

## ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА І НАСЛІДКИ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ КАТАСТРОФИ

*Ступінь розвитку техногенної цивілізації оцінюють за кількістю енергії, виробленої на душу населення. Саме вона визначає якість життя.*

*Наші вчені написали й опрацювали багато праць, присвячених історії, стану та науково-технічним проблемам ядерної енергетики України, у яких висвітлено співвідношення техногенезу та ядерної енергетики, її роль, місце, історію, еволюцію та перспективи в загальній енергетичній системі; особливості вітчизняної мінерально-сировинної бази, поводження з радіоактивними відходами (РАВ) і відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП); різні аспекти екологічної безпеки. Серед цих проблем головною для Інституту геохімії навколишнього середовища є вплив ядерної енергетики на довкілля, поводження з радіоактивними відходами на українських АЕС, а також мінерально-сировинна база ядерної енергетики. Особливої уваги заслуговують проблеми еколого-безпечної ізоляції довгоіснуючих та високоактивних РАВ, які тісно пов'язані з наслідками Чорнобильської катастрофи.*

### ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА В ТЕХНОГЕНЕЗІ

Світова ядерна енергетика має цікаву і непросту історію. У 50–60-х рр. XX ст. на неї поклали великі сподівання як на могутнє і перспективне джерело енергії, що забезпечить будь-які потреби економіки. Справді, потужність ядерної енергії необмежена, хоча її використання неможливе без дотримання дуже жорстких і недешевих заходів екологічної безпеки. Перші десятиріччя розвитку галузі були успішними: щорічно в експлуатацію вводили до п'яти реакторів, у сер. 80-х рр. їх було вже близько 400, на частку ядерної енергетики припадало 24% усього світового енергоресурсу.

Так тривало до 26 квітня 1986 р., коли на Чорнобильській АЕС сталася ядерна катастрофа. Вона коштувала нам тисячі людських життів, завдала багатомільярдних збитків українському господарству, призведе-

ла до значного радіаційного забруднення багатьох країн і спричинила стійку радіофобію до ядерної енергетики, унаслідок чого в світі було законсервовано багато АЕС і призупинено нарощування потужностей ядерної енергетики. Психологічно це можна зрозуміти, хоча статистика свідчить, що в США, наприклад, смертність від радіації АЕС посідає 20 місце серед причин смерті залежно від виду діяльності людей [5].

Техногенна цивілізація як система неможлива без пошуків потужних джерел енергії і досконалих технологій. Термодинамічно природні техногенні системи і процеси в навколишньому середовищі можна розділити на два головні типи: самочинні (мимовільні) і ті, що розвиваються. Вірогідність стану системи визначає її ентропія (міра зв'язаної енергії). За Больцманом, для мольної системи між цими параметрами існує співвідношення:

© СОБОТОВИЧ Емлен Володимирович. Академік НАН України. Директор Інституту геохімії навколишнього середовища НАН України і МНС України.

БЕЛЄВЦЕВ Рудольф Якович. Член-кореспондент НАН України. Завідувач відділу термодинаміки геосфер Інституту геохімії навколишнього середовища НАН України і МНС України (Київ). 2009

$$S = R \ln W, \quad (1)$$

де  $S$  — ентропія,  $W$  — мультиплетність або ймовірність,  $R$  — газова постійна (8,314 Дж/град·моль).

Перший тип — самочинні процеси, що супроводжуються виділенням енергії завдяки зменшенню вільної енергії (роботи), вони врівноважують ізольовану систему з максимальною ентропією і вільною енергією, рівною 0, згідно з другим законом термодинаміки. Самочинні процеси розвиваються в напрямі градієнта сили, утворюючи потоки енергії і речовини. Вони призводять систему до стану спокою, розсіювання і хаосу. Одним із таких процесів у навколишньому середовищі є самоочищення від техногенних забруднень під час розсіювання в атмосфері техногенних викидів.

Другий тип — процеси і системи, що розвиваються, відкриті й незворотні, з градієнтами термодинамічних параметрів, потоками енергії і речовини, спрямованими від стану рівноваги<sup>1</sup>. Вони розвиваються в напрямі, протилежному до самочинних процесів, тому потребують витрат додаткової сили й енергії. Оскільки процеси, що розвиваються, в цілому спрямовані проти термодинамічного потенціалу, то й характеризуються вони зменшенням ентропії і відповідно меншою ймовірністю, змінюються від хаосу до порядку, до створення певної структури.

Процеси, що розвиваються, незворотні, тобто не мають кінця, вони залишають після себе чимало відпрацьованого матеріалу й енергії — відходи, що зазвичай забруднюють довкілля. ККД таких процесів менший ніж 50%. Сучасні процеси, що розвиваються, залишають після себе щораз більше відходів. Наприклад, видобуток урано-

вої руди, у якій кондиційний вміст урану починається з 0,1% (іноді 0,05%), супроводжують гори породи. Так само ядерна енергетика використовує для вироблення енергії не більше як 5% ядерного палива (урану і плутонію), а рештки палива разом із продуктами розподілу в ланцюгових реакціях залишає у вигляді радіоактивних відходів, які необхідно ізолювати.

Техногенез і енергетика розвиваються за своїми законами: збільшуються пропорційно до зростання населення і його потреб, а також удосконалення технологій. Населення Землі має тенденцію до необмеженого зростання в геометричній прогресії. Причому знаменник цієї прогресії постійно збільшується: у XIX ст. знаменник зростання людської цивілізації становив 1,005 (0,5 % щорічно), у першій пол. XX ст. — 1,009, у другій — сягнув 1,02 (рис. 1). Знаменник цієї прогресії наприкінці XX ст. на різних континентах перевищував щорічно 2% (в Азії — 2,2%, Африці — 3%, у Південній Америці — 3,2%). Отже, населення Землі кожні 35 років подвоюється і наприкінці XXI ст. становитиме 50 млрд осіб.

