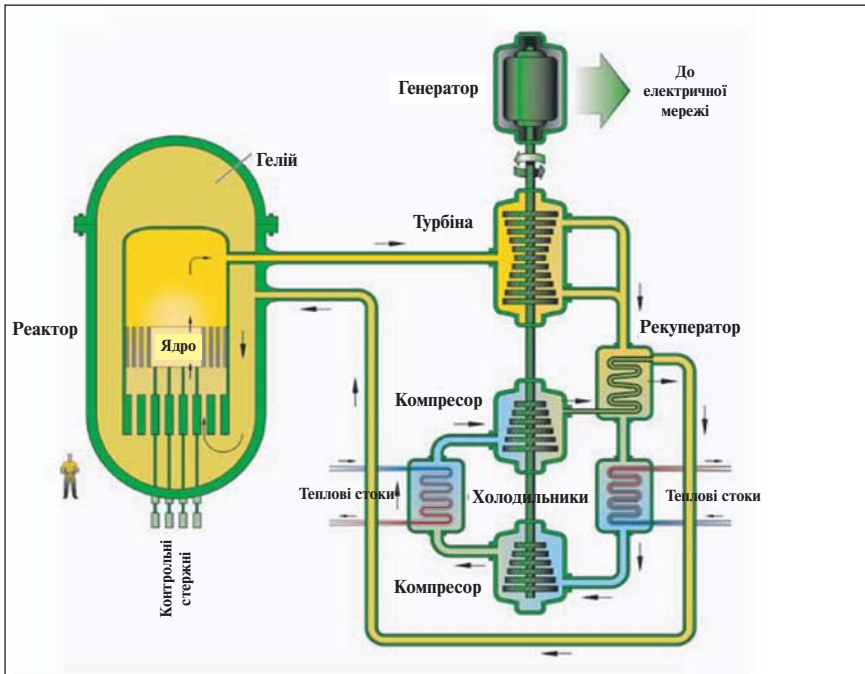


Рис. 6с. Швидкий реактор з гелієвим охолоджувачем, Gas-cooled Fast Reactor, GFR

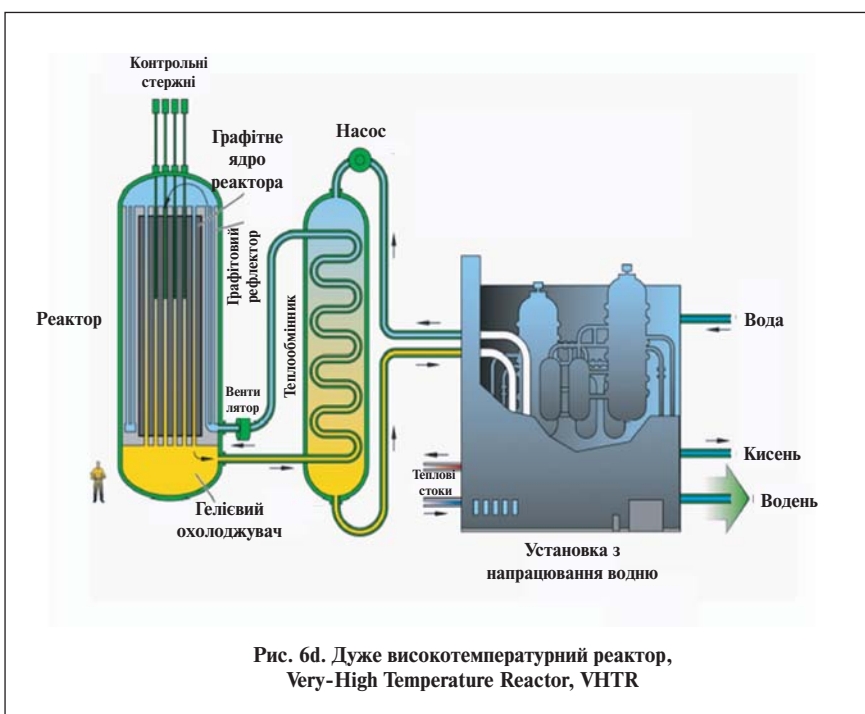


Рис. 6д. Дуже високотемпературний реактор, Very-High Temperature Reactor, VHTR

Рідинно-сольові реактори є багатообіцяючими за всіма параметрами. Це — революційна ядерна технологія, що мала деякий розвиток понад 40 років тому у вигляді дослідницького рідинно-сольового реактора, спорудженого в Ок-Ріджі. Основні труднощі полягають у створенні та випробуванні необхідних конструкційних матеріалів, а також у ретельному контролі хімічного складу паливної суміші. Перевагою є відсутність корпусу реактора, проста змінність елементів конструкції, варіабельність паливного циклу й низькі радіаційні навантаження конструкційних матеріалів. Потрібні масштабні дослідження й інженерні розробки для його створення. Основні труднощі пов'язані з розробкою і випробуваннями необхідних конструкційних матеріалів, а також із розробкою засобів ретельного контролю хімічного складу паливної суміші. Віднедавна Україна має своїх представників у Міжнародному рідинно-сольовому торієвому форумі, очолюваному знаним японським професором *К. Фурукавою*.

## 6. Стан і перспективи розвитку ядерної енергетики України

### 6.1. Основні ресурси країни

Енергетика є споживачем значних ресурсів, і її розвиток вимагає належного ресурсного забезпечення. Ресурси прийнято ділити на поновлювані й непоновлювані. Основними непоновлюваними ресурсами є природні копалини. В Україні значними є запаси вугілля й руд широкого спектру металів, у тому числі заліза, урану, торію, цирконію [10,11]. Основними поновлюваними ресурсами є народонаселення, атмосфера, джерела води, сільськогосподарські угіддя. Насправді ці ресурси поновлювані тільки за умови планового й дбайливого використання, що не руйнує механізмів поновлення.

Розглянемо стан ресурсного забезпечення ядерної енергетики.

