

DOI

УДК 621.313.320

Долін В.В., Забулонов Ю.Л., Копиленко О.Л., Шраменко І.Ф.

Долін В.В., доктор геологічних наук, професор, факультет цивільного та промислового будівництва Пізанського Університету (Італія) Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», ORCID: 0000-0001-6174-2962, vdolin@ukr.net

Забулонов Ю.Л., доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», ORCID: 0000-0002-4517-9927, Zabulonov@nas.gov.ua

Копиленко О.Л., доктор юридичних наук, професор, академік НАН України, Народний депутат України, ORCID: 0000-0003-2644-151X, Kopylenko@nas.gov.ua

Шраменко І.Ф., кандидат геолого-мінералогічних наук, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», ORCID: 0000-0001-7746-2332, shramenko_ivan@ukr.net

ГЛОБАЛЬНІ ТЕНДЕНЦІЇ В АТОМНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

Стаття присвячена аналітичному дослідженню та параметризації динаміки світового ядерно-енергетичного комплексу від першої самопідтримуваної ланцюгової реакції до наших днів. Бурхливий розвиток ядерної енергетики у 1970–1980-х роках істотно сповільнився на початку третього тисячоліття. Динаміка нарощування експлуатаційних потужностей являє собою лінійну розгортку завершеного витка спіралі розвитку. Майже 90 % електроенергії в атомній енергетиці в 1970–2021 роках було вироблено легководними реакторами типу PWR і BWR. Очікується, що до 2077 року їхній технологічний ресурс буде вичерпано на 99 %. При збереженні нинішніх темпів розвитку частка електроенергії, виробленої на АЕС у світі, до того часу зменшиться до 1,5 %. Атомні потужності в Європі та Америці скорочуються, натомість розвиваються в Азії, зокрема в Китаї, де розташовано майже 70 % АЕС, що будуються. Темпи падіння видобутку урану вказують на те, що до 2040 року буде задоволено не більше половини світових потреб у ядерному паливі. Безпека та захищеність ядерно-енергетичного комплексу істотно знижуються із зростанням потужності реакторів, розбіжність між розрахунковими та спостережуваними ймовірностями важкої радіаційної аварії досягає двох порядків величини. Унаслідок сучасного прояву великодержавного ядерного тероризму глобальна система ядерної та фізичної ядерної безпеки потребує докорінної перебудови. Подальший розвиток ядерної енергетики вимагає «технологічного стрибка». Наразі не існує технології, доступної для широкого впровадження, яка могла б збільшити потужність ядерних реакторів на порядок, без шкоди для ядерної безпеки, особливо враховуючи, що термоядерний реактор навряд чи буде широко впроваджено в найближчі кілька десятиліть. Технологічним мостом між існуючими і майбутніми розробками можуть стати малі модульні реактори, які в короткостроковій перспективі здатні пом'якшити дефіцит енергопостачання.

Ключові слова: атомна енергетика, ядерний реактор, темпи розвитку, вичерпання технологічних можливостей, сировинна база, ядерна та радіаційна безпека, термоядерний синтез, малі модульні реактори.

До 80-річчя першої самопідтримуваної ядерної реакції
До 95-річчя з дня народження академіка Е.В. Соботовича

Головні проблеми людства – це енергія і відходи. У широкому сенсі відходи – це побічний результат нашої діяльності з виробництва енергії та її використання. Нам необхідно виграти час, поки ми зуміємо створити безвідходні технології отримання енергії. Поки що найбільш прийнятне, що ми маємо – ядерна, а в майбутньому – термоядерна енергетика. На жаль, вони не безвідходні...

Е.В. Соботович

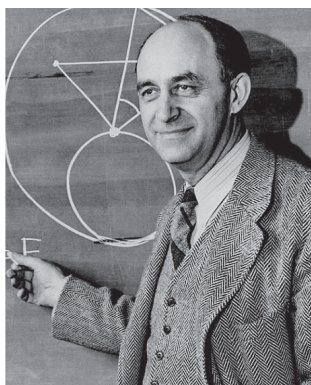
Вступ

Ера атомної енергетики розпочалася 80 років тому, коли в грудні 1942 року вперше у світі нобелівський лауреат Енріко Фермі експериментально продемонстрував ланцюгову реакцію, що самопідтримується [1; 2].

Ще в січні 1939 року Фермі висловив думку, що при розпаді ядра урану слід очікувати випромінювання швидких нейтронів. Якщо кількість нейтронів, що вилетіли, буде більше, ніж кількість поглинутих, то

тоді шлях до ланцюгової реакції буде відкрито. Проведений експеримент підтвердив наявність швидких нейтронів, хоча їх питома кількість за один акт поділу залишилася невизначеною.