Розвиток техногенезу й енергетики можна модельно представити як газовий тиск, що збільшується за постійного об'єму, тобто за умов обмеження території і ресурсів планети. Тому ймовірність, стійкість і рівень структурованості техногенної системи (світу, країни, міста) зворотно пропорційні густоті населення й рівню розвитку енергетики.

Газовий тиск пов'язаний з ентропією та ймовірністю такими співвідношеннями (див. рівняння 1):

$$\Delta S_g = -R \ln P_g; \ln W = -\ln P_g, \quad (2)$$

де  $P_g$  — тиск газу ( $g$ ).

Такі модельні аналогії термодинаміки газів із техногенною й енергетичною системами унаочнюють тенденції їх (систем) розвитку. Обмеженість природних ресурсів

<sup>1</sup> Приклади процесів, що розвиваються, — життя, еволюція видів, розвиток технологій і цивілізації, енерговиділення.

Землі призупинить темпи зростання населення, техногенезу й енергетики, сприятиме утворенню стаціонарної системи.

Структура енергетики за останнє століття зазнала істотних змін. Вугілля, як головний енергоносіє на поч. ХХ ст., поступилося місцем нафті й газу. У 80-х рр. ХХ ст. енергетична система мала приблизно такий вигляд: нафта — 35%, газ — 20%, вугілля — 20%, ядерна енергія (уран) — 25% (після Чорнобильської катастрофи — стабільно 20%). У 50–80 рр. приріст видобутку вуглеводневого палива був максимальним (щорічно понад 3%), згодом темп уповільнився і становить нині 12–13 млрд т щорічно, зберігаючи тенденцію невеликого приросту (1,5% на рік). Сьогодні частку газу збільшують (запаси газу більші, ніж нафти). Упродовж 2003–2008 рр. світовий видобуток нафти із газоконденсатом зріс із 3125 до 3600 млн т (2,87% щорічного приросту), природного газу — із 2624 до 2975 млрд м<sup>3</sup> (2,54% щорічно). Натомість видобуток вугілля за цей же період скоротився з 3262 до 3222 млн т (0,25% щорічно). У цілому світовий видобуток вуглеводневого палива зростає щорічно на 1,7 % і становить близько 10 млрд т умовного палива. За прогнозами фахівців, через 40 років ця цифра може вдвічі зрости. Розвідані запаси нафти, за даними на 2000 р., становлять 152 млрд т, а газу — 148000 млрд м<sup>3</sup>, яких при теперішніх темпах видобутку вистачить на 30 років [7].

Вітрова, сонячна і геотермальна енергії мають несуттєве місцеве значення через малу потужність, складні технології, високу собівартість і нерідко через їхній негативний вплив на навколишнє середовище (табл.). Наприклад, через надміру шкідливий для людини шум під вітрові установки потрібно відводити великі земельні площі, які перевищують у 20 разів нормативи для теплових станцій на одиницю енергії. Геотермальні станції навіть на най-

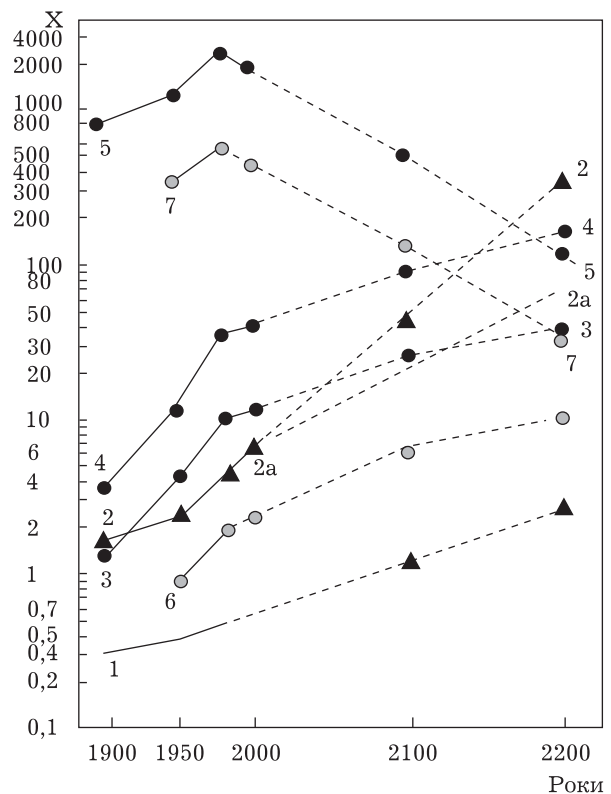


Рис. 1. Прогноз розвитку (X): 1 — населення в Європі, млрд; 2, 2а — населення у світі, млрд (2 — за приросту 1,3 % на рік); 3 — використання вуглеводневого палива, 10<sup>12</sup> кг; 4 — витрата атмосферного кисню на згоряння палива на душу населення, кг; 5 — витрата палива на душу населення, кг; 6 — виробництво основних продуктів, 10<sup>12</sup> кг; 7 — витрата продуктів на душу населення, кг; суцільна лінія — реальність, штрихова — перспектива

активніших гейзерах у Каліфорнії, де температура на глибині 1 км досягає 250 °С, поки що не можуть перевищити 10% енергетики регіону [4].