#### 6.1.1. Паливні ресурси

Наші основні паливні ресурси — вугілля, уран, торій — цілком достатні для забезпечення енергетики на тисячоліття. Їм немає довгострокової альтернативи окрім, може освоєння керованого термоядерного синтезу (КТС). Однак, на цей час немає навіть експериментальної термоядерної установки з позитивним енергетичним балансом. Світове науково-технічне співтовариство планує одержати таку установку до 2015 року. Принаймні зрозуміло, що найближчі 50-100 років знадобляться для освоєння керованого

термоядерного синтезу (КТС) на економічно прийнятному рівні. Тому вибір стратегії розвитку енергетики нашої країни на найближчі десятиліття є орієнтованим на збільшення видобутку вугілля приблизно вдвічі й на розширення вдвічі сектору атомної енергетики [1].

*Вугільний ресурс* [16]. Вугільна промисловість України є традиційною енергетичною галуззю України. Згідно з детальними розрахунками, загальна потреба України в енергетичному і коксівному вугіллі певного марочного складу з урахуванням усіх потреб, у тому числі й експорту, не буде переви-

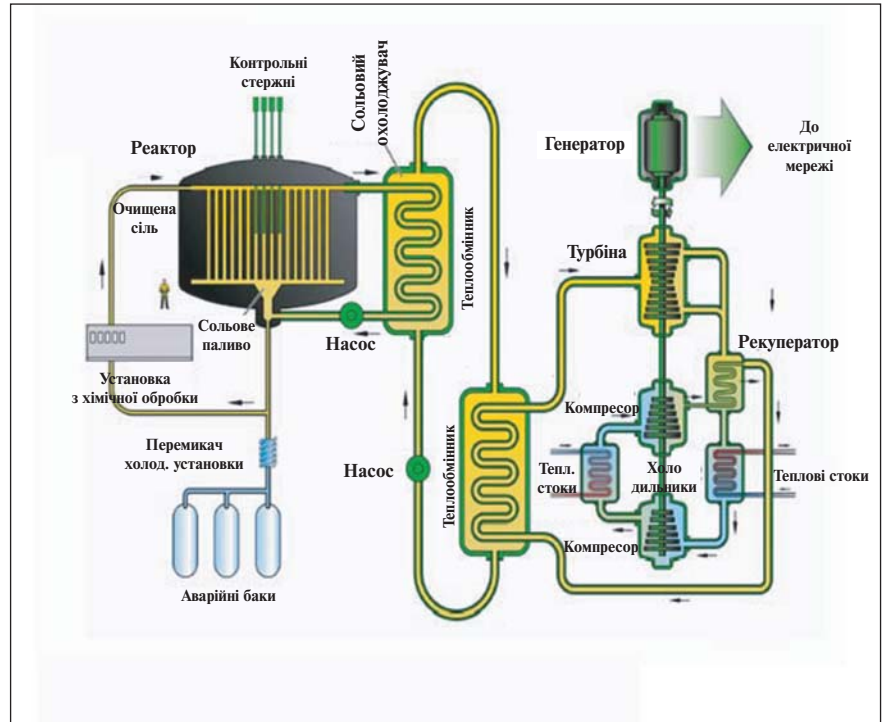


Рис. 6е. Рідинно-сольовий реактор, Molten Salt Reactor, MSR

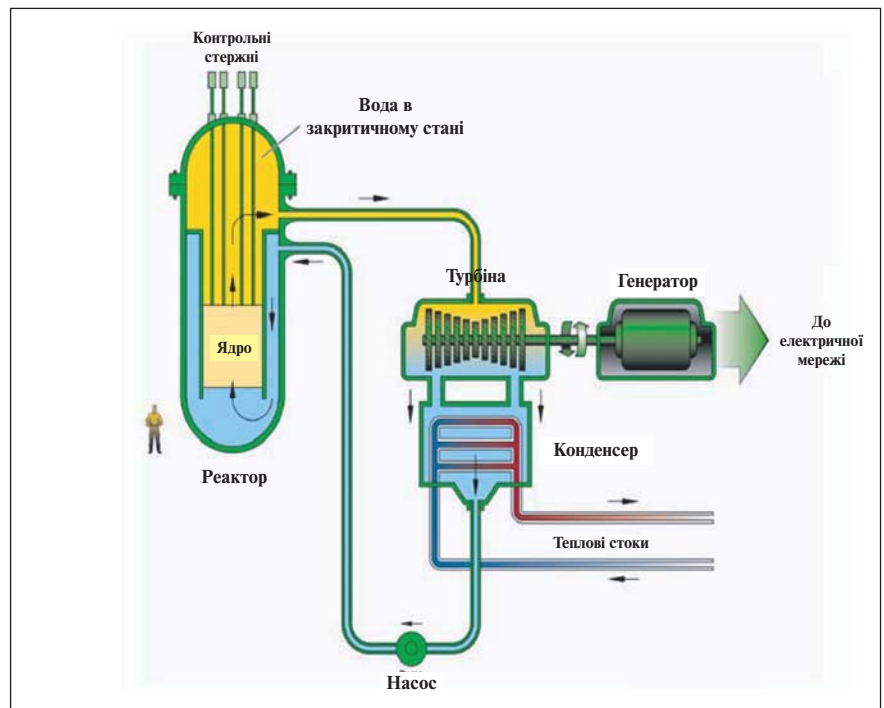


Рис. 6ф. Реактор з водою в закритичному стані, Supercritical-Water-Cooled Reactor, SCWR



щувати в далекій перспективі 140-150 млн. тонн на рік [16]. Частка вугілля в загальному обсязі органічного палива в надрах України становить 95%. Вугільна промисловість України є однією з базових галузей економіки. Її частка у ВВП України в 1999 році склала 5,1%. Вона є невід'ємною складовою інших найважливіших галузей: електроенергетики й металургії.

Запаси кам'яного вугілля Донецького й Львівсько-Волинського басейнів становлять: геологічні запаси 152 млрд. тонн, промислові 47,2 млрд. тонн, зокрема підготовлені до освоєння 10,4 млрд. тонн. Запаси шарів потужністю більше 0,8 м сягають 7,6 млрд. тонн.

Геологічні запаси бурого вугілля Дніпровського басейну становлять близько 9 млрд. тонн, промислові — 0,5 млрд. тонн.

Однак, сучасна вугільна промисловість перебуває в дуже важкому технічному стані. Устаткування на шахтах застаріло морально й фізично,

ринку збуту далеко не врегульований, великий травматизм серед шахтарів. На кожний мільйон тонн добутого вугілля припадає 2-3 смертельні травми.

