

## ПРОГНОЗ ОБСЯГІВ НАКОПИЧЕНОЇ АКТИВНОСТІ ВІДХОДІВ, ЯК НАСЛІДОК РОЗВИТКУ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В ХХІ СТОЛІТТІ

*Наведено результати розрахунків щодо кількості утворених радіоактивних елементів внаслідок роботи атомних електростанцій за період з 1954 р. по 2010 р. В результаті порівнянь природної радіоактивності верхнього 16-кілометрового шару континентальної земної кори і цього самого шару, у якому рівномірно розпорошена напрацьована радіоактивність від АЕС, показано, що загальна активність речовини кори збільшилася на 1,86%. За розрахунками, при збереженні темпів нарощування потужностей АЕС на рівні всього 2% на рік до 2100 року середня активність речовини кори збільшиться майже у 10 разів.*

*Ключові слова:* радіоактивні відходи, вплив на навколишнє середовище роботи АЕС, радіоактивність континентальної кори та АЕС.

Важливим питанням, яке ніким не обговорюється, є питання про те, наскільки збільшилася загальна радіоактивність навколишнього середовища, зокрема земної кори, за час розвитку ядерної енергетики. Зазвичай обмежуються загальними даними щодо збільшення радіоактивного фону та оцінками щодо його змін. Однак важливо також прогнозувати, як буде змінюватися саме навколишнє середовище внаслідок роботи, наприклад, атомних електростанцій (АЕС). Добре відомо, що залишками від такої роботи є радіоактивні відходи, які (за сьогоднішніми уявленнями) можна поховати у надрах (у верхньому шарі земної кори) і вона, ця радіоактивність, буде там перебувати сотні тисяч, а то і мільйони років.

Разом з тим поховати у надрах на сотні тисяч років, а тим більше на мільйони років не можна нічого, оскільки за такі геологічні періоди зміняться не тільки сховища, а і вся навколишня територія, а можливо і увесь материк цілком, у тому числі і глибинні надра материка. Цілком можливими і ймовірними є події, які зруйнують сховища, змінять саме навколишнє середовище. Отже і похована радіація (закоркований казковий джин у пляшці) рано чи пізно вийде з під контролю і почне поширюватися, перш за все, через структури, що утворюють земну кору – її верхній, найближчий до поверхні шар. При цьому необхідно мати на

увазі, що радіоактивні матеріали штучного походження (ті, що утворюються на АЕС) мають інший склад, ніж матеріали, утворені в процесі природного радіоактивного розпаду урану, торію, калію та інших радіоактивних елементів.

Ядерний реактор, за своєю суттю, є прискорювачем природних процесів розпаду важких радіоактивних елементів, при цьому це прискорення у реакторах вимірюється мільйонами разів. Ядра атомів урану завдяки поглинанню нейтронів певної енергії (теплові) збуджуються і розпадаються на осколки, що утворюють практично всі елементи таблиці Менделєєва та їх ізотопи. Умови для здійснення такого процесу створюються спеціально у ядерних реакторах різного типу. Природний же процес розпаду ядер радіоактивних елементів відбувається за законами розпаду, утворюючи так звані ряди розпаду [1]. Хімічні елементи, що утворюються в результаті природного розпаду, є дещо іншими, ніж у ядерних реакторах як за кількісними, так і за якісними показниками (у реакторах утворюється ряд інших елементів, ніж у природних процесах розпаду). Таким чином, і склад природної радіоактивності відрізняється від штучної, як хімічними елементами (наприклад, у реакторах утворюється плутоній, якого в природі немає зовсім), так і співвідношеннями між ними.

**Метою цієї статті** є висвітлення методичних положень щодо визначення загальної напрацьованої активності радіоактивних речо-

вин, що утворюються в результаті роботи атомних електростанцій та розрахунок кількісних показників цього процесу з прогнозуванням середнього рівня накопиченої активності континентальної кори планети до кінця XXI століття.

Отже, не вдаючись у тонкощі якісного складу утворених речовин на АЕС чи в природі, виконаємо простий балансовий підрахунок щодо загальної кількості радіоактивних речовин на АЕС, що були утворені в результаті розвитку ядерної енергетики до 2010 р. та прогнозовані їх кількості до кінця XXI століття, ґрунтуючись на основних принципах використання ядерного палива та порівнюємо отримані результати з кількістю утворених ізотопів у природному процесі, що відбувається у земній корі постійно.

Спочатку визначимо активність речовини, що складає земну кору, де проживає більшість населення планети. При цьому потрібно врахувати, що розглядати необхідно лише континенти (гранітна основа), оскільки саме вони містять основну масу природних радіоактивних елементів (ізотопів). У речовині океанічної кори (базальти) їх на порядок менше. Так, за даними [2] практично всі радіоактивні ізотопи, які визначають загальні процеси розпаду та утворення трансуранових елементів, сконцентровані у 16-кілометровому шарі верхньої саме континентальної кори Землі.