Таким чином, при збереженні темпів сучасного економічного розвитку людству в недалекому майбутньому (ймовірно, вже у ХХІ ст.) загрожує різке погіршення екології. Основну загрозу для нас становлять не війни, епідемії, АЕС чи вирубування лісу, а економічний прогрес і його відходи, які супроводжують зростання населення, техногенез і розвиток енергетики. Ці сумні тенденції може стримати лише обмеженість

### Економічні й екологічні показники електростанцій різних типів [8]

Типи електростанцій	Собівартість, цент./кВт/год.	Питомі капіталовкладення дол./кВт	Відчуження земельних угідь, м <sup>2</sup> /кВт
<i>Геотермальні</i>			
Природна пара (250 °С)	2,1	300	15
Перегріта вода — бінарний цикл (150 °С)	5,1	до 850	18,2
Гарячі породи — геодинамічна система (250 °С)	6,8	до 950	20,0
<i>Паливні</i>			
Вугілля (20 дол./т)	2,9	600	16,2
Мазут (30 дол./барель)	6,3	800	12,2
Сланці, бітуми	5,8	1450	16,2
Біомаса	9,5	1100	2630
<i>Атомні</i>			
На теплових нейтронах	3,4	1250	8,1
На швидких нейтронах	4,4	1500	8,1
<i>Сонячні</i>			
На фотоелементах	11,5	2000	80,1
Термодинамічні	9,3	2650	80,1
<i>Вітрові</i>			
Вітер	4,8–7,0	1850	324
<i>Гідрравлічні</i>			
ГЕС	1,1	2000	100
Припливні	20	2500	0

території Землі та її ресурсів, перетворивши техногенез на стаціонарну систему. Сьогоднішня фінансово-економічна криза — це певною мірою відповідь на неконтрольований розвиток світової цивілізації.

#### ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА В УКРАЇНІ

Інфраструктури для обслуговування українських АЕС за радянських часів майже не було. Та й сьогодні ми видобуваємо лише 40% від необхідної кількості урану, а його афінаж і збагачення (<sup>235</sup>U), виготовлення тепловідільних елементів (ТВЕЛів) замовляємо в Росії. Там і переробляємо відпрацьоване ядерне паливо (ВЯП). На українських АЕС реактори (ВВЕР-1000) й устаткування до них російські, і стратегія розвитку ядерної енергетики передбачає використання переважно саме цих реакторів.

Ядерна енергетика України не має замкненого ядерного циклу, існують пробле-

ми і з підготовкою висококваліфікованих ядерників (фізиків і хіміків).

В Україні перший ядерний реактор (РБМК-1000) почав працювати в 1977 р. на Чорнобильській АЕС. Четвертий блок запустили 1983 р. Після аварії 1986 р. Чорнобильську АЕС остаточно перестали експлуатувати у 2000 р. Нині в Україні діють 15 ядерних блоків на чотирьох АЕС: Запорізькій (6 блоків), Рівненській (4), Південноукраїнській (3) і Хмельницькій (2). Вони виробляють близько половини електроенергії України [3, 6]. Усі реактори і заплановані для спорудження ще 11 блоків представляють 3-є покоління, що працює на <sup>235</sup>U, якого надовго не вистачить. Подальший розвиток вітчизняної ядерної енергетики повинен ґрунтуватися на ядерних реакторах 4-го покоління, що використовують як паливо і <sup>238</sup>U, і <sup>232</sup>Th, тобто сировину, якої вистачить на сотні років. Поступова заміна застарілих

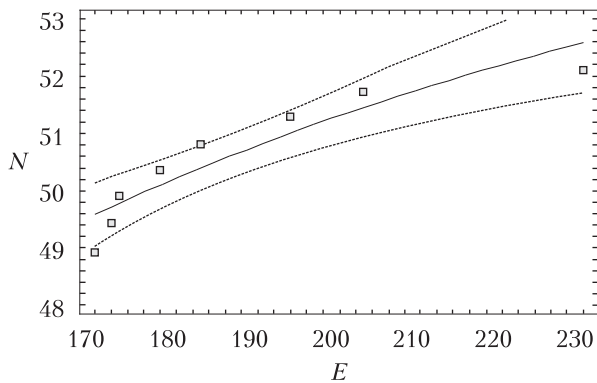


Рис. 2. Залежність населення ( $N$ ) України від сумарного виробництва електроенергії ( $E$ ) [2].

типів реакторів на більш сучасні та безпечні, з погляду розв'язання проблеми захоронення РАВ, — стратегічний напрям світової і вітчизняної енергетики [1, 6].

Саме ядерна енергетика спроможна в найближчій перспективі підвищити рівень нашого життя хоча б до європейських стандартів. Населення України скорочується зі швидкістю 0,5–0,8% щорічно. Якщо сучасні демографічні тенденції зберігатимуться надалі, то у 2050 р. нас залишиться лише 33–38 млн. Призупинити цей невблаганний процес може економічний прогрес, побудований на своїй незалежній енергетиці, основою якої може стати лише ядерний складник (рис. 2).

Гіперболічна модель: згідно з нею нульовий приріст населення відповідає 138 млрд кВт/год., 0,5% — 142; 1% — 145. На 2006 р. —  $E = 160$ ,  $N = 48,9$ . Прогноз на 2025 р. при  $E = 136$ ,  $N = 46,7$ , а на 2050 р. при  $E = 125,4$ ,  $N = 45,5$  млн осіб.