Хоча запасів вугілля може вистачити на 500 і більше років, відродження вугільної промисловості вимагає мільярдних інвестицій.

**Урановий ресурс** [16, 17]. Нові ядерні технології на початку будуть доступні в основному їхнім розробникам, тобто високорозвиненим країнам. Це означає, що гряде збільшення числа теплових реакторів на урані з одноразовим паливним циклом. Оскільки основним паливним ізотопом цих реакторів є уран-235, його видобуток і темпи виснаження у світі збільшаться.

Відомо, що за обсягом достовірних (детально розвіданих) запасів урану (295,3 тис. тонн по металу) Україна займає 6-те місце у світі. Основні запаси (88%) зосереджені в родовищах, які розробляються шахтним способом. А 12% запасів підлягають розроб-

ці методом свердловинного підземного вилуговування (СПВ).

Всі розвідані в Україні родовища сьогодні є економічно доцільними для розробки. Такі запаси зможуть повністю забезпечити виробництво ядерного палива для АЕС України вітчизняним концентратом урану на термін понад 50 років.

За останні 5 років ціна урану виросла в 5 разів. Попит на цей вид палива буде швидко зростати найближчим часом як через введення в експлуатацію нових теплових реакторів, так і через виснаження урану-235. Цю обставину слід брати до уваги при довгостроковому плануванні.

**Торієвий ресурс** [16]. За оцінками, запаси торію в Україні в кілька разів більші, ніж урану, але ці запаси не розвідані належним чином і видобуток торію не ведеться. Використання цього палива стримується неосвоєнням уран-торієвого циклу, нерозвіданістю реальних покладів і відсутністю видобутку торію. Підвищення попиту на

Таблиця 2. Параметри і конструкційні матеріали реакторів четвертого покоління

	SFR	GFR	LFR	VHTR	SCWR	MSR	ТЯР	
Охолоджувач P(бар) T (°C)	Рідкий Na, декілька бар, 550-800	He, 70 бар, 480-850	Сплави свинцю, 2-3 бар, 550-800	He, 70 бар 600-1000	Вода, 250 бар, 280-550	Розплав солі, 2-3 бар, 500-720	He, 80 бар 300-480	Pb-17Li 480-700
КМ (конструкційні матеріали)	Оснащення, F/M-сталі  Оболонки F/M, ODS	Паливо, АЗ SiC/SiC- композит	Мішень, вікно, оболонки  FM, ODS-сталі	АЗ Графіт ПЕЛ, C/C SiC/SiC- композити	Оболонки та АЗ  Ni-сплави та F/M-сталі	АЗ  Графіт,  Хастеллой	Перша стінка, бланкет  FM, ODS-сталі, SiC/SiC	
Темп. КМ °C	390-700	600-1200	350-480	600- 1600	350-620	700-800	500-625	
Доза	Оболонки 200 дпа	60/90 дпа	Оболонки ~100 дпа ADS/мішень ~100 дпа	7/25 дпа			~100 дпа + 10 ppmHe/дпа + 45 ppmH/дпа	
Інші елементи реактора		Теплообмінник, турбіна Сплави Ni		Теплообмін- ник, турбіна Сплави Ni				

Скорочення в Таблиці 2:

КМ — конструкційні матеріали; АЗ — активна зона; SFR — швидкий реактор з натрієвим охолоджувачем;

GFR — швидкий реактор з гелієвим охолоджувачем; LFR — швидкий реактор зі свинцевим або свинець-вісмутним охолоджувачем;

VHTR — дуже високотемпературний реактор на теплових нейтронах; SCWR — охолоджуваний водою тепловий реактор, вода в закритичному стані; MSR — рідинно-сольовий реактор з охолоджувачем і/або паливним бланкетом у вигляді розплавленої (фторидної) солі; ТЯР — термоядерний реактор; F/M — феритомартенситні сталі; Si/C — композити на основі карбиду кремнію;

C/C — вуглець-вуглецеві композити; ODS — дисперсно зміцнені сталі; ADS — керовані прискорювачем підкритичні системи;

дпа — одиниця дози радіаційних ушкоджень — число зсувів на атом.

цей вид палива варто очікувати, коли технологія торієвого циклу буде освоєна й виявиться конкурентноспроможною по відношенню до уранових циклів у швидких реакторах. У випадку освоєння торієвого циклу в реакторах типу CANDU і рідинно-сольових реакторах на його використання будуть орієнтовані передусім країни, що володіють запасами торію, серед них і Україна. На цей час серйозні зусилля з освоєння торієвого циклу докладають в Індії, що володіє багатими запасами торію, і в менших масштабах — у Канаді.

**Промисловий ресурс ядерної енергетики.** Наразі в Україні промислові потужності з видобутку урану, виплавки цирконію і виготовлення цирконієвих труб, проектування та виробництва елементів реакторобудування та управління реакторами занепали. Основні зусилля НАЕК "Енергоатом" зосереджені на забезпеченні експлуатації наявних реакторів.

**Водні ресурси** [18, 19]. Значні обсяги прісної води в нашій країні забезпечуються стоками великих, середніх і малих рік. Сумарний формований в Україні стік рік становить у середньому 52,4 км<sup>3</sup>. З урахуванням води, принесеної з інших країн (Білорусь, Росія та ін.) ця величина дорівнює 87 км<sup>3</sup>. В "середній" рік внесок від головних рік такий: Дніпро — 43,5 км<sup>3</sup>; Дністер — 8,6 км<sup>3</sup>; Тиса — 5,4 км<sup>3</sup>; Сіверський Донець — 3,4 км<sup>3</sup>; Прут — 2,1 км<sup>3</sup>; Південний Буг — 2,3 км<sup>3</sup>. Стік Дунаю приблизно в 4 рази більше стоку Дніпра.