Навесні 1941 року Фермі почав працювати над теорією ланцюгової реакції в уран-графітовій системі. Вже влітку почалася серія експериментів, головним завданням яких було вимірювання нейтронного потоку. Разом з Г. Андерсоном було поставлено близько



Енріко Фермі (1901–1954)
Enrico Fermi (1901–1954)



Е.В. Собо́тович (1927–2013)
E.V. Sobotovich (1927–2013)

тридцяти дослідів, і в червні 1942 р. було отримано коефіцієнт розмноження нейтронів більше одиниці. Це означало можливість отримання ланцюгової реакції у досить великій решітці з урану та графіту і послужило початком розробки конструкції реактора. Фермі зробив поправку до отриманого значення коефіцієнта розмноження і врахував це у розмірах запланованого котла, розробив метод визначення критичних розмірів системи. Передбачивши, що атмосферний азот істотно поглинатиме нейтрони, Фермі напліг на розміщенні усього величезного пристрою реактора в гігантський намет з матерії для оболонок аеростатів. Таким чином з'явилася можливість підтримувати відповідний склад атмосфери навколо реактора. Будівництво реактора почалося в Металургійній лабораторії університету Чикаго в жовтні, а закінчилося 2 грудня 1942 року.

Перша в світі атомна електростанція потужністю 5 МВт була введена в дію в червні 1954 року в Обнінську. Розвинені індустріальні країни розпочали проектування та будівництво АЕС з реакторами різних типів. До 1964 року сумарна потужність АЕС у світі зростає до 5 млн кВт; до 1968 року в світі працювали на АЕС 365 енергоблоків сумарною встановленою потужністю 253 млн кВт.

Розроблені різними країнами типи та конструкції реакторів з різними уповільнювачами та теплоносіями стали основою національної енергетики. Найпоширенішими є реактори на теплових нейтронах. У США – це передусім водо-водяні реактори під тиском і киплячі реактори, у Канаді – важководні реактори на природному урані, у колишньому СРСР – водо-водяні реактори під тиском (ВВЕР) та графітові каналні реактори (РВПК).

Зростає одинична потужність реакторів. Так, реактор РВПК-1000 електричною потужністю 1000 МВт був встановлений на Ленінградській АЕС у 1973 році. Наразі розробляються реактори вдвічі більшої потужності. Потужність великих АЕС, наприклад, найбільшої в Європі Запорізької АЕС, досягла 6000 МВт. Найпотужнішою в світі АЕС є Kashiwazaki Kariva (Японія) потужністю 8200 МВт (7 реакторів типу BWR встановленою потужністю 1100–1356 МВт).

Враховуючи, що блоки АЕС працюють практично з постійною потужністю, й покривають базову частину добового графіку навантажень об'єднаних

енергосистем, у сполученні з АЕС у світі будувалися високоманеврені ГАЕС з метою покриття змінної частини графіку та закриття нічного провалу у графіку навантажень.

Ядерні аварії

Високі темпи розвитку атомної енергетики не відповідали рівню її безпеки. У Радянському Союзі при навчанні операторів АЕС широко впроваджувався підхід до ядерного реактора, як до топки звичайного парового котла. Аварійні ситуації, що супроводжувалися значними викидами радіоактивності та опроміненням персоналу, ретельно приховувалися. З 1952 до 2019 рр. у світі зафіксовано 11 крупних радіаційних аварій з розплавом активної зони реактора 4–7 рівня за Міжнародною шкалою ядерних подій (INES).

Серйозний удар розвитку атомної енергетики було завдано важкою аварією на АЕС «Три Майл Айленд» у США у 1979 році. Це спричинило радикальний перегляд вимог безпеки, посилення чинних нормативів і перегляд програм розвитку АЕС у всьому світі. Важка аварія на Чорнобильській АЕС в Україні у 1986 році, що кваліфікується за міжнародною шкалою ядерних подій як аварія найвищого сьомого рівня, призвела до екологічної та гуманітарної катастрофи, подолання наслідків котрої перекинуто на плечі наступних поколінь, підірвала довіру світового співтовариства до атомної енергетики.

У багатьох країнах були призупинені програми розвитку атомної енергетики, а в деяких – взагалі відмовилися від планів її розвитку. Незважаючи на це, вже до 2000 року на АЕС, що експлуатувалися 37 країнами, вироблялося 16 % світового виробництва електроенергії. Ще одним тяжким ударом для світової атомної енергетики стала аварія сьомого рівня на японській АЕС «Фукусіма-1» 11 березня 2011 року.

Ці події спричинили перегляд планів щодо будівництва АЕС. Серед тих, хто вирішив відмовитися від планів будівництва АЕС на своїй території, Венесуела та Таїланд. 20 квітня 2011 року Парламент Італії прийняв закон про відмову від розвитку ядерної енергетики в країні, що є прямим наслідком впливу аварії на японській АЕС. Рішення про призупинення експлуатації 7 ядерних блоків, які були побудовані до 1980 року,