У табл. 1 наведено дані щодо сьогоднішніх уявлень відносно вмісту основних радіоактивних елементів ( $^{238}_{92}\text{U}$ ,  $^{235}_{92}\text{U}$ ,  $^{232}_{90}\text{Th}$  і радіоактивного ізотопу  $^{40}_{19}\text{K}$ ) в речовині планети Земля, а також енергію, що ними виділяється у різних частинах земної кулі та в планеті в цілому за визначеннями роботи [3].

Якщо прийняти, що основна частина радіоактивних ізотопів сконцентрована саме у 16-кілометровому шарі континентальної кори (приймаємо, що це 70% загального вмісту з табл. 1), з урахуванням активності радіоактивних ізотопів, обчислених згідно з методикою [4] (див. примітку), отримуємо загальну сумарну активність речовини цього шару континентальної кори (табл. 2).

**Примітка.** Обчислення активності джерела (з роботи [4]).

Знаючи період напіврозпаду ( $T_{1/2}$ ) та молярну масу ( $\mu$ ) речовини, з якої складається зразок, а також масу  $m$  самого зразка, можна вирахувати значення числа розпадів, які проходять у зразку за період часу  $t$  за такою формулою:

$$N(t) = N_0 \left( 1 - 2^{\frac{-t}{T_{1/2}}} \right),$$

Таблиця 1 – Вміст радіоактивних елементів у Землі [3]

Елемент	Континентальна кора, маса $2,25 \cdot 10^{25}$ г		Мантия Землі, маса $4,07 \cdot 10^{27}$ г		Земля в цілому, маса $5,98 \cdot 10^{27}$ г	
	Вміст елементів	Енергія, що виділяється, ерг/с	Вміст елементів	Енергія, що виділяється, ерг/с	Вміст елементів	Енергія, що виділяється, ерг/с
$^{238}\text{U}$	$3,64 \cdot 10^{19}$ г	$0,341 \cdot 10^{20}$	$1,047 \cdot 10^{19}$	$0,098 \cdot 10^{20}$	$4,69 \cdot 10^{19}$ г	$0,439 \cdot 10^{20}$
$^{235}\text{U}$	$0,026 \cdot 10^{19}$ г	$0,015 \cdot 10^{20}$	$0,008 \cdot 10^{19}$	$0,004 \cdot 10^{20}$	$0,034 \cdot 10^{19}$ г	$0,02 \cdot 10^{20}$
$^{232}\text{Th}$	$15,18 \cdot 10^{19}$ г	$0,408 \cdot 10^{20}$	$2,89 \cdot 10^{19}$	$0,078 \cdot 10^{20}$	$18,07 \cdot 10^{19}$ г	$0,486 \cdot 10^{20}$
$^{40}\text{K}$	$5,24 \cdot 10^{19}$ г	$0,146 \cdot 10^{20}$	$5,62 \cdot 10^{19}$	$0,157 \cdot 10^{20}$	$10,86 \cdot 10^{19}$ г	$0,303 \cdot 10^{20}$
K/U	$1,23 \cdot 10^4$	–	$4,6 \cdot 10^4$	–	$1,98 \cdot 10^4$	–
K/Th	$3 \cdot 10^3$	–	$1,67 \cdot 10^4$	–	$5,16 \cdot 10^3$	–
Th/U	4	–	2,74	–	3,83	–
$\Sigma$	–	$0,91 \cdot 10^{20}$	–	$0,337 \cdot 10^{20}$	–	$1,248 \cdot 10^{20}$

де  $N_0 = \frac{m}{\mu} N_A$  — початкова кількість ядер ( $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> — число Авагадро). Активність дорівнює:

$$A = \frac{dN(t)}{dt} = \frac{N_0 \ln 2}{T_{1/2}} \cdot 2^{\frac{-t}{T_{1/2}}}$$

Якщо  $t \ll T$ , то формула для обчислення активності спрощується:

$$A = \frac{N_0 \ln 2}{T_{1/2}}$$

Як видно із табл. 2, більша частина активності припадає на ізотоп калію (92,39%). Отже, природна питома активність усіх ізотопів урану та торію у 16-кілометровому шарі континентальної кори становить  $36,84 \cdot 10^{-13}$  Ки/г. Загальна ж природна активність 16-кілометрового шару континентальної кори з урахуванням <sup>40</sup>К має значення  $484,25 \cdot 10^{-13}$  Ки/г. Оскільки розвиток ядерної енергетики пов'язаний з використанням урану та торію, а рівень активності калію залишається природним, логічно було б частину урану і торію вилучити з природних їх процесів. Однак кількість цих елементів, яка використовується на АЕС нині і в найближчій перспективі, є незначною відносно загального вмісту у корі. Тому у розрахунках активності цими значеннями знехтуємо.