Дуже важливим водним ресурсом є підземні води, на частку яких припадає близько 40% водних ресурсів України. Вони мають велике значення для постачання населенню питної води. Найбільшим у Європі є Дніпровсько-Донецький артезіанський басейн. На його частку припадає 50% експлуатаційних ресурсів підземних вод. На частку Волинсько-Подільського артезіанського басейну припадає 23%, а на частку Причорноморського артезіанського басейну — 10% експлуатаційних ресурсів підземних вод. Потужність розвіданих експлуатаційних підземних запасів води в нашій країні становить 5,5 тис. км<sup>3</sup> на рік. Прогнозовані експлуатаційні запаси за потужністю становлять близько 61,7 млн. м<sup>3</sup>/доба. Нагадаємо, що споживання води з підземних резервуарів на цей час становить 9—10 млн. м<sup>3</sup>/доба. У таблиці 3 подані обсяги витрат води з різних джерел в Україні за останні 18 років.

В 2006 році в промисловості було витрачено 4,5 км<sup>3</sup> води, у сільському

господарстві — 2,4 км<sup>3</sup> і в житлово-комунальному господарстві — 2,3 км<sup>3</sup>. Як бачимо, водні ресурси перевищують потреби країни в прісній воді навіть при тому, що на одиницю валового національного продукту в нас витрачається води в три-п'ять разів більше, ніж в інших індустріальних країнах. Енергетика й, особливо, атомна енергетика вимагають витрат великої кількості води. З цієї причини АЕС будують або поблизу водоймищ, або поблизу великих рік. При будівництві АЕС необхідно виважено планувати споживання водних ресурсів.

Особливістю технічного й господарського використання водних ресурсів є їхнє значне забруднення, що вимагає спеціального очищення. Екологічно значущою є проблема "брудних" вод. Обсяг забруднених відпрацьованих вод досить великий. На прикладі витрати води в 2006 році ми бачимо, що близько 7 км<sup>3</sup> витрачено в промисловості й житлово-комунальному господарстві. Практично весь цей обсяг — забруднена вода, що скидається в ріки. Найбільш забрудненою рікою України є Сіверський Донець, найбільша кількість забруднених промислових вод "викидається" у Донецько-Дніпропетровському промисловому регіоні [1].

Водоочищення — це велика, складна й, разом з тим, невідкладна проблема, оскільки мова йде про чистоту середовища перебування й водокористування всього населення. Для розв'язання проблеми водоочищення потрібні значні капіталовкладення й належний енергетичний супровід.

Головним недоліком наших водних ресурсів є їхній нерівномірний розподіл. Північна частина країни має досить добрі запаси води, серед іншого, й для постачання київському мегаполісу. Водночас, південь країни має вкрай обмежені водні ресурси. Проблема води є гострою в Криму, Одеській, Миколаївській, Херсонській, Запорізькій, Донецькій, Луганській та інших південних областях. У Львівській області є достатні запаси води, однак транспортування води у Львів не налагоджено. Проблеми з водою в Луганській і Донецькій областях значно загострилися у зв'язку із закриттям великої кількості шахт і сильним забрудненням підземних вод через підтоплення. Перекидання додаткової води в ці регіони досить дорого коштує. При поліпшенні технологій водокористування розвиток атомної енергетики дозволить здійснювати масштабне опріснення морської води для півдня України й забезпечити очищення забруднених вод у промисловості.

**Атмосфера, обсяги викидів** [19]. Обсяг викидів парникових газів (ПГ) за останні 18 років безупинно знижувався. Цей процес характеризується даними, наведеними в Таблиці 4.

Ми бачимо, що за 15 років (1990-2005) викиди ПГ скоротилися на 55%, що зумовлено зменшенням обсягів виробництва. Найбільше викидів ПГ дає енергетика через спалювання. Частка енергетики за період 1990-2005 років у виробництві ПГ становила від 74 до 80 відсотків. Дані з виробництва парникових газів у нашій країні відрізняються в бік збільшення від даних ООН. Ця відмінність пов'язана з тим, що дослідження, проведені в нашій країні, є точнішими. Порівняння цих даних зі світовими (таблиця 1) показує, що на цей час кількість викидів двоокису вуглецю в нашій країні у два рази менша, ніж у США й менша, ніж в інших індустріальних країнах. Разом з тим, при необхідності світового скорочення викиду до рівня 1 тонна/рік на людину до 2050 року необхідно буде вживати спеціальних заходів. Розширення сектору атомної енергетики при цьому буде основним засобом.

Привернімо увагу до важливої проблеми **якості повітря** в Україні та його відповідності санітарним нормам. Спостереження показують, що через промислові викиди якість повітря недостатня в Донецько-Дніпропетровському індустріальному регіоні. У мегаполісах (Київ, Харків, Донецьк, Львів) якість повітря дуже знижують вихлопні гази автомобілів. Розв'язання регіональних проблем очищення повітря є не менш невідкладним, ніж участь у розв'язанні глобальної екологічної проблеми.

### 6.1.3. Науково-технологічний потенціал

Створення структурованої ядерної енергетики вимагає потужного науково-технологічного супроводу, орієнтованого на створення й розвиток високотехнологій для потреб енергетики. Основний науково-технологічний потенціал України на цей час зосереджено у науково-дослідних інститутах і виробничих комплексах НАН України. Організацію та координацію досліджень із питань розвитку ядерної фізики та енергетики в академічних установах покладено на Відділення ядерної фізики та енергетики (ВЯФЕ) НАН України, яке створено в 2004 році. До його складу увійшли 6 наукових установ: Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут" (ННЦ ХФТІ) НАН України, Інститут ядерних досліджень (ІЯД) НАН України, Інститут прикладної

фізики (ІПФ) НАН України, Інститут геохімії навколишнього середовища (ІГНС) НАН та МНС України, Інститут електрофізики й радіаційних технологій (ІЕРТ) НАН України, Навчально-науковий центр "Фізико-хімічне матеріалознавство" Київського національного університету ім. Т. Шевченка та НАН України (ННЦ ФХМ КНУ ім. Т. Шевченка та НАН України).

Головними завданнями ВЯФЕ є організація та координація робіт із забезпечення надійного й безпечного функціонування ядерної енергетики України; подальший розвиток фундаментальних і прикладних досліджень з перспективних напрямів ядерної фізики, фізики плазми та прискорювачів, радіаційного матеріалознавства, керованого термоядерного синтезу, створення ядерно-фізичних установок та обладнання нового покоління; поглиблення співробітництва установ відділення із зарубіжними установами відповідного профілю, передусім з інститутами Російської академії наук та галузевими організаціями Російської Федерації. ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут" має науково-технічні розробки в царині фізики плазми й керованого термоядерного синтезу, прискорювачів усіх типів, радіаційного матеріалознавства, у створенні ядерно-фізичних установок та обладнання нового покоління світового рівня.