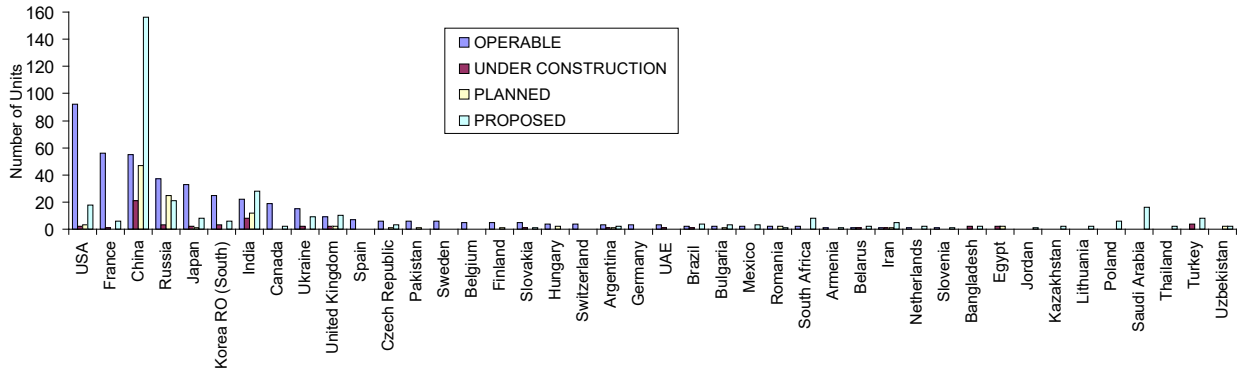


Рис. 1. Ядерні реактори у світі станом на січень 2023 р. Джерело даних: бази даних Всесвітньої ядерної асоціації (WNA) та МАГАТЕ (IAEA) [6, 7].

Fig. 1. State and forecast of construction of the nuclear power plants as of February 2023 (data are from WNA and IAEA database [6, 7] dated 24.02.2023).

прийняв уряд Німеччини. Швейцарія також прийняла рішення призупинити реалізацію нових проєктів будівництва ядерних енергоблоків.

Водночас Франція, Чехія, Польща, Словаччина заявили, що не збираються переглядати свої програми розвитку ядерної енергетики. Україна, Індія, Китай, Росія і Білорусь продовжують розвивати власний ядерний паливний комплекс.

До аварії на «Фукусіма-1» у світі експлуатувалося 440 ядерних енергоблоків, у стадії будівництва знаходилося 65 ядерних енергоблоків. Спорудження ще 150 ядерних енергоблоків було заплановано у найближчі 10 років та понад 200 проєктів передбачалося реалізувати в більш довготривалій перспективі. Станом на 1 квітня 2011 року виробництво електроенергії на АЕС у світі складало 14 % від її загального обсягу.

За минулі 12 років спостерігається не лише зменшення темпів розвитку ядерної енергетики, а й помітний спад. Станом на січень 2023 р. у світі експлуатується 438 реакторів, будується 58, планується будівництво 104, у віддаленій перспективі – 341, частка виробництва електроенергії на АЕС до 2019 р. скоротилася до 10.3 %.

Провідне місце в ядерному енергетичному комплексі світу обіймають США, в яких на початок 2023 р. в експлуатації було 92 ядерних реактора (104 у 2011 р.) загальною потужністю майже 95 ГВт(є) Японія після катастрофи 2011 р. зменшила кількість енергоблоків з 54 до 33, що перемістило її ядерно-енергетичний комплекс (ЯЕК) на 5 місце в світі. Друге місце в цьому переліку наразі обіймає Франція (56 реакторів проти 58 у 2011 р.) Інтенсивний розвиток ЯЕК в Китаї та Індії вивів їх потужності відповідно на 3 та 7 місце в світі, перемістивши Канаду та Україну на восьме і дев'яте відповідно (рис. 1). У той час, як в Європі, Америці та Канаді кількість працюючих ядерних реакторів зменшується, у Китаї будується 21 реактор та заплановано в перспективі понад 200, в Індії – 8 та 40 відповідно. Обговорюються плани спорудження АЕС у Польщі, Литві, Казахстані, ПАР та Саудівській Аравії (рис. 1).

Структура виробництва електроенергії реакторами АЕС

Наразі у світі експлуатуються наступні типи ядерних енергетичних реакторів [3]:

1) PWR (pressurized water reactor) – водно-водяний реактор під тиском, в якому легка вода є теплоносієм і сповільнювачем (наприклад ВВЕР);

2) BWR (boiling water reactor) – киплячий реактор, в якому, на відміну від PWR, утворення пари, що подається на турбіни, відбувається безпосередньо в реакторі;

3) FBR (fast breeder reactor) – реактор-розмножувач на швидких нейтронах, що не вимагає наявності сповільнювача;

4) GCR (gas-cooled reactor) – газоохолоджуваний реактор. У ролі сповільнювача використовується за правилом графіт;

5) LWGR (light water graphite reactor) – легководний графітовий реактор, наприклад РВПК;

6) PHWR (pressurised heavy water reactor) – важководний реактор під тиском;

7) HTGR (high-temperature gas-cooled) – високо-температурний газоохолоджуваний реактор;

8) HWGCR (heavy water-moderated, gas-cooled reactor) – газоохолоджуваний реактор з важководним сповільнювачем;

9) HWLWR (heavy water-moderated, boiling light-water-cooled reactor) – киплячий реактор зі сповільнювачем з важкої води;

10) PBMR (pebble bed modular reactor) – модульний реактор з кульовими ТВЕЛами;

11) SGHWR (Steam-Generating Heavy Water Reactor) – киплячий важководний реактор.