Загальне виробництво електроенергії в Україні впродовж 1991–2000 рр. скорочено із 279 до 170 млрд кВт/год. (ТЕС — із 192 до 81, ГЕС — із 12 до 11, АЕС — із 75 до 77). Нині українські АЕС виробляють половину електроенергії, причому коефіцієнт корисної дії (ККД) АЕС у 2,7 разу вищий, ніж на ГЕС, і в 2,9 — ніж на ТЕС, а рента-

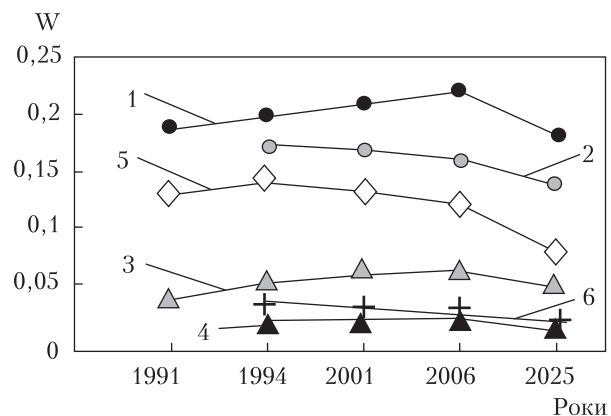
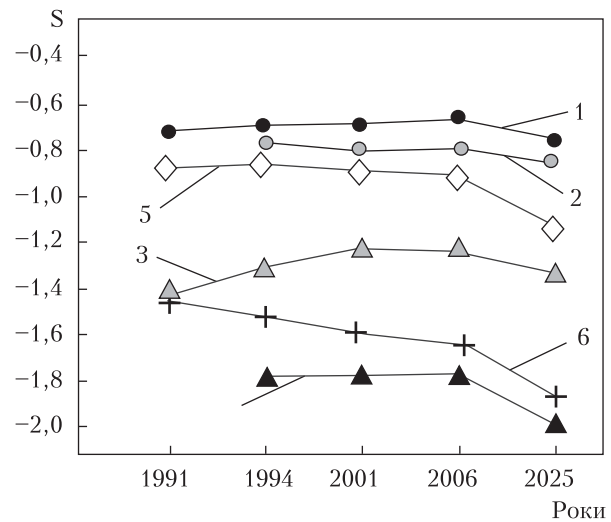
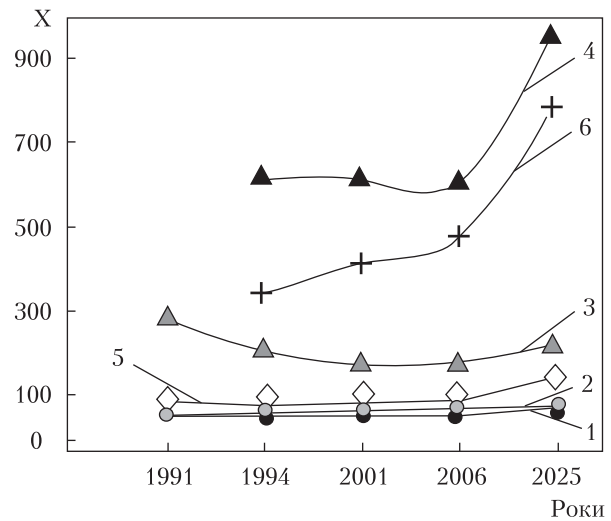


Рис. 3. Прогноз розвитку енергетики України і Франції: 1 — населення України; 2 — населення Франції; 3 — енергетика України; 4 — енергетика Франції; 5 — ядерна енергетика України; 6 — ядерна енергетика Франції.  $X$  — населення в млрд;  $S$  — ентропія;  $W$  — мультиплетність

бельність роботи «Енергоатому» України перевищує 100%. Як бачимо, атомна енергія займає перші позиції за цими показниками і надійної альтернативи їй немає.

Порівняльний аналіз розвитку енергетики України і Франції (рис. 3), територія і населення яких майже однакові, засвідчив, що енергетика Франції у 3–5 разів перевищує українську, населення Франції зростає на 0,5% щорічно, а населення України приблизно з такою ж швидкістю скорочується. Вироблення енергії і приріст населення пов'язані досить високим коефіцієнтом кореляції – 0,93 (рис. 2). Основну роль у французькій енергетиці відіграє ядерна енергія (понад 80%), а енергетика України деградує, хоча за останні 20 років обсяги енерговиробництва на наших АЕС стабілізувалися. Вироблення енергії на душу населення в Україні близьке до середньосвітового, у США та Франції – у 2–3 рази більше. Техногенний потік ентропії у Франції значніший, ніж в Україні, отже, і частка використаної енергії (роботи) у Франції вища. Відповідно нижча і ймовірність, стійкість цього виробництва у Франції, проте значно вищий ступінь його організованості (рис. 3) [2].

Для прогресу економіки і зростання населення необхідно збільшити виробництво енергії. Франція розв'язує це питання шляхом розвитку ядерної енергетики. Щоб забезпечити українську економіку енергією і призупинити скорочення чисельності населення, необхідно щорічно збільшувати виробництво ядерної енергії в Україні на 3–4%, щоб подвоїти її обсяг до 2025 р.