Понад 20 наукових установ НАН України беруть участь у розв'язанні проблем ядерної фізики та розвитку атомної енергетики. Розвиваються фундаментальні основи створення елементів ядерно-паливного циклу в Україні; екологічно безпечної атомної енергетики наступного покоління; діагностики та модернізації діючих енергоблоків АЕС; неруйнівного контролю та ремонту обладнання реакторних установок; матеріалознавчого забезпечення експлуатації АЕС; підвищення ефективності використання ядерного палива; виробництва ядерного палива; подовження терміну експлуатації АЕС; зняття енергоблоків АЕС з експлуатації; захист навколишнього середовища від впливу АЕС; поводження з радіоактивними відходами та відпрацьованим ядерним паливом, підготовки науково-технічного персоналу для обслуговування ядерної енергетики тощо.

В 2004 р. постановою Кабінету Міністрів України затверджено Державну програму фундаментальних і прикладних досліджень з проблем використання ядерних матеріалів, ядерних і радіаційних технологій у

сфері розвитку галузей економіки на 2004-2010 рр., розроблену фахівцями Відділення ядерної фізики та енергетики НАН України. Програма передбачає проведення досліджень процесів у реакторах, експертизи рівня їх безпеки й надійності, дослідно-конструкторських робіт з удосконалення реакторів та їх стендових випробувань, вивчення проблем ядерного паливного циклу, зокрема поводження з радіоактивними відходами, здійснення наукового й технічного супроводження роботи АЕС України.

До виконання Програми забезпечення розвитку ядерної енергетики, Комплексної програми модернізації та підвищення безпеки енергоблоків атомних електростанцій, Комплексної програми робіт із подовження терміну експлуатації діючих енергоблоків атомних станцій, Комплексної програми створення ядерно-паливного циклу України залучено широке коло фахівців Міністерства палива та енергетики України, Держкомітету ядерного регулювання України, ДП НАЕК "Енергоатом", НАН України, інших міністерств та відомств. Наукові установи НАН України брали участь у розробці Концепції Загальнодержавної цільової екологічної програми поводження з радіоактивними відходами.

На виконання рішення Ради національної безпеки і оборони України від 1 лютого 2008 року "Про безпеку ядерної енергетики держави" НАН України має забезпечити створення системи науково-технічної, зокрема проектно-конструкторської підтримки ядерно-енергетичного комплексу, визначення провідних установ відповідно до головних напрямів робіт, впровадження системи критеріїв та методів оцінки

рівня культури безпеки при використанні ядерної енергії.

Для розв'язання проблеми підготовки кадрів для ядерної енергетики накопичено великий позитивний досвід у Харкові, Києві, Одесі та Севастополі. Установи НАН України та МОН України створюють спільні кафедри та філії кафедр, які здійснюють підготовку спеціалістів магістерського рівня відповідного спрямування. Ця практика має бути істотно розширеною для забезпечення фахівцями надійного функціонування та розвитку ядерно-енергетичного комплексу України.

#### 6.1.4. Демографія і ядерна енергетика

При прогнозуванні енергетичних перспектив приріст населення у світі звичайно розглядається тільки з погляду збільшення числа споживачів. Демографічний фактор варто розглядати й з іншої позиції. Необхідно врахувати, що працездатне населення є основною продуктивною силою. Обсяг, науково-технічний рівень і темпи розвитку економіки в цілому, й атомної енергетики зокрема, визначаються рівнем освіченості та професійної підготовки працівників.

За приблизними підрахунками, число працівників, зайнятих в атомній енергетиці всього світу, на цей час не перевершує декілька мільйонів чоловік. Це число в сотні разів менше, ніж кількість безробітних. Здавалося б, проблема забезпечення атомної енергетики кадрами не повинна викликати побоювань. Насправді, це не так через специфіку цієї галузі. У межах однієї держави з порівняно швидкою зміною структури економіки або прискореним ростом одного з її секторів (як це

Таблиця 3. Обсяги витрат води з різних джерел в Україні за останні 18 років

Рік	1990	1995	2000	2005
Забір води, км <sup>3</sup>	36	26	18	15
Ріки, км <sup>3</sup>	30	21	14	12
Підземні джерела, км <sup>3</sup>	5	4	3	2
Море, км <sup>3</sup>	1	1	1	1
Використано води, км <sup>3</sup>	30	20	13	10

планується у випадку атомної енергетики України [1]) демографічний фактор може відігравати важливу роль. Якщо на ринку праці відчувається нестача фахівців потрібного профілю й кваліфікації, а час їхньої підготовки порівняно великий, то проблема кадрів стає непростішою. Чим вища кваліфікація працівника, тим більше часу й витрат потрібно на його підготовку.

Ядерні технології належать до розряду наукомістких. Питома вага працівників вищої кваліфікації, зайнятих у розробці й впровадженні цих технологій, досить велика. Слід взяти до уваги, що підготовка фахівця для ядерної енергетики вимагає набагато більше часу й витрат, ніж підготовка фахівця того самого профілю для інших галузей. Для підготовки кадрів вищої кваліфікації, крім вищих навчальних закладів, необхідно залучати науково-дослідні й проектні установи, ділянки виробництва для спеціальної підготовки. При підготовці інженерів, крім спеціального технічного утворення необхідний порівняно тривалий тренінг. Цього вимагає не лише робота зі складною технікою й апаратурою, але й підвищені вимоги безпеки. До того ж, якщо в країні не забезпечується достойне працевлаштування, число охочих освіти потрібні професії зменшується, а наявні фахівці схильні до еміграції чи зміни фаху.

Середній ланці фахівців також необхідна ґрунтовна фахова освіта. Тому перекваліфікація працівників середньої ланки, що мають подібну, але орієнтовану на інші галузі, спеціальність, також вимагає часу, витрат і наявності центрів підготовки.