За півстоліття (1970–2021) енергоблоками АЕС вироблено $9.2 \cdot 10^{17}$ Вт·год електроенергії. Понад 2/3 цього обсягу вироблено водо-водяними реакторами PWR та ВВЕР, 21 % – киплячими легководними реакторами BWR (рис. 2). Важководними PHWR, легководними графітовими LWGR (РВПК), газоохолоджуваними GCR реакторами вироблено близько 12 % електроенергії, на решту – разом припадає менше 1 %.

Таблиця 1. Параметри моделювання інтегральних показників генерування електроенергії

Table 1. Parameters used in the simulation of integrated energy generation

Reactor system	A	B	k	R	Forecast for equilibrium limit	
					IEG, 10^{A+B} , 10^7 GW(e)	Expected year of 99% achievement
Total IEG	5.04	2.94	0.071	0.99	9.55	2077
PWR	4.51	3.29	0.073	0.99	6.31	2073
BWR	4.42	2.85	0.079	0.99	1.86	2064
PHWR	3.53	3.09	0.084	0.99	0.417	2057
LWGR	0.09	6.23	0.162	0.98	0.207	2015
GCR	4.72	1.74	0.077	0.99	0.288	2065

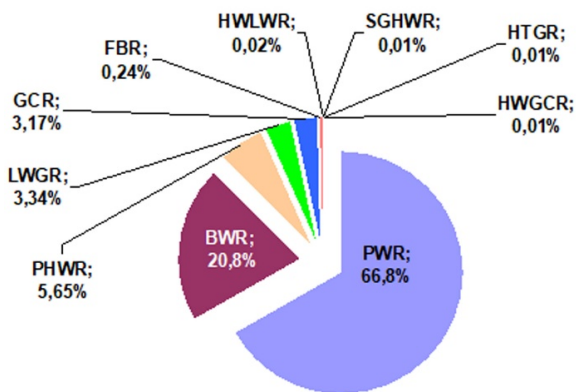


Рис. 2. Структура згенерованої ядерними реакторами електроенергії (1970–2021). Розраховано за даними WNA та IAEA [6; 7].

Fig. 2. Total nuclear electricity produced in the period 1970–2021, as calculated using WNA and IAEA databases [6; 7].

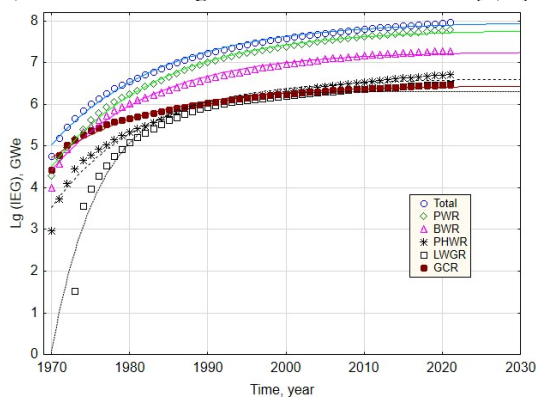


Рис. 3. Інтегральні показники генерування електроенергії (IEG) різними типами ядерних реакторів. Побудовано з використанням бази даних WNA [6] та IAEA. Розраховано за даними WNA та IAEA [6; 7].

Fig. 3. Integrated Energy Generation (IEG) by different type of nuclear reactors. Shown trends are calculated based on WNA and IAEA databases [6; 7]

Загальні тенденції щодо уповільнення розвитку ЯЕК ілюструються інтегральним показником згенерованої електроенергії, який відображає сумарну

її величину за проміжок часу, починаючи від 1970 р. (рис. 3). Тобто кожна точка відображає загальну кількість електроенергії, згенерованої реакторами відповідного типу від 1970 р. до часу, який відповідає цій точці.

У напівлогарифмічних координатах цей показник з високою вірогідністю апроксимується рівнянням кінетики I порядку для незворотного процесу:

$$Lg(IEG) = A + B(1 - e^{-kt}), \quad (1)$$

де A і B – коефіцієнти, що визначають початкові (A) та кінцеві (рівноважні) (A+B) умови процесу, k – константа швидкості, t – час. Величина константи швидкості визначає крутизну кривої та швидкість асимптотичного досягнення стану рівноваги.

Параметри апроксимації, визначені методом ітерації за допомогою програми STATISTICA, статистично достовірно ($R > 98\%$) свідчать, що вичерпання можливостей сучасних технологій, які ґрунтуються на поділі ядер важких елементів, в ядерній енергетиці прогнозується до кінця нинішнього століття. Константа швидкості генерування енергії для всіх типів реакторів, за виключенням легководних графітових, становить $0.077 \pm 10\%$ рік⁻¹ (табл. 1). Що стосується реакторів LWGR (РВПК), то судячи з результатів моделювання ($k=0.162$ рік⁻¹), можливості цієї технології вже вичерпано (табл. 1, рис. 3).