Тепер визначимо активність ізотопів, напрацьованих ядерною енергетикою світу. З моменту створення перших АЕС до 2010 р. пройшло 56 років. У грудні 1942 року в Чикаго було запущено перший у світі ядерний реактор, а через 7 років, в кінці 1949 року, Радянський Союз розпочав проектування першої АЕС. СРСР був піонером в питаннях використання атомної енергії у мирних цілях — перша у світі АЕС потужністю 5 МВт була пушена у 1954 р. в Обнінську (під Москвою). Масштабне будівництво АЕС в СРСР почалося з 1971 р. За подальші 15 років було введено у дію 17 АЕС. Це був період бурхливого розвитку атомної енергетики. У цей період була прийнята Державна програма розвитку атомної енергетики СРСР, якою передбачалося припинити будівництво в Європейській частині СРСР електростанцій на органічних видах палив і збудувати 40 крупних АЕС [7]. Аналогічні програми розпочали діяти і в інших країнах. Розпочався період бурхливих приростів потужностей АЕС, який тривав до 1986 р. — до катастрофи на Чорнобильській АЕС.

До 1954 р. атомна енергія вивільнювалася лише під час випробувань ядерної зброї, що також завдало неабиякої шкоди, оскільки в атмосфері розпорошилася велика кількість радіоактивних матеріалів. Інформація про такі

Таблиця 2 — Активність континентальної земної кори

Елемент	Питома активність елементів <sup>1</sup> , кБк/г	Континентальна кора, маса $2,25 \cdot 10^{25}$ г			
		Вміст елементів у континентальній корі, г	Вміст елементів у 16-ти км шарі континентальної кори <sup>2</sup> , г	Активність елементів у 16-ти км шарі континентальної кори	
				Бк	Ки <sup>3</sup>
<sup>238</sup> U	12,44	$3,64 \cdot 10^{19}$	$2,55 \cdot 10^{19}$	$31,7 \cdot 10^{22}$	$8,57 \cdot 10^{12}$
<sup>235</sup> U	79,0	$0,026 \cdot 10^{19}$	$0,018 \cdot 10^{19}$	$1,42 \cdot 10^{22}$	$0,38 \cdot 10^{12}$
<sup>232</sup> Th	4,075	$15,18 \cdot 10^{19}$	$10,6 \cdot 10^{19}$	$43,2 \cdot 10^{22}$	$11,68 \cdot 10^{12}$
<sup>40</sup> K	252,6	$5,24 \cdot 10^{19}$	$3,67 \cdot 10^{19}$	$927,04 \cdot 10^{22}$	$250,55 \cdot 10^{12}$
<b>Всього:</b>	—	—	—	$1003,36 \cdot 10^{22}$	$271,18 \cdot 10^{12}$

<sup>1</sup> Обчислено за формулою з примітки за періодами напіврозпаду елементів (за даними [5, 6]);

<sup>2</sup> маса 16-ти км шару континентальної кори становить приблизно 25% від сумарної її маси, тобто  $0,56 \cdot 10^{25}$  г (див. табл. 1);

<sup>3</sup> 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк [5].