При орієнтуванні енергетики країни на розвиток ядерного сектору, необхідними є планування й організація підготовки кваліфікованих кадрів для

цієї галузі. Демографічний спад вимагає розробки спеціальних програм підготовки кадрів вищої й середньої кваліфікації. Крім вузівської або середньої технічної освіти необхідна також організація центрів спеціальної підготовки й перепідготовки кадрів. При відсутності можливості підготувати працівників деякого профілю в нашій країні варто передбачити використання закордонних технологічних і спеціалізованих центрів.

Щоб оцінити демографічну обстановку й перспективу забезпечення атомної енергетики кадрами в найближчі десятиліття, звернемося до демографічного прогнозу. Його результати подані на рис. 7 [21]. Як бачимо, за глибоким провалом на початку 1990-х років очікується тривалий спад чисельності населення України на період планованого розвитку й зміни структури ядерної енергетики. Цей спад неминуче позначиться на розвитку економіки країни.

Формально еволюція чисельності населення визначається тими самими законами, що й розмноження нейтронів у реакторі. Для стабільного росту економіки й соціального рівня необхідно, щоб коефіцієнт відтворення чисельності трохи перевищував одиницю. В іншому разі необхідні зміни демографічної політики, структури економіки й системи освіти країни. Саме до розв'язання цих завдань і слід приступати сьогодні. Уряд робить перші кроки по заохоченню підвищення народжуваності. Очікувано й глибші системні нововведення, що зачіпають освітню й соціальну сферу. Оскільки кожному людині цікавлять перспективи розвитку країни і власної долі, необхідно забезпечити інформованість про них усіх вікових категорій населення. Це сприятиме формуванню довгострокової мотивації людей і, з

іншого боку, позначиться на мірі відповідальності політичних структур перед народом. **Зміцнення й розвиток сектору атомної енергетики може призвести до підйому економіки й зупинити спад чисельності населення.**

## 6.2. Ядерна енергетика України в перехідний період

Розпочнемо з загальної інформації [1].

*Довідка:*

— В атомній енергетиці України задіяно 15 теплових легководних реакторів 2-го покоління, типу ВВЕР, які виробляють половину електроенергії країни. Розраховуємо, що роботу восьми реакторів, плановий термін експлуатації яких збігає в цьому десятиріччі, буде продовжено до 2030 р. Шість з наявних реакторів до того часу мають бути виведеними з експлуатації.

— В Україні багаті поклади урану, цирконію, гафнію, торію, заліза — основних реакторних матеріалів. Власного урану-235 вистачить десь на 100 років (?).

— Не виробляємо власного палива та важливих елементів реакторних конструкцій (наприклад, корпусів). Не розв'язано істотні проблеми поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП) В плани уряду входить побудова заводу для виготовлення ядерного палива найближчим часом.

— Зараз видобуток власного урану лише на 30% може забезпечити поточні потреби в ядерному паливі, решту доводиться закуповувати. Заплановано розширити видобуток урану.

— Технологічний супровід, постачання палива та будівництво нових блоків для нашої атомної енергетики здійснюється Росією.

— Середній час життя ядерного реактора становить 50-60 років. Термін розробки та впровадження нових ядерних технологій становить десятки років.

Досягнути подвоєння сумарної потужності атомних станцій України до 2030 р. поки що планується за рахунок будівництва нових і подовження терміну експлуатації деяких з наявних станцій [1]. При цьому заплановано будувати ВВЕР того ж (можливо, трохи поліпшеного) типу, що і нині діючі. Цей стратегічний план поки що є лише задекларованими намірами, які не підкріплені реальним довготерміновим плануванням та фінансово-економічним забезпеченням. Існують також істотні недоліки поточного організаційного забезпечення ядерної енергетики й атомної промисловості. Істотним недоліком прийнятої Енергетичної стратегії є те, що в ній не взято до уваги революційні зміни

Таблиця 4. Сумарні викиди парникових газів (ПГ) млн. тонн на рік, виражені в еквіваленті діоксиду вуглецю

Газ	1990	1995	2000	2005
CO <sub>2</sub>	720	390	300	320
Всіх ПГ	925	520	400	420
ПГ за рахунок спалювання	600	—	—	230
Виробництво ПГ тонн/людина	18	11	8	9

ядерних технологій у світі, що відбудуться до 2030 року.

Передбачено створення власного уранового паливного циклу і збільшення видобутку урану, що дозволить розв'язати проблему ядерного палива в Україні. Орієнтація на використання безперспективних реакторів покоління, що відходить, не обіцяє привабливого майбутнього ні ядерній енергетиці, ні економіці України. Теплові реактори на урані, введені в дію до 2030 р., перебуватимуть в експлуатації приблизно до 2090 р. Очевидно, вони стануть економічно програтими порівняно з реакторами наступних поколінь. До того ж, десь на цей час відбудеться виснаження світових запасів  $^{235}\text{U}$ , так що недбайливе використання цього ізотопу у ВВЕР стане невиправданою розкішшю, навіть якщо запасів  $^{235}\text{U}$  може вистачити для внутрішнього користування в Україні до кінця сторіччя.

На тлі подорожчання і виснаження експортів нафти і газу, занепаду вугільної промисловості і посилення локальних екологічних загроз ядерна енергетика стає пріоритетним сектором енергетики України. При порівняно слабкій атомній промисловості, відсутності сучасних і перспективних технологій поводження з відпрацьованим ядерним паливом, енергетичній надвитратності економіки, напруженому стані ресурсного забезпечення й екології країни, тактика чекання "кращих часів" і перекладання рішення цих проблем ядерної енергетики на наступні покоління невиправдана.

Перерахуємо ті зміни, які вважаємо за необхідне внести в Стратегію розвитку ядерної енергетики [1]. Насамперед, необхідно диверсифікувати ядерні технології в Україні, надаючи перевагу тим із них, що допускають еволюційний перехід до технологій четвертого покоління, які розглянуто у Розділі 5. Це дасть можливість до 2030 р. закласти основи розвитку дворівневої ядерної енергетики в Україні, коли енергетичні реактори працюють синергічно з реакторами-трансмутаторами, що забезпечують випалювання небажаних ізотопів і "допалювання" відпрацьованого палива з ВВЕР. Диверсифікація ядерних технологій є також необхідною умовою налагодження ефективної міжнародної співпраці з розвитку нової ядерної енергетики.