Сучасна криза в ядерній енергетиці

Беручи до уваги найбільш віддалену прогнозу дату – 2077 рік, слід зазначити, що глобальний розвиток ЯЕК знаходиться в умовах кризи. Нормативний термін експлуатації більшості ядерних реакторів 30 років наразі продовжується до 45–55 років. Називається навіть термін 60 років, що аж ніяк не сприяє дотриманню принципів ядерної безпеки. З 438 реакторів, які знаходяться в експлуатації, 27 (17,405 МВт(е)) працюють понад 50 років, 142 (112,983 МВт(е)) – понад 40, 298 (266,784 МВт(е)) – понад 30 (рис. 4). Тобто майже 70 % ядерно-енергетичних потужностей у світі виробило свій нормативний ресурс. Навіть враховуючи подовження термінів, у найближчі 10 років від 100 до 150 реакторів буде виведено з експлуатації. Натомість у стадії будівництва – 58 реакторів загальною потужністю 60,462 МВт(е), які повинні вводитися

в експлуатацію в цей же період. Тобто наявно двократний прогнозний дефіцит ядерно-енергетичних потужностей, які будуть уведені та виведені з експлуатації порівняно з сьогоденням.

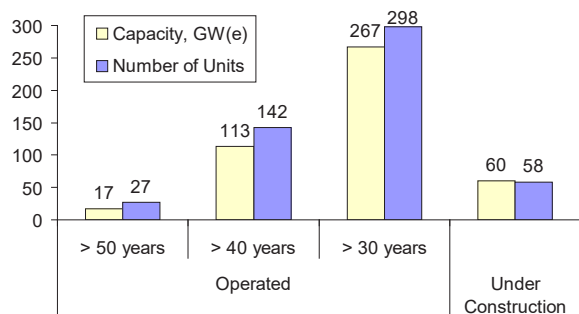


Рис. 4. Потужності ядерної енергетики, що експлуатуються понад 30 років. Побудовано з використанням бази даних (WNA) [6; 7]

Fig. 4. Nuclear units in exploitation over 30 years. Plotted using the WNA database [6; 7]

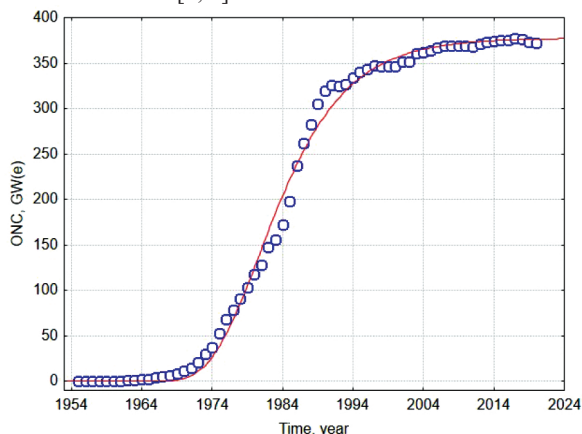


Рис. 5. Глобальна еволюція діючих ядерно-енергетичних потужностей (ONC – Operable Nuclear Capacity). Побудовано у 2012 р. [8] з використанням бази даних WNA [6; 7]

Fig. 5. Global evolution of Operable Nuclear Capacity (ONC). Plotted in 2012 [8] including the reactor under construction. Shown trend is calculated based on WNA database [6; 7]

На рубежі другого і третього тисячоліття нашої ери безвідносно до крупних радіаційних аварій у світі спостерігається початок технологічної кризи в ядерній енергетиці. Понад 10 років тому в роботі [8] ми звернулися до проблеми вичерпання сучасних технологічних можливостей процесу поділу ядер важких елементів (рис. 5). Точки, нанесені на графік починаючи з 2012 р., відображали прогнозні величини, наведені в той час у базі даних WNA. Розвиток ядерної енергетики з високою достовірністю ($R^2 = 0,99$) було описано кривою вигляду:

$$ONC = e^{k_1(1-e^{-k_2t})}, \quad (2)$$

де ONC (Operable Nuclear Capacity) – загальна потужність реакторів АЕС з урахуванням виведених

з експлуатації, $\text{ГВт (ел.)} \cdot \text{рік}^{-1}$, k_1 та k_2 – константи швидкості розвитку ядерної енергетики, які відображають об'єктивні і суб'єктивні чинники еволюції (зростання світових потреб в електроенергії, демографію, зростання добробуту, технологічні обмеження, економічна доцільність, громадська думка тощо), рік^{-1} . Форма кривої цілком відповідає законам діалектики, сучасним уявленням щодо розвитку суспільства та фактично являє собою розгорнуту лінійну проекцію завершеного витка спіралі розвитку.

Серед чинників уповільнення глобального розвитку ЯЕК слід зазначити:

1. Вичерпання можливостей технології поділу ядер важких елементів.