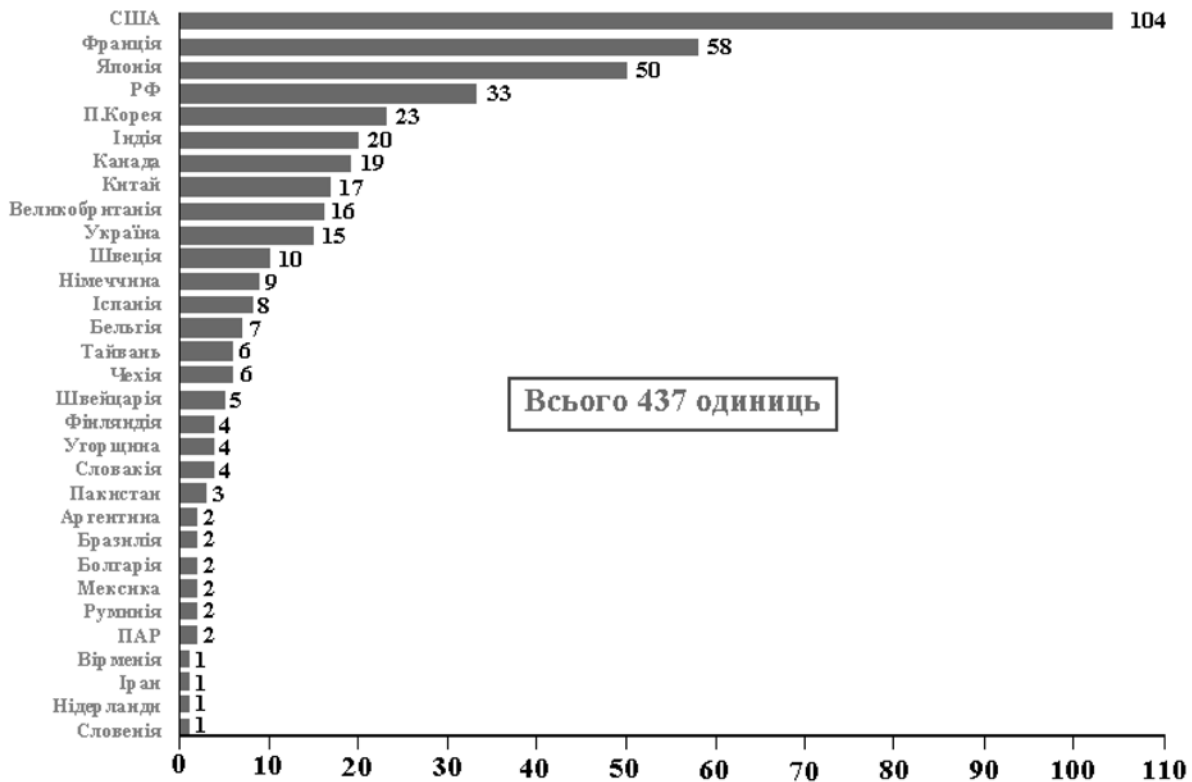


Рис. 1. Діючі реактори на АЕС світу за станом на 2012 рік [15]

випробування відома і міститься у чисельних літературних джерелах, зокрема у роботах [8–10]. Найбільш інтенсивно випробування ядерної зброї в атмосфері проводилися в період з 1954 по 1958 рр. та з 1961 по 1962 рр. Сумарна активність довго живучих радіонуклідів, що були викинуті в атмосферу, становила  $2,4 \cdot 10^{20}$  Бк по тритію,  $2,2 \cdot 10^{17}$  Бк по  $^{14}\text{C}$ ,  $9,6 \cdot 10^{17}$  Бк по  $^{137}\text{Cs}$ ,  $6 \cdot 10^{17}$  Бк по  $^{90}\text{Sr}$  [11, 12]. Окрім атмосфери значну кількість радіоактивних залишків захоронено після підземних ядерних випробувань, яких було чимало [13].

Загальна ж потужність АЕС світу з 1954 р. до 2008 р. зростає від 0 до 370 ГВт (439 реактори), у 2008 році на АЕС було вироблено 2731 ТВт·год електроенергії (5,8% загального світового споживання енергії). Для порівняння – у 1973 р. на АЕС було вироблено 203 ТВт·год електроенергії (0,9% загальносвітового споживання енергії) [14].

За станом на 2012 р. у світі функціонувало 437 атомних реакторів загальною потужністю приблизно 370 ГВт. На АЕС виробляється до 16% світового виробництва електроенергії (25% в країнах ОЕСД). Приблизно 85% від цієї потужності знаходиться в США (104 реактори),

Франції (58 реакторів, 78% виробництва електроенергії), Японії, Росії, Сполученому Королівстві, Кореї та Індії (рис. 1). Приблизно 24 реактори АЕС будуються переважно в Китаї, Індії, Росії, Україні, Фінляндії, Кореї та Японії. Атомні потужності в період 1970–1990 рр. зростають з інтенсивністю 17% на рік (200 ГВт було встановлено в 80-х роках). В період з 1990 р. до 2004 р. темпи нарощування потужностей уповільнилися до 2% на рік [15].

Загальна потужність АЕС світу з 60-х років до другої половини 80-х років ХХ ст. зростає дуже високими темпами, а їх частка у виробництві електроенергії у 1986 році досягла значення 16%. Потім зростання потужностей АЕС уповільнилося (рис. 2) [16]. Спеціалістами МАГАТЕ знову прогнозується різке зростання атомної енергетики з темпами приросту від 0,85% до 3,1% на рік. Очевидно, що максимального зростання не буде. Приймаємо для оцінок середнє значення, тобто 2% на рік.

Протягом наступних 20-ти років частка ядерної електроенергії залишалася практично стабільною на рівні 16%. Це свідчить про те, що зростання виробництва електроенергії на АЕС у цей період було таким самим, як зростання