### ЧОРНОБИЛЬ

Причини і наслідки аварії 26 квітня 1986 р. на Чорнобильській АЕС і дотепер цілком не з'ясовані [1, 5, 11, 12]. У різних джерелах натрапляємо на різні припущення, а саме:

– реактори РБМК-1000 не мали «захисту від дурня»;

– 4-ий блок Чорнобильської АЕС уведено в дію в грудні 1983 р., тобто він відпрацював до аварії більше ніж два роки;

– у реактор завантажують близько 190 т урану, з яких 500 кг  $^{235}\text{U}$ . Усього в реакторі вигоряє близько 3,2%  $^{238}\text{U}$  і 1,6%  $^{235}\text{U}$ , 0,8% Pu, а у ВЯП накопичується близько 0,47% Pu і до 2% продуктів розпаду [5]. При розщепленні 1 г  $^{235}\text{U}$  виділяється енергія  $8 \cdot 10^7$  кДж (22000 кВт/год.). За 2 роки було вироблено близько 16000 млн кВт/год., для чого потрібно розщепити близько 700 кг  $^{235}\text{U}$ , хоча його в реакторі міститься близько 500 кг. Різницю компенсує плутоній, якого вигоряє близько 100 кг, тобто 20% від кількості вигорілого  $^{235}\text{U}$ . До того як на 4-му блоці Чорнобильської АЕС сталася аварія, ядерне паливо (з високим вмістом продуктів розпаду із сумарною радіоактивністю близько  $74 \cdot 10^{18}$  Бк) було значною мірою використане;

– за межі реактора потрапило не менш як 3,5% палива, а в реакторних приміщеннях його кількість задокументовано в обсязі  $130 \pm 30$  т.

Після першого великого викиду радіонуклідів у навколишнє середовище 26 квітня на 4-му блоці ЧАЕС наступило тимчасове затишшя, яке 2–5 травня було перерване швидким потужним виверженням продуктів розпаду за межі реакторного блоку. Температура палива підвищилася до 2500 °С, що спричинило великі викиди радіонуклідів у атмосферу у вигляді газів і аерозолів, а також утворення значної маси розплавів (ЛТСМ) у приміщеннях блоку. Усього за межі реактора потрапило більше як половина продуктів розпаду і ядерного палива (із загальною радіоактивністю до  $13 \cdot 10^{18}$  Бк), оскільки донині в 4-му блоці знайдено тільки 50 т урану. Тверді продукти розпаду, насамперед  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$ , що накопичилися в реакторі за 2 роки його роботи, також викинуто вибухом в атмосферу у вигляді аерозолів

(радіоактивність викиду близько  $10^{17}$  Бк). Викид цих радіонуклідів разом із плутонієм становить для навколишнього середовища найбільшу небезпеку. Оскільки маса  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  досить велика (близько 33 кг), її вистачило, щоб забруднити значну частину території України, Білорусі й Росії на 300 років. Фактично назавжди для життєдіяльності людей втрачено частину території Чорнобильської зони ( $800 \text{ км}^2$ ) унаслідок її забруднення довгоіснуючими трансурановими елементами — Pu, Cm, Np, Am (понад  $0,1 \text{ Ки/км}^2$ ), що є  $\alpha$ -випромінювачами, нехай навіть із відносно невеликими активністю ( $\sim 10^{14}$  Бк) і масою (близько 18 кг). Решта викинутих твердих радіонуклідів — телур, барій, цирконій, молібден, рутеній, церій та ін. — має короткий період напіврозпаду (серед них немає  $\alpha$ -випромінювачів) і небезпечна впродовж кількох місяців, рідше — декількох років.

Виділену під час Чорнобильської аварії енергію можна орієнтовно оцінити за двома незалежними розрахунками. По-перше, на основі наростання (до 13 разів) потужності реактора за останні 30 сек. перед вибухом [5]. Ця енергія становила  $10^9$ – $10^{10}$  кДж. По-друге, підсумувати теплові витрати на нагрівання активної зони реактора до  $1500$ – $3000$  °С і більше, нагрівання реакторного приміщення, реакції дегідратації, плавлення палива і будівельних матеріалів з утворенням лави, створення високого газового тиску в реакторному приміщенні. Зазначену енергію також оцінюють в обсязі  $108$ – $109$  кДж. При цьому найбільше значення має швидкість нагрівання водяної пари з реакторної системи в приміщенні реактора до створення тиску  $200$ – $1000$  атмосфер, для чого необхідна енергія  $10^8$ – $10^9$  кДж і  $50$ – $500$  т води. Щоправда, ця енергія для ядерного реактора невелика й аналогічна ланцюговій реакції розщеплення лише близько  $100$  г  $^{235}\text{U}$ . Проте при швидкому наростанні потужності її було цілком

достатньо для вибуху газу, руйнування реакторного приміщення і викиду радіоактивних продуктів розпаду урану в атмосферу 26 квітня. Зауважимо, що температура в активній зоні перед вибухом сягала  $3000$ – $4000$  °С, унаслідок чого загорялися такі тугоплавкі елементи, як C, W, U, Pu та ін. За таких температур горів навіть графіт, а вода розкладалася на водень і кисень. Існувала ймовірність ність не лише газового, але й водневого вибуху.

Чорнобильська аварія негативно вплинула на розвиток світової ядерної енергетики. Проте сьогодні ситуація змінюється на краще. Людство усвідомило, що альтернативи ядерній енергетиці для розвитку цивілізації немає, і використало негативний досвід Чорнобильської аварії для організації надійніших систем безпеки на АЕС (їх зараз суворо дотримуються, тому некеровані ланцюгові реакції в ядерних реакторах сучасних АЕС неможливі).

Одним із основних негативних наслідків «Чорнобиля» і експлуатації ядерної енергетики взагалі є РАВ, особливо довгоіснуючі. На жаль, наша держава поки що не розпочала їх екологічно безпечної ізоляції.