Сучасний етап розвитку ЯЕК, який продовжиться ще протягом півстоліття (див. табл. 1), визначається головним чином будівництвом водо-водяних реакторів PWR. Найпростішим і найефективнішим засобом покращання економічних показників АЕС та зростаючих енергетичних потреб видається збільшення потужності ядерного реактора без принципової зміни його систем. Кожне еволюційне удосконалення легководних ядерних реакторів супроводжувалося підвищенням електричної потужності. Інноваційні розробки досягають $1400\text{--}1600 \text{ МВт(ел.)} \cdot \text{рік}^{-1}$, що сприяє зниженню вартості кожного кіловата встановленої потужності на 15–20 % [9]. Протягом 1954–1973 рр. потужність реактора було збільшено у 200 разів: від 5 до 1000 МВт(ел.). Протягом наступних 50 років вдалося збільшити потужність реактора на 40–60 % (~1,5 разів). Наразі не існує технологічної розробки, котра б передбачала істотне (на порядок) збільшення потужності без шкоди показникам ядерної та радіаційної безпеки.

Єдина відома на сьогодні технологія, яка б дозволила здійснити такий «технологічний прорив» – **термоядерний синтез**.

Проект міжнародного реактора-ТОКАМАКА ITER показав, що така машина може бути побудована при сучасному рівні розвитку технології та буде здатна провести фізичні й ядерно-технологічні випробування, необхідні для створення першої дослідної термоядерної електростанції. Очікувалося, що ITER почне роботу в 2010–2011 рр. і закінчить свою програму до 2030–2031 рр. До того часу може бути побудована і перша дослідна термоядерна електростанція на основі ТОКАМАКУ. На жаль, незважаючи на поширений оптимізм (із 1950-х років, коли перші дослідження розпочались), істотні перешкоди між сьогоднішнім розумінням процесів ядерного синтезу, технологічними можливостями та практичним використанням ядерного синтезу досі не подолано. У червні 2016 року Рада ITER схвалила оновлений ресурсно-навантажений комплексний графік через First Plasma; на своєму наступному засіданні в листопаді 2016 року було оновлено графік до початку дейтерієво-тритієвої операції у 2035 році. За базовим сценарієм 2016 року перша плазма була запланована на грудень 2025 року. Імовірно з низки об'єктивних причин ці терміни буде подовжено [10].

Прогнозується, що внаслідок впровадження термоядерного реактора істотно зменшаться обсяги радіоактивних відходів. Проте у роботі [11] наводиться оцінка, що загальний обсяг радіоактивних відходів буде порівняльним із звичайними ядерними реакторами, та що частина цих відходів вимагатиме довготривалого зберігання.

Реалізація проекту термоядерного енергетичного реактора призведе до загострення тритієвої проблеми. Генерування тритію в термоядерному реакторі – близько $1 \cdot 10^{19}$ Бк \times ГВт⁻¹ – на порядок перевищує його природний вміст у біосфері, а викид в навколишнє середовище – на чотири порядки більше, ніж у сучасних ядерних реакторах [8; 12].

2. Вичерпання сировинної бази для виготовлення ядерного палива.

Загальні світові ресурси урану, як і будь-якого іншого мінералу чи металу, точно невідомі. Єдиним значущим показником довгострокової безпеки постачання є перспективні ресурси. Визначені ресурси, які можна видобути (перспективні плюс прогнозні ресурси), у цій категорії до 130 доларів США/кг U становлять 6 147 800 т [13]. Загальні ідентифіковані ресурси, що видобуваються, у цій категорії до \$260/кг U становлять 8,070 мільйонів тонн U. Відомі світові ресурси урану зросли щонайменше на чверть за останнє десятиліття завдяки активізації розвідки корисних копалин.

Водночас, розробка родовищ урану з використанням буро-вибухових технологій або підземним вилугуванням спричинює проблему екологічно безпечного закриття (post-mining) добувних підприємств унаслідок накопичення великих об'ємів небезпечних відходів, формування ділянок активної атмосферної міграції радону, геохімічного забруднення і руйнування ландшафтів.

Нинішніх перспективних світових ресурсів урану (6,15 Мт) у вартісній категорії, утричі нижчій за сучасні спотові ціни, достатньо для забезпечення атомної енергетики приблизно на 90 років. Це рівень гарантованих ресурсів вище, ніж зазвичай для більшості корисних копалин. Подальша розвідка та вищі ціни, безсумнівно, на основі сучасних геологічних знань дадуть додаткові ресурси, оскільки поточні вичерпуються.

Крім родовищ, існує низка вторинних джерел урану техногенного та природного походження: цивільні запаси, військові боеголовки, хвостосховища збагачувальних фабрик тощо, а також родовища фосфоритів, рідкісноземельних елементів, чорних (квасцових) сланців тощо.

Аналіз даних щодо світового виробництва урану свідчить про істотне загострення проблеми виробництва ядерного палива. Динаміка виробництва урану має тенденцію до скорочення (рис. 6А), сучасний попит забезпечується менш, ніж на 80 % (рис. 6В). За збереження цих тенденцій до 2040 р. забезпечуватиметься близько половини світового попиту.