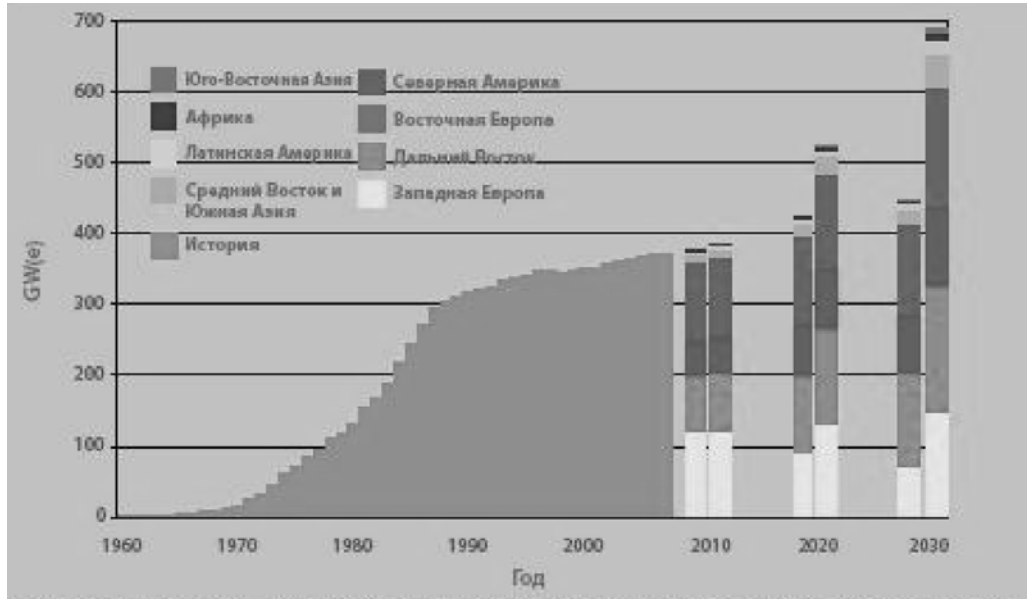


Рис. 2. Існуючі потужності на АЕС світу та прогноз їх збільшення до 2030 року [16]

загального виробництва електроенергії у світі. Незмінність 16%-го рівня виробництва означає, що насправді виробництво електроенергії на АЕС постійно зростало за повільного зростання потужностей АЕС та збільшення коефіцієнта використання їх встановлених потужностей (рис. 3) [16].

Як видно з рис. 3, виробництво електроенергії на АЕС зростало практично за лінійним законом від нуля у 1954 р. до 2793 ТВт·год у 2006 р. [17]. У 2008 р. було вироблено вже лише 2731 ТВт·год, а у 2009 р. загальне виробництво

електроенергії на АЕС зменшилося до 2697 ТВт·год [18]. У 2010 р. виробництво електроенергії на АЕС дещо збільшилося і становило 2756 ТВт·год [19]. Використовуючи ці дані підраховано, що за період 1954–2010 рр. на АЕС було вироблено всього приблизно 77000 МВт·год електроенергії. Виробництво такої кількості електроенергії на АЕС супроводжувалося виділенням 233 тис. ТВт·год теплової енергії в реакторах (при ККД АЕС 33%). При цьому з рис. 3 також видно, що середні рівні приросту виробництва електроенергії

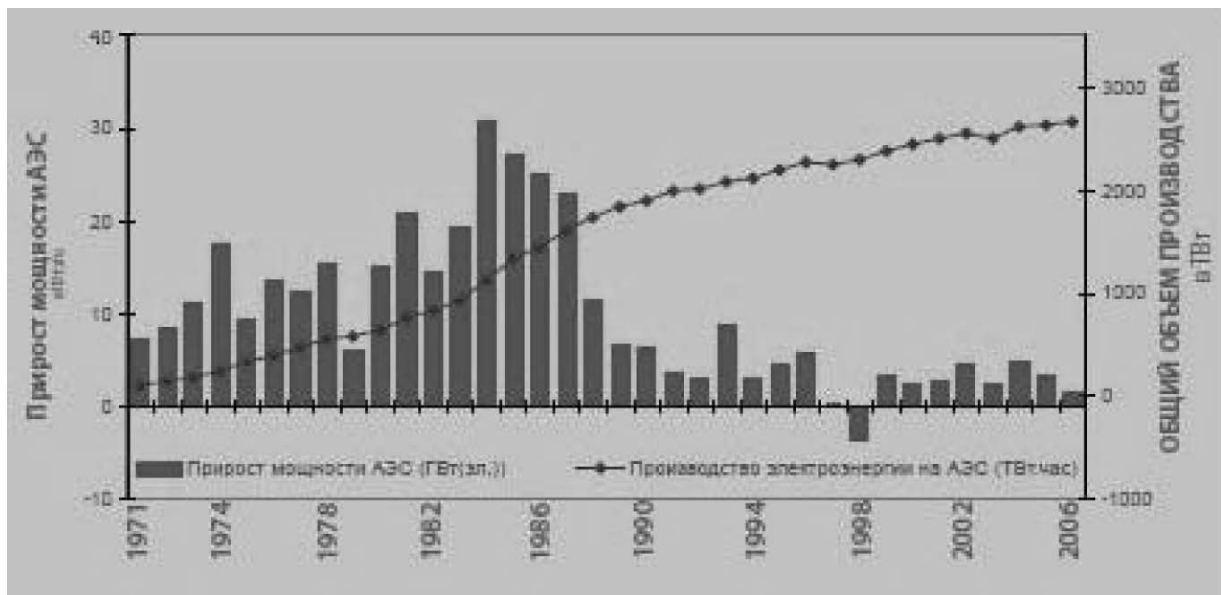


Рис. 3. Зростання потужностей та виробництва електроенергії на АЕС світу з 1971 р. по 2006 р. [16]

останніми десятиліттями знизилися і становили в середньому 1,36% на рік.