#### ПОВОДЖЕННЯ З РАВ

Виробництво електроенергії на атомних електростанціях, експлуатація дослідницьких реакторів, використання радіоактивних матеріалів на виробництві, у медичних і наукових установах, аварія на Чорнобильській АЕС, військова діяльність призвели до накопичення великих об'ємів радіоактивних відходів [9, 10, 13], зокрема:

— унаслідок аварії на Чорнобильській АЕС у зонах відчуження й безумовного (обов'язкового) відселення (без об'єкта «Укриття») утворилося близько  $2800$  тис.  $\text{м}^3$  радіоактивних відходів різних типів. В об'єкті «Укриття» міститься майже  $1700$  тис.  $\text{м}^3$  твердих радіоактивних відходів (включаючи ТВМ, будівельні конструкції тощо) з

активністю  $7,4 \cdot 10^{17}$  Бк. Близько 40 тис. м<sup>3</sup> цих відходів належить до категорії довгоіснуючих;

— у сховищах Чорнобильської АЕС зберігається 20 тис. м<sup>3</sup> рідких і близько 2500 м<sup>3</sup> твердих радіоактивних відходів;

— на майданчиках атомних електростанцій (окрім Чорнобильської АЕС) зберігається близько 31 тис. м<sup>3</sup> низькоактивних, 1786 м<sup>3</sup> середньоактивних і 166 м<sup>3</sup> високоактивних твердих радіоактивних відходів, сховища заповнені ними на 55%. У пристанційних сховищах на сьогодні міститься 12280 м<sup>3</sup> рідких радіоактивних відходів (20–80%);

— у сховищах міжобласних спецкомбінатів державної корпорації Українське державне об'єднання «Радон», спеціалізованих підприємств зон відчуження й безумовного (обов'язкового) відселення (далі — спеціалізовані підприємства) зберігається близько 650 тис. м<sup>3</sup> рідких і твердих радіоактивних відходів.

У майбутньому очікують утворення таких обсягів РАВ:

1) під час проведення заходів щодо виведення з експлуатації Чорнобильської АЕС за рік накопичиться 1500 м<sup>3</sup> низько- і середньоактивних твердих РАВ. Таким чином, до 2017 р. вони становитимуть близько 15000 м<sup>3</sup>;

2) під час поточної експлуатації і перетворення об'єкта «Укриття» в екологічно безпечну систему буде накопичено:

— щорічно 1000 м<sup>3</sup> низько- і середньоактивних твердих РАВ. Таким чином, усього до 2017 р. їх буде близько 10000 м<sup>3</sup>;

— щорічно 2,5–8,0 м<sup>3</sup> високоактивних радіоактивних відходів (ЧАЕС і об'єкт «Укриття» разом); у 2017 р. — 25–80 м<sup>3</sup>;

— обсяги рідких РАВ, які можуть накопичуватися на ЧАЕС і об'єкті «Укриття» до 2017 р., становитимуть 140000–150000 м<sup>3</sup>;

3) за різними прогнозами, обсяги повернених із Росії високоактивних РАВ, утворених у результаті перероблення відпра-

цьованого ядерного палива з українських АЕС, у 2017 р. сягатимуть 90–250 м<sup>3</sup>;

4) у результаті роботи АЕС до 2017 р. буде накопичено близько 100000 м<sup>3</sup> низькоактивних РАВ, 6000 м<sup>3</sup> середньоактивних РАВ, 600 м<sup>3</sup> високоактивних РАВ.

Згідно із затвердженою Урядом України «Загальнодержавною цільовою екологічною програмою поводження з РАВ» (Закон України від 17.09.08 за № 516-VI), сфера поводження з РАВ повинна становити систему нерозривних потоків: виробники — місця тимчасового зберігання — централізоване перероблення — проміжне зберігання — захоронення. Зокрема, документом передбачено будівництво об'єктів для поводження з РАВ у процесі виведення з експлуатації ЧАЕС і перетворення об'єкта «Укриття» в екологічно безпечну систему, а також Центр для перероблення, зберігання і захоронення РАВ на базі комплексу «Вектор», в інфраструктурі якого передбачено створення геологічного сховища високоактивних та інших довгоіснуючих відходів.

Завдання Держпрограми щодо поводження з РАВ (у редакції, затвердженій КМУ в 1999 р.) були фактично без змін покладені в основу нової загальнодержавної програми 2008 р.:

- розміщення РАВ у глибоких геологічних формаціях;
- концепція створення геологічного сховища і підземної лабораторії;
- геологічні критерії і методичні рекомендації проведення комплексних еколого-геологічних робіт;
- пошук районів, геологічних формацій і ділянок, придатних для спорудження геологічного сховища;
- розроблення перспективних технологій і технічних засобів поводження з РАВ, які підлягають захороненню в глибоких геологічних формаціях.

Чому ж МНС зволікає з виконанням Державної програми поводження з РАВ?



Існує кілька взаємопов'язаних причин такої поведінки:

1. Проблеми поводження з РАВ для МНС не є пріоритетними. У контексті основних функцій МНС вони не мають грифу «надзвичайні ситуації».

2. МНС економічно не зацікавлене у розв'язанні проблем поводження з РАВ.

3. Відомство фактично ні перед ким не звітує за виконання / невиконання Програми.

4. В апараті МНС немає фахівців, обізнаних із особливостями поводження з РАВ, уповноважених готувати і приймати відповідальні рішення.