Реальним видається освоєння за короткий термін технологій CANDU покоління III+, розвиток яких дозволяє ошадливо розпорядитися наявними запасами  $^{235}\text{U}$  і, крім того, згодом перейти до реакторів 4-го покоління з замкнутим паливним циклом

внаслідок еволюційного розвитку технологій. Крім усього, реактори цього типу допускають освоєння торієвого паливного циклу, випалювання плутонію і радіотоксичних ізотопів із великим періодом розпаду.

*Основні переваги реакторів CANDU покоління III+ для України.*

— Забезпечують диверсифікацію ядерних технологій, створення дворівневої структури ядерної енергетики та еволюційний розвиток технологій 4-го покоління. Можливим є використання як природного, так і слабо збагаченого урану як палива (!).

— Є реакторами каналного типу і не потребують виготовлення найкоштовнішого і найтяжчого у виготовленні елементу реактора — масивного сталевго корпусу.

— Перевантаження паливних касет відбувається без зупинки реактора; ефективність використання палива — понад 90%. Реактор ACR III+ має негативний тепловий коефіцієнт та високу надійність. Здійснюється цифровий поточний контроль стану та дії реактора.

— Можливе здійснення паливних циклів з "допалюванням" ВЯП легководних реакторів ВВЕР та значним "випалюванням" радіотоксичних ізотопів. Відкривається можливість впровадження торієвого паливного циклу.

— Канадські постачальники заохочують широке використання місцевих промислових та науково-технічних потужностей, що сприяє ефективній розбудові місцевої ядерної енергетики.

— Наразі в Росії розглядається можливість розробки і побудови нового

легководного реактора СуперВВР, охолоджуваного водою в закритичному стані. Отже, існує перспектива співпраці за цією технологією іще з одним важливим партнером.

*Основні перешкоди для впровадження та повномасштабного використання реакторів CANDU.*

— Ці технології для України є новими і для їх використання поки що не маємо досвіду.

— Технологія "допалювання" ВЯП легководних реакторів та "випалювання" актинідів має істотно вдосконалюватися, щоб бути впровадженою.

— Для впровадження оптимального торієвого паливного циклу необхідні подальші масштабні дослідження.

— Для розробки реактора 4-го покоління SCWR необхідно створення і випробування нових конструкційних матеріалів та розв'язок низки технічних проблем.

Ці перешкоди не є критичними і долаються при довготерміновому партнерстві з розробниками і постачальниками технологій. Реактори типу ВТГР є перспективними для напрацювання водню як екологічно чистого пального, для виробництва вуглеводного палива на основі вуглецю, для опріснення й очищення води тощо. В ННЦ ХФТІ закладено технологічну основу виробництва високоякісних кулястих паливних елементів для реакторів цього типу. Для оцінки перспективи використання таких реакторів в Україні потрібне подальше їх вивчення та співпраця з фахівцями ПАР у цій царині. Технології РСР можуть мати гнучкі паливні цикли. Ці реактори є вельми перспективними як для виробництва електроенергії, так і для

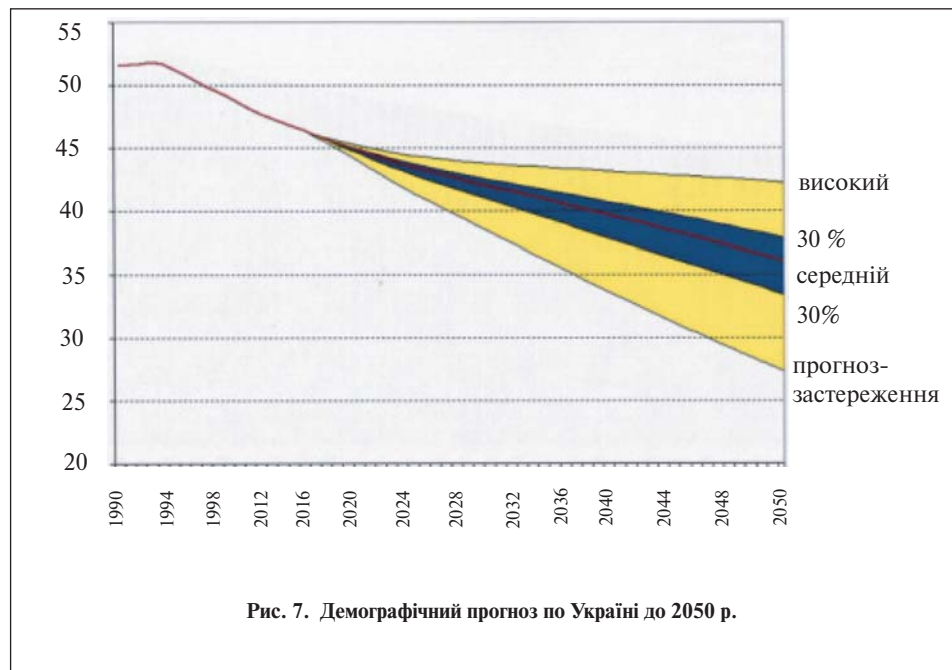


Рис. 7. Демографічний прогноз по Україні до 2050 р.

глибокого випалювання небажаних ізотопів. ННЦ ХФТІ провів ґрунтовні розробки та дослідження перспективних конструкційних матеріалів для РСР. В цілому ж розробка технологій РСР у світі перебуває на початковій стадії і може стати конкурентоздатною в подальшій перспективі.

Поглиблене вивчення та участь у розробках перерахованих технологій та створення умов їх залучення в Україну є важливим завданням як для НАН України, так і для урядових та промислових інституцій. Для здійснення ефективного керівництва і забезпечення розбудови ядерної енергетики в Україні слід створити Комітет ядерної енергетики й атомної промисловості (назва умовна), який визначатиме довготермінове планування в цій царині та буде відповідальним за виконання програм. Слід передбачити, щоб Комітет уникав кардинальних змін при перебудовах інших владних структур. Освоєння і використання реакторів типу CANDU не є панацеєю, оскільки економічно доцільним може вже найближчим часом виявитися освоєння реакторів, що забезпечують ефективне виробництво синтетичного вуглеводневого палива або очищення й опріснення води. Реак-

тором такого типу може стати VHTR.