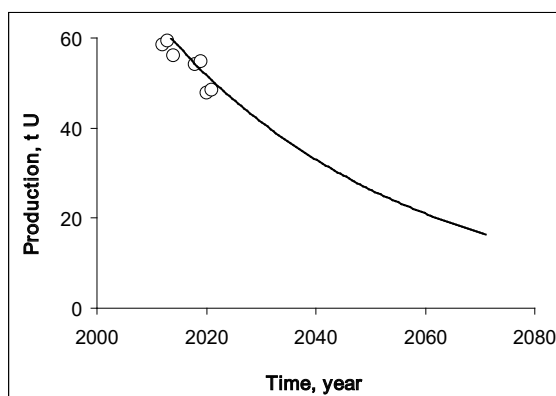
Сьогодні уран є єдиним паливом для ядерних реакторів. Проте **торій** також можна використовувати як паливо для реакторів CANDU або в реакторах, спеціально призначених для цієї мети. Ефективні нейтронні реактори, такі як CANDU, здатні працювати на торієвому паливному циклі, якщо їх запустити з використанням розщеплюваного матеріалу, такого як U-235 або Pu-239. Потім атом торію (Th-232) захоплює нейтрон у реакторі, перетворюючись на розщеплюваний уран (U-233), який продовжує реакцію. Деякі передові конструкції реакторів, ймовірно, зможуть використовувати торій у значних масштабах.

Торієвий паливний цикл має деякі привабливі особливості, хоча він ще не використовується в комерційних цілях.

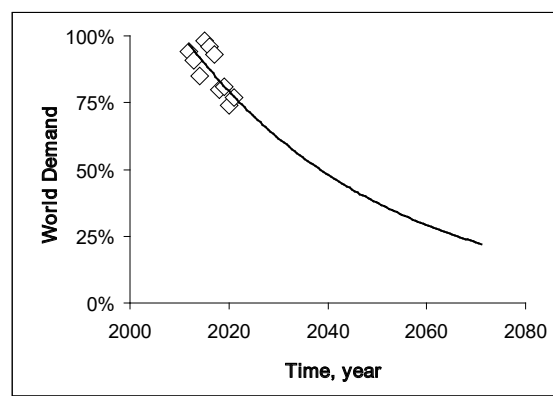
Запаси торію в земній корі приблизно втричі більші, ніж урану. У надрах України зосереджено близько 2 % світових запасів урану – істотно більше, ніж на всій решті території Європи, що забезпечить власні потреби атомної енергетики на 100 років. У разі впровадження торієвого паливного циклу – запаси сировини оцінюються на тисячоліття.

3. Проблеми безпеки та вразливості ядерних енергетичних установок

Сучасні тенденції на ринку рішень спрямовані на збільшення потужності реакторних блоків АЕС, що само по собі збільшує ймовірність важких аварій. З іншого боку, впровадження нових активних і пасивних систем безпеки, зокрема, створення нових видів стійкого до важких аварій палива, повинно зменшити таку ймовірність.



A



B

Рис. 6. Динаміка світового виробництва урану (А) та забезпечення попиту (В). Побудовано з використанням бази даних WNA [6]

Fig. 6. Global Uranium production (A) and World demand (B). Trends are calculated according to WNA database [6]

Поширена думка, що ймовірнісні оцінки безпеки показують справжнє значення частоти аварій для даного реактора, не відповідає дійсності. Насправді це значення схильне до невизначеності. У кращому випадку можна запропонувати довірчий інтервал, в межах якого знаходиться ймовірність аварії.

Варто зазначити, що з розвитком реакторних технологій ймовірність розплавлення активної зони реактора знизилася та оцінюється для сучасних технологій $2.7 \cdot 10^{-7} - 7.2 \cdot 10^{-6}$ реактор/рік [14].

Розбіжність між реальними спостереженнями за радіаційними аваріями та їх частотою, досягає двох порядків величини частоти аварій, прогнозованої ймовірнісними моделями. З початку 1960-х років і підключення до мережі першого ядерного реактора до 2013 р. у світі пройшло 14 400 реактор-років. Ця цифра отримана шляхом додавання всіх років роботи всіх коли-небудь побудованих реакторів, які виробляли електроенергію, незалежно від того, чи вони все ще працюють, були зупинені раніше запланованого терміну чи ні. Іншими словами, це відповідає роботі одного реактора протягом 14 400 років.

Водночас, з моменту підключення до мережі першого цивільного реактора сталося 11 часткових або повних аварій з розплавленням активної зони. Таким чином, зареєстрована частота розплавлення активної зони становить 11 на 14 400, або $7.6 \cdot 10^{-4}$, тобто одна аварія на кожні 1300 реакторних років. Проте порядок величини, про який повідомляють ймовірнісні дослідження безпеки, коливається від 10^{-4} до 10^{-5} , тобто аварія на кожні 10 000-100 000 реакторних років. У порівнянні з 1 300 це означає розбіжність між розрахованими і спостережуваними ймовірностями в десятки і сотні разів [15].

Атомні електростанції, цивільні дослідницькі реактори, деякі військово-морські паливні об'єкти, заводи зі збагачення урану, заводи з виробництва палива і навіть потенційно уранові шахти є вразливими до нападів, які можуть призвести до масштабного радіоактивного забруднення. Від 1973 р. ядерні енергетичні реактори дев'ять разів було піддано атакам внаслідок військових конфліктів [16]. У базі даних МАГАТЕ міститься інформація щодо майже 4 000 випадків несанкціонованої діяльності, пов'язаної з ядерними та іншими радіоактивними матеріалами [17].