За даними [20], за період від початку використання ядерної енергії до теперішнього часу сумарна кількість радіоактивних відходів, з якими проводилися якісь дії у всьому світі, включаючи сукупні обсяги похованих відходів, становить  $\sim 41,0$  млн  $\text{м}^3$  відходів низької та середньої активності, 200,0 тис. тВМ відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), 0,4 млн  $\text{м}^3$  високоактивних відходів і 2,0 млрд  $\text{м}^3$  залишків, що надійшли із циклу виробництва урану. Переважна більшість високоактивних відходів ( $\sim 89\%$ ) є результатом діяльності з розробки зброї в США і колишньому СРСР. Велика частина цих відходів знаходиться у необробленій формі. Середньорічні глобальні темпи захоплення відходів усіх класів в сукупності становлять приблизно 3,0 млн  $\text{м}^3$  на рік, насамперед відходів з низькою або дуже низькою активністю. Річне накопичення високоактивних відходів досить постійне і становить  $\sim 850,0$   $\text{м}^3$  за рік.

Крім того, в подальшому буде наростати обсяг відходів з АЕС, що припинили своє функціонування внаслідок відпрацювання нормативних строків. До кінця століття мають бути виведені з експлуатації всі сьогоденні АЕС світу, а також всі збудовані АЕС до 2060–2080 рр. За 2%-го зростання потужностей АЕС до 2100 року їх встановлена потужність сягне 2269–2300 ГВт. Вивести ж з експлуатації за період 2015–2100 рр. необхідно буде 3000–3100 ГВт потужностей АЕС. За даними [21] питома активність конструкцій АЕС, які виводяться з експлуатації, становить від 3 до 5,7 тис. Ки/МВт, що вилетється для світу у цифру  $\sim 13,3$  млрд Ки ( $\sim 4,9 \cdot 10^{20}$  Бк).

При активності ВЯП 790 тис. Ки/т (після трирічної витримки у басейні) [22] з урахуванням наведених вище обсягів, напрацьований рівень активності від ядерних технологій за станом на 2010 р. становить  $\sim 1,5 \cdot 10^{12}$  Ки, що рівнозначно  $2,68 \cdot 10^{-13}$  Ки/г для речовини 16-кілометрового шару континентальної земної кори.

Загальна ж природна активність 16-кілометрового шару континентальної кори з урахуванням  $^{40}\text{K}$  становить  $484,25 \cdot 10^{-13}$  Ки/г, тобто збільшення цієї активності за рахунок діяльності людини – 0,55 %.

Сьогодні таке збільшення здається незначним і не вартим великої уваги. Але необхідно

зауважити, що такий результат досягнуто при збільшенні потужностей АЕС від нуля до сучасного рівня за 55 років. За подальші 50–90 рр., навіть в разі збереження досягнутого рівня приростів (2% на рік), кількість напрацьованих відходів буде значно більшою. Її легко обчислити за такою формулою:

$$\Sigma = \Sigma_1 + \Sigma_t = \Sigma_1 + A_0 \int_0^t ta' dt, \quad \text{де } \Sigma_1 \quad (1)$$

накопичена активність за період, що передує періоду  $t$ , Ки;

$\Sigma_t$  – загальна сума накопиченої активності за період  $t$  років, Ки;

$A_0$  – темпи приросту активності на початку періоду  $t$ ;

$a$  – коефіцієнт приросту потужностей на АЕС за період  $t$ .

Виконавши інтегрування виразу (1), отримаємо

$$\begin{aligned} \Sigma &= \Sigma_1 + \Sigma_t = \\ &= \Sigma_1 + \frac{A_0}{\ln a} \left[ a^t \left( t - \frac{1}{\ln a} \right) + \frac{1}{\ln a} \right]. \quad (2) \end{aligned}$$

Таким чином, приймаючи значення накопиченої активності на початок періоду як суму природної активності 16-кілометрового шару континентальної кори з урахуванням  $^{40}\text{K}$ , яка становить  $484,25 \cdot 10^{-13}$  Ки/г та значення накопиченої активності у період з 1956 р. по 2010 р. від роботи АЕС, при темпах зростання ядерної енергетики 2% на рік (коефіцієнт  $a=1,02$ ) на період 2011–2100 рр. з початковим темпом приросту активності  $A_0 = 0,0545 \cdot 10^{12}$  Ки/рік (за станом на 2010 р.), можемо знайти значення загальної активності у заданому році.