Віднедавна знову поживався інтерес до рідинно-сольових реакторів [24], що працюють на торієвому паливі та, крім того, дозволяють здійснювати трансмутацію небажаних ізотопів. Інститути НАН України освоїли методологію імітаційних опромінювальних експериментів для випробування і створення матеріалів для рідинно-сольових реакторів [25, 26]. Участь у міжнародній програмі дослідження і створення матеріалів для реакторів цього типу на початковій стадії і наступна участь у створенні прототипу такого реактора забезпечить Україні рівноправне використання цієї технології на час її впровадження у світову атомну енергетику.

Міжнародне співробітництво стало основою в справі розробки і впровадження нових ядерних технологій для всіх країн світу, незалежно від економічного потенціалу. Для нашої країни це відкриває можливість найефективніше використовувати і розвивати як науково-технологічний, так і промисловий потенціал. Поглиблене вивчення та участь у розробках нових технологій та створення умов їх залучення в Україну є важливим завдан-

ням як для урядових та промислових інституцій, так і для НАН України.

Найближчі важливі завдання НАН України в царині наукового супроводу ядерної енергетики.

— Створення в ННЦ ХФТІ потужного імітаційно-опромінювального центру для тестування перспективних реакторних матеріалів. Кооперація з Росією, Канадою США в цій царині. В розробках цього напрямку можуть брати участь понад 20 установ НАН України.

— Побудова нового дослідницького реактора, замість наявного в Інституті ядерних досліджень реактора, термін придатності якого минає, що дасть змогу організувати міжнародний центр з підготовки операторів та інженерів для ядерних реакторів.

— Розробка перспективних паливних циклів: "допалювання" ВЯП від ВВЕР; "випалювання" шкідливих ізотопів; створення торієвого циклу в рамках міжнародної кооперації.

— Підготовка кадрів для атомної енергетики, що наразі перебуває у незадовільному стані, має бути організована спільними зусиллями МОН України, НАН України та Мінпаливноенерго, що сьогодні керує ядерною енергетикою нашої держави.

#### Література

1. Розпорядження КМУ "Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року", № 145-р, Київ, (2006).
2. Б.Є. Патон, В.Г. Баряхтар, О.С. Бакай, І.М. Неклюдов // Вісник Національної академії наук України, (2006).
3. International Energy Agency, Paris, France, [www.seed.slb.com/ru/scictr/watch/climate\\_change/index.htm](http://www.seed.slb.com/ru/scictr/watch/climate_change/index.htm).
4. United Nations Statistics Division - Common Database. 2008 [unsd.un.org/unsd/databases.htm](http://unsd.un.org/unsd/databases.htm).
5. International Energy Agency, Paris, France, [www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/keystats2007/pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/keystats2007/pdf).
6. [www.seed.slb.com/ru/scictr/watch/climate\\_change/index.htm](http://www.seed.slb.com/ru/scictr/watch/climate_change/index.htm).
7. Nifenecker H., Meplan O., David S. Accelerator driven subcritical reactors, Institute of Physics (2003), Ch. 1.
8. International Energy Agency, Paris, France, [www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/keystats2007/pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/keystats2007/pdf).
9. Сараїв О.М. Актуальність розвитку інноваційних технологій замкнутого паливного циклу в атомній енергетиці Росії // Міжнародна конференція "Розвиток атомної енергетики на основі реакторів на швидких нейтронах із замкнутим паливним циклом. Стратегія й перспективи міжнародного співробітництва", Москва, 24 - 25.11.05.
10. Resources, Production and Demand. A Joint Report by OECD Nuclear Energy Agency and IAEA ("Red Book" 21st edition), [www.nea.fr/html/ndd/reports/2006/uranium2005-english.pdf](http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2006/uranium2005-english.pdf).
11. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. [www.iaea.org/NewsCenter/Statements/DDGs/2006/sokolov01062006.html](http://www.iaea.org/NewsCenter/Statements/DDGs/2006/sokolov01062006.html)
12. World Nuclear Association, London, United Kingdom, [www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org).
13. US Department of Energy sponsored study, A Technical Roadmap for Generation IV Nuclear Systems: Technical Roadmap Report, Washington DC, October, 2002.
14. Power provision of mankind sustainable development, cardinal solution of the nuclear weapons non-proliferation problem, and the problem of the environmental recovery of the Earth Planet, IAE-6213/3 Kurchatov Institute, Moscow, 2001.
15. International Projection Innovate Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO). [www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NENP/NPTDS/Projects/INPRO/index.html](http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NENP/NPTDS/Projects/INPRO/index.html).
16. Мінеральні ресурси України та їх видобування, НАН України, Відділення наук про Землю.
17. Н.Ю. Шумкова. Доповідь на конференції Украю, 23.09.07, Київ, Україна.
18. М.А. Хвесик, І.Л. Головинський, О.В. Яроцька. "Продуктивність водоресурсних джерел України: теорія й практика (укр.) / РВПС України, НАН України.— 2007.— с. 411.
19. Довідник з водних ресурсів (за ред. Б.І. Стрільця).— Київ: Урожай, 1987.
20. Національний звіт про кадастр викидів парникових газів (ПГ) і їхнього поглинання в Україні за 1990-2004 рр., Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту (Укрндгмі), НАН України, 2006.
21. Прогноз демографічного розвитку України на період до 2050.— Державний комітет статистики України, Київ (2007).
22. UN Data, List of countries by emissions in 2002.
23. Алексеев С., Вороний Н., Грицко Г. Новая генерация: "вторая угольная волна", рынок газа и реформа тепловой электроэнергетики" // Наука в Сибири, N 4 (2589), 25.01.2007 г.; С. Алексеев С. "Теплофизические основы новых энергетических технологий" // Наука в Сибири, №15 (2850), 10.04.2008 г.
24. Thorium Alliance, [www.torium.se](http://www.torium.se).
25. Bakai A.S., Garner F.A. (editors). Problems of Atomic Science and Technology. —2005, #4. —Special issue "Materials for Molten Salt Reactors".
26. Bakai A.S. Combined effect of molten fluoride salt and irradiation on Ni-based alloys / In: Materials Issues for Generation IV Systems: Status, Open Questions and Challenges, Eds. V. Ghetta, orse, D. Maziere, V. Pontikis, Springer (2008).