Зазначимо, що раніше в структурі як Мінчорнобиля, так і Держкоматому існували Управління щодо поводження з РАВ, де працювали профільні фахівці. Але ці підрозділи скоротили.

Стагнація науково-дослідної діяльності в галузі поводження з РАВ є об'єктивним віддзеркаленням сучасної ситуації. Необхідно знайти і запровадити механізми реалізації основних принципів державної політики у сфері поводження з РАВ, активізувавши, таким чином, інтерес до відповідних наукових досліджень.

Створення геологічного сховища — це комплекс проблем науково-технічного характеру: вибір майданчика для його спорудження, розроблення і створення технологій багатобар'єрної ізоляції, детальні дослідження в підземній лабораторії аж до проектування і будівництва. Їх послідовне вирішення потребує чимало часу (як свідчить досвід Німеччини, Франції, Швеції, США — не менше ніж 20–25 років). Але НАН України не має цільової фінансової підтримки з боку зацікавлених у розв'язанні цієї проблеми урядовців. Тому й досі в зоні відчуження ЧАЕС не пробурено жодної свердловини для підтвердження або спростування рекомендацій учених.

Завершує ядерний цикл ізоляція відпрацьованого ядерного палива і радіоактивних

відходів. Глибинне захоронення РАВ у кристалічних масивах Чорнобильської зони відчуження при відповідному науковому обґрунтуванні цілком екологічно безпечно для навколишнього середовища, оскільки уран, плутоній та інші довгоіснуючі радіонукліди РАВ розчиняються і мігрують винятково з поверхні метеорних окиснених вод, а глибинні підземні води мають властивість самовідновлення і неспроможні утримувати довгоіснуючі радіонукліди. Необхідно знайти стабільний слабопроникний блок континентальної кори на глибині 500–1000 м.

Завданнями подальших геологічних, геофізичних і геохімічних комплексних досліджень слід вважати уточнення інженерно-геологічних параметрів кристалічного масиву по латералі і на глибину на перспективних ділянках, відібраних для будівництва могильників РАВ, проведення експериментальних досліджень.

#### КОНСОРЦІУМ

△ опомогти Україні в створенні центрального геологічного могильника довгоіснуючих РАВ може лише міжнародний консорціум. Адже для реалізації програми поводження з РАВ нам бракує і фінансів, і політичної волі, хоча наявна Програма поводження з РАВ є Законом України. Водночас у державі вже накопичилося близько 1 млн т РАВ і чимало ВАВ, які загрожують навколишньому середовищу.

Геологи України в пошуках варіантів розміщення геологічного сховища РАВ звернули увагу на територію Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ), де зосереджені найбільші обсяги РАВ (близько 90%), що підлягають видаленню. Крім того, це єдина незаселена територія в Україні, де спорудження глибинного сховища не викличе соціального протесту, на який слід чекати в будь-якому іншому регіоні.

Під час виконання наукових досліджень у межах міжнародного проекту «Кассіопея»

(1999 р.) було відібрано перспективні райони, придатні для спорудження глибинного сховища, в західній частині Чорнобильської зони відчуження. Граніти Коростенського масиву в стабільних блоках є, на думку академіка В.М. Шестопалова, сприятливим геологічним середовищем для глибинної ізоляції РАВ [16]. Вони заражені плутонієм і непридатні для використання впродовж 200 тисяч років. Осадовий чохол мезо-кайнозойських платформених осадів має тут потужність 150–200 м, що покращує ізоляційні властивості місцевості. Найперспективнішими вчений вважає такі ділянки, як Вереснянський і «Товстий Ліс». Згідно з результатами геофізичних і геохімічних досліджень, доцільніше використовувати ділянку «Товстий Ліс», що розташована безпосередньо в плутонієвій зоні, яку ні на що інше використовувати не можна (про кристалічний фундамент, що залягає на глибині близько 400 м, дуже уривчасті дані. – Авт.).

Для прийняття остаточного рішення щодо розміщення могильника РАВ необхідно провести цілий комплекс геологорозвідувальних робіт, у тому числі площадкове геохімічне знімання дифузійних ореолів розсіювання рухомих елементів (ртуть, фтор, літій), детальні геофізичні дослідження кристалічного фундаменту і осадового чохла. Для підтвердження результатів досліджень потрібно пробурилити розвідувальні свердловини до глибини 1000–1500 м. Ці роботи дуже витратні, тому доцільно провести 2–3-річні підготовчі роботи для функціонування підземної лабораторії і проектування сховища.

Мета створення консорціуму — переконати західних інвесторів у необхідності й доцільності спорудження геологічного могильника РАВ у Чорнобильській зоні. Переконані, консорціум партнерів залюбки профінансував би його спорудження в обмін на можливість захоронити західні РАВ.

Україна, нарешті, отримає можливість побудувати могильник, де будуть поховані і вітчизняні, і західні РАВ. Крім того, відпаде необхідність захоронити ці забруднені плутонієм 800 км<sup>2</sup> ґрунтів протягом сотень тисяч років.

#### ВИСНОВКИ

1. Ядерна енергетика дає нині близько половини електроенергії України. Вона найстабільніше екологічно безпечне джерело енергії для вітчизняної економіки. Енергетика — провідна галузь економіки, запорука добробуту населення, необхідна для стабілізації його чисельності. Україна не має достатньо джерел органічного палива. Крім того, спалювання вугілля і газу суттєво погіршує стан довкілля. Тому альтернативи ядерній енергетиці, як основи прогресу економічного і соціального розвитку України, поки що не має.