Отже, до кінця століття ( $t = 90$  років) при темпах зростання ядерної енергетики 2% на рік (коефіцієнт  $a=1,02$ ) і початкових темпах приросту активності  $A_0=0,0545 \cdot 10^{12}$  Ки/рік (за станом на 2010 рік), а також для значення  $\Sigma_1 = 1,5 \cdot 10^{12}$  Ки, отримуємо напрацьовану активність в 2100 році у розмірі  $\Sigma = 786,58 \cdot 10^{12}$  Ки. До цієї кількості активності необхідно додати активність залишків ядерних об'єктів, яку можна оцінити як збільшену у 1,5–2 рази активність залишків АЕС (демонттованих), тобто це  $\sim 1,6 \cdot 10^{10}$  Ки.

Таким чином, у кінці XXI століття напрацьована питома активність 16-кілометрового шару

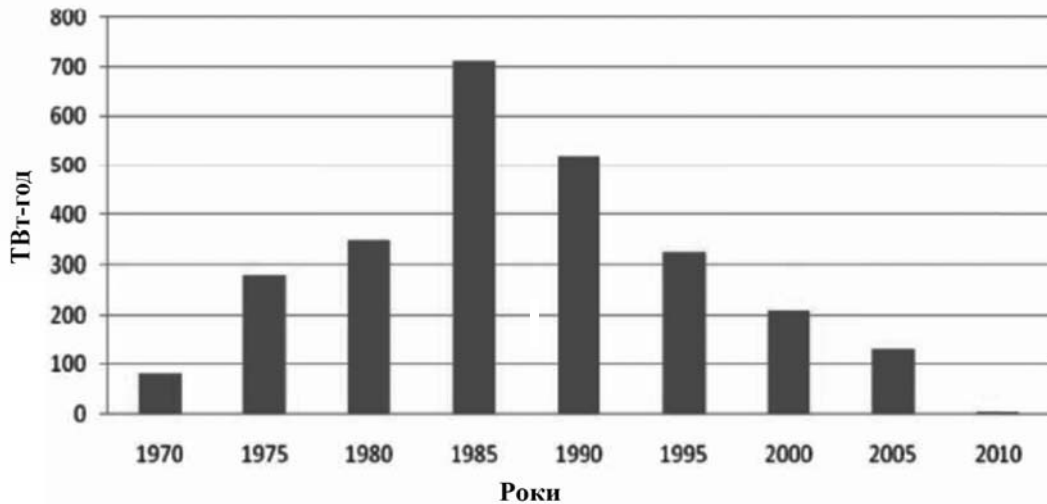


Рис. 4. Реальні прирости виробництва електроенергії на АЕС світу [23]

континентальної кори становитиме  $1405 \cdot 10^{-13}$  Ки/г, що вже більше природної у 2,9 рази. Як бачимо, гра з малими цифрами на великих проміжках часу є справою досить небезпечною.

Необхідно відзначити, що усвідомлення небезпеки розвитку ядерної енергетики світовою спільнотою вже відбулося. Про це свідчать дані приростів виробництва електроенергії атомними електростанціями. На рис. 4 наведено такі дані за період 1970–2010 рр. [23]. З цього рисунка видно, що реальні прирости виробництва енергії на АЕС у 2010 р. знизилися практично до нуля. Не справдилися прогнози щодо розвитку атомної енергетики Міжнародного Агентства з Атомної Енергетики (МАГАТЕ). Так, у 1974 р. Агентством прогнозувалося, що у 2000 р. у світі мало діяти 4500 реакторів [24]. Разом з тим, за даними того ж МАГАТЕ на 1 квітня 2009 р. працювало всього 438 реакторів та 34 знаходилися в стадії будівництва [25]. Цілком імовірно, що прогноз розвитку атомної енергетики, наведений на рис. 2, також нереальний.

## ВИСНОВКИ

1. Загальна напрацьована радіоактивність земної кори з року в рік невпинно зростає.
2. Засобів боротьби із зростанням радіоактивності не існує і не передбачається, що такі засоби можуть бути створені найближчим часом.
3. Усвідомлення незворотності цього процесу відбулося в передових промислово розвинених країнах світу і процеси нарощування потужностей АЕС у цих країнах зупинено.

4. Імовірно, що процес нарощування потужностей АЕС все ж буде відбуватися за рахунок розвитку ядерних енергетик країн, що розвиваються.

5. Темпи такого приросту прогноуються на рівні 21,5–2% щорічно.

6. Українська ядерна енергетика, яка є однією з найпотужніших у світі (на АЕС у 2010 р. було вироблено 47,3% всієї електроенергії), і яка займає друге місце після Франції, потребує переосмислення і її подальший розвиток має відбуватися зі зниженням темпів нарощування. Доцільні обсяги виробництва електроенергії на АЕС на період до 2100 року мають бути ретельно обґрунтовані без використання міфів про її безпечність та економічність.

7. Доцільним є проведення комплексу досліджень з питань розвитку ядерної енергетики з об'єктивними науково обґрунтованими положеннями без залучення фахівців, що скомпрометували себе як прихильники беззастережного розвитку ядерної енергетики за будь-яку ціну, незважаючи на небезпеки накопичення відходів від АЕС, що вже прогноуються майбутнім поколінням.

1. Бердоносів С.С. Радиоактивные ряды / С.С. Бердоносів // <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3794.html> > Радиоактивные ряды </a>.
2. Радиоактивность горных пород // Большая Советская энциклопедия (в 30-ти томах) / Гл. ред. А.М. Прохоров. Изд. 3-е. – М.: Советская Энциклопедия, 1975. – Т. 21. – С.345–346.
3. Сорохтин О.А. Развитие Земли /

О.А. Сорохтин, С.А. Ушаков. – М.: Изд. МГУ, 2002. – 506 с.

4. *Активность* (радиоактивного источника). Материал из Википедии – свободной энциклопедии. – Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C\\_%D0%B2\\_%D1%8F%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B9\\_%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B5](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%B2_%D1%8F%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B5).

5. *Давыдов М.Г.* Радиоэкология [Электронный ресурс] / М.Г. Давыдов // Радиоактивность литосферы. – Режим доступа: <http://www.phys.rsu.ru./web/nuclear/radiology/fRE6.htm> – Загл. с экрана.

6. *Уран* (элемент): Физические свойства. Материал из Википедии – свободной энциклопедии. – Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%BD\\_%28%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%29](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%BD_%28%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%29).

7. *Меньшиков В. Ф.* Атомная энергетика сегодня / В.Ф. Меньшиков // В кн.: Россия в окружающем мире: 2004 (Аналитический ежегодник). Под общ. ред. Н.Н. Марфенина, С.А. Степанова. – М.: Модус-К-Этерна, 2005. – 320 с.

8. *Испытания*, 1996. Испытания ядерного оружия и ядерные взрывы в мирных целях в СССР. 1949–1990 гг.: Информац. Издание. – М.: ВНИПИпромтехнология. – 69 с. (<http://nrc.sarov.ru/issues/peaceful.html>).

9. *Яблоков А.В.* Миф о безопасности и эффективности мирных подземных ядерных взрывов / А.В. Яблоков. – М.: ЦЭПР, 2003. – 176 с.

10. *UN. Sources and Effects of Ionizing Radiation* // United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. – New York, 1993. – 922 p.

11. *Радиация. Дозы, эффекты, риск* / Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 80 с.

12. *UN. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation* // United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1988 Report to the General Assembly, with Annexes. – New York, 1988. – 647 p.

13. *Израэль Ю.А.* Радиоактивное загрязнение природных сред при подземных ядерных взрывах и методы его прогнозирования / Ю.А. Израэль, В.И. Петров, А.Я. Прессман,

и др. – Л.: Гидрометиздат, 1970. – 75 с.

14. *2010 Key World Energy Statistics*. – Paris: IEA, 2010. – 80 p.

15. *Nuclear Power / IEA Energy Technology Essentials* / – Paris: OECD/IEA 2007. – 4 p.

16. *Макдоланд Алан* Ядерная энергетика: положение дел в мире (Взгляд на производство электроэнергии на АЭС во всём мире и его будущие перспективы) / Алан Макдоланд // Бюллетень МАГАТЭ 49-2, март 2008. – С. 45–48.

17. *Key World Energy Statistics 2008*. – Paris: IEA, 2008. – 80 p.

18. *2011 Key World Energy Statistics*. – Paris: IEA, 2011. – 80 p.

19. *2012 Key World Energy Statistics*. – Paris: IEA, 2011. – 80 p.

20. *Дидье Лува* Замкнуть цикл / Дидье Лува, Фил Меткалф // Бюллетень МАГАТЭ 51-2, Апрель 2010. – С. 20–23.

21. *Радиоактивные отходы* при выводе АЭС из эксплуатации. – Режим доступа: (<http://www.greenworld.org.ru/?q=book/export/html/377>).

22. *Элементный* и изотопный состав ОЯТ. – Режим доступа: ([http://profbeckman.narod.ru/RN0.files/26\\_4.pdf](http://profbeckman.narod.ru/RN0.files/26_4.pdf)).

23. *Нечаев А.Ф.* Ядерная энергетика: томительное ожидание ренессанса с «широко закрытыми» глазами / А.Ф. Нечаев // Доклад на VIII Международной конференции «Безопасность ядерных технологий: экономика безопасности и обращение с источниками ионизирующих излучений» (Санкт-Петербург, октябрь 2005). – С.-Петербург: ГТИ, 2005.

24. *Основные* проблемы и современное состояние безопасности предприятий ядерного топливного цикла / Bellona Foundation, 2002.

25. *Сайт МАГАТЭ*. <http://www.iaea.org/cgi-bin/db.page.pl/pris.charts.htm>.

Надійшла до редколегії 15.03.2013

Рецензент

ст. наук. співроб. відділу

науково-організаційної роботи

ІЗЕ НАН України, канд. фіз.-мат. наук

В.А. Огородник