2. Найстрашніша в історії ядерної енергетики Чорнобильська аварія призвела до значного радіаційного забруднення великих територій і негативно вплинула на розвиток ядерної енергетики, фактично зупинивши його. Проте досвід Чорнобиля використали для розроблення і запровадження більш надійних систем безпеки на АЕС усього світу.

3. Сьогодні у світі працює більше як 400 ядерних реакторів. У Франції вони енергетика виробляють понад 80% електроенергії. Ядерну енергетику впроваджують у багатьох країнах, що розвиваються. Україна до 2025 р. планує удвічі збільшити потужність ядерної енергетики, щоб її частка досягла 2/3 усієї енергосистеми держави.

4. Найбільшу загрозу для навколишнього середовища становлять РАВ, що постійно збільшуються. Особливо це стосується довгоіснуючих РАВ, які підлягають захороненню в глибоких геологічних формаціях. На жаль, цій проблемі держава не приділяє належної уваги. Один із вірогідних

варіантів її розв'язання — утворення міжнародного консорціуму для створення глибокого центрального могильника довгоіснуючих РАВ у забрудненій плутонієм території Чорнобильської зони, де можна захоронити і вітчизняні, і зарубіжні відходи. Це було б економічно обґрунтовано.

4. В Україні назріла потреба створення раціональної інфраструктури ядерної енергетики, що мала б замкнений ядерний цикл — від видобутку урану, його збагачення, виготовлення ТВЕЛів тощо аж до захоронення РАВ.

1. Барьяхтар В.Г. Двадцать первый век: производство энергии, уровень жизни, экология, проблемы // Геофизический журнал. — 2006. — Т. 28. — № 3. — С. 7–18.
2. Белевцев Р.Я., Бойченко С.Г., Спивак С.Д. и др. Термодинамика газового обмена в окружающей среде. — К.: Наук. думка, 2007. — 247 с.
3. Вишневський І., Давидовський В., Трофименко А. Екологічно чиста атомна енергетика: технічний, соціальний, політичний аспекти // Вісник НАН України. — 2001. — №9. — С. 12–28.
4. Грю П.К. Геотермальные ресурсы Калифорнии // Энергетические ресурсы мира. — М.: 27 МГК, 1984. — С. 109–117.
5. Ключиков А.А., Пазухин Э.М., Шигера Ю.М., Шигера В.Ю. Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними. — Чернобыль: Институт проблем безопасности (ИПБ) АЭС НАН Украины, 2005. — 485 с.
6. Мінеральні ресурси України і світу. — К.: ГЕОІНФОРМ України, 2003. — 467 с.
7. Орлов В.П. Минерально-сырьевая база России и мира: взгляд в XXI век // Минеральные ресурсы России. — 1999. — № 3. — С. 2–10.
8. Смирнов Я.Б., Кононов В.И. Геотермические исследования и сверхглубокое бурение // Советская геология. — 1991. — № 8. — С. 25–37.
9. Соботович Э.В., Шестопалов В.М., Белевцев Р.Я., Яковлев Б.Г. Состояние проблемы захоронения РАО в Украине и геологические аспекты их изоляции // Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения. — К.: Наук. думка, 1996. — Т. 3. — С. 5–16.
10. Соботович Е. Де і як ховати радіоактивні відходи // Вісник НАН України. — 1998. — № 3-4. — С. 1–5.
11. Чорнобильська катастрофа / Гол. ред. акад. НАН України В.Г. Бар'яхтар. — К.: Наук. думка, 1996. — 575 с.
12. Чорнобильська катастрофа — 20 років: участь Інституту геохімії навколишнього середовища в подоланні наслідків / Гол. ред. акад. НАН України Е.В. Соботович. — К.: «Салютіс», 2006. — 404 с.
13. Шестопалов В.М., Руденко Ю.Ф., Соботович Э.В., Белевцев Р.Я. и др. Монография: «Изоляция радиоактивных отходов в недрах Украины (проблемы и возможные решения)». НИЦРЭПИ НАН Украины / Отв. ред. В.М. Шестопалов. — К., 2006. — 398 с.

*Е. Соботович, Р. Белевцев*

## ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА І НАСЛІДКИ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ КАТАСТРОФИ

### Резюме

Автори статті переконливо доводять пріоритетність ядерної енергетики над усіма іншими способами отримання енергії для існування і розвитку нашої техногенної цивілізації. Серед основних причин, що стоять на заваді розвитку ядерної енергетики в Україні, вони називають радіофобію, брак фінансів, незацікавленість профільного відомства в реалізації державної екологічної програми поводження з РАВ. Запропоновано вибудувати інфраструктуру вітчизняної ядерної енергетики у вигляді замкнутого циклу — від видобутку урану, його збагачення, виготовлення ТВЕЛів тощо аж до захоронення РАВ.

**Ключові слова:** техногенез, радіоактивні відходи, зона відчуження.

*Ye. Sobotovych, R. Belyevtsev*

## NUCLEAR POWER ENGINEERING AND CHERNOBYL DISASTER CONSEQUENCES

### Summary

Authors of the article provide convincing evidences of nuclear power engineering priority over the other methods of energy production for existence and development of our technogenic civilization. Radiophobia, lack of funds, disinterest of subject agency to implement the state environment program on radioactive wastes management are stated among the main reasons preventing development of nuclear power engineering in Ukraine. It is proposed to build up the infrastructure of home nuclear power engineering in the form of closed-loop cycle — from uranium output, concentration, fuel element production, etc until radioactive wastes disposal.

**Keywords:** technogenesis, radioactive wastes, isolation area.