Унаслідок російської агресії, яка породила новий тип тероризму – великодержавний ядерний тероризм – світ виявився на межі глобальної ядерної катастрофи, коли під загрозою вивільнення з-під фізичних бар'єрів захисту виявилися обсяги радіоактивності, співрозмірні з тисячами Чорнобильських катастроф та мільйонами ядерних бомб, скинутих на Хіросіму [18]. Ці загрози, передусім, визначаються обсягами відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) – Ахіллесової п'яти атомної енергетики, – в якому зосереджено понад 90 % техногенної радіоактивності на планеті. Система фізичного захисту сучасних ядерних реакторів передбачає стійкість до високого тиску, землетрусу, авіакатастрофи тощо. Найбільш небезпечною є терористична атака на сховища відпрацьованого ядерного палива, припинення їх енергопостачання, охолодження та вентильовання, що призвело зокрема в минулому, до низки катастроф найвищого 6–7 рівня за шкалою INES.

Станом на початок 2017 р. у світі було накопичено приблизно 265 000 т ВЯП (у т важкого металу), з яких 127 000 т було відправлено на переробку. Поточний

загальний глобальний обсяг твердих радіоактивних відходів становить приблизно 38 млн м³, з яких 30,5 млн м³ (81 % від загального обсягу) захоронено остаточно, решта 7,2 млн м³ (19 %) зберігаються у тимчасових сховищах в очікуванні остаточного захоронення. Понад 98 % від обсягу твердих відходів класифікуються як дуже низькоактивні або низькоактивні відходи, а більша частина, що залишилася, є відходами середнього рівня активності. Що стосується загальної радіоактивності, то ситуація повністю протилежна: приблизно 98 % радіоактивності припадає на відходи середнього та високого рівня активності [19].

4. Соціально-економічні чинники

Незважаючи на те, що в липні 2022 р. Європарламент відкрив шлях до визнання інвестицій у природний газ та атомну енергетику такими, що відповідають концепції сталого розвитку, пересічні громадяни не виявляють особливого ентузіазму щодо будівництва АЕС в зоні їхньої життєдіяльності. Важкі соціально-економічні та медико-біологічні наслідки великих ядерних аварій, несприйняття радіоактивного випромінювання безпосередньо органами чуття людини, недостатня дослідженість впливу малих доз опромінення на нинішні та прийдешні покоління стало підґрунтям негативного відношення громадськості до ядерної енергетики.

Найбільш потужний європейський ЯЕК Франції розвивався до початку нинішнього тисячоліття. Діючі ядерні потужності (ОНС) у 2003 р. сягнули 61 370 МВт(е). Цей показник практично незмінний протягом 20 років. Натомість вироблення електроенергії на АЕС (NEG) Франції за 20 років зменшилося на 20 %.

Від 2010 р. у США при скороченні кількості реакторів від 104 до 92 ОНС зменшилося майже на 10 %, а виробництво електроенергії на АЕС – на 5 %.

Натомість у Китаї спостерігається стійке експоненційне зростання ядерно-енергетичних потужностей: на 76 реакторах (ОНС 50,0 ГВт(е)) у 2021 р. NEG досягло 383,2 ТВт год.

З 58 реакторів, що знаходяться в стадії будівництва переважна більшість (65,5 %) розташована в Азійських країнах, найбільше (36 %) – у Китаї. На Європейському континенті будується 13 реакторів (22 %),

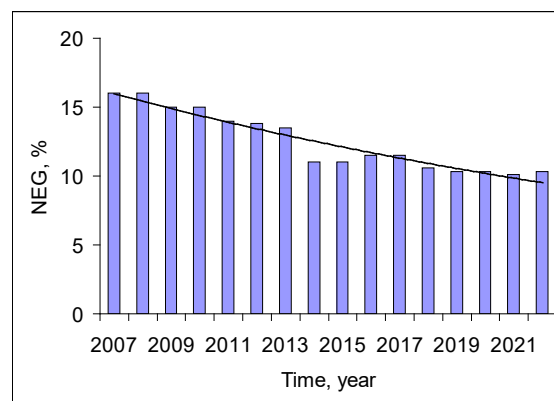


Рис. 7. Частка електроенергії, згенерована ядерними реакторами (NEG) у світовому виробництві. Тренд розраховано відповідно до бази даних IAEA [7]

Fig. 7. The global share of Nuclear Electricity Generation. Trend is calculated according to IAEA database [7]

у тому числі 8 (14 %) – у країнах ЄС. На американському континенті будується 4 реактора (7 %), в тому числі 2 – у США, у країнах Африки – 3 (5 %).

Цікаво відзначити, що більше половини (53 %) реакторів будуються в країнах з авторитарним режимом (показник індексу демократії < 4), 14 % – у країнах з перехідним (гібридним) режимом (4–6), близько 21 % – у країнах «неповної демократії» (6–8) та 12 % у повністю демократичних країнах (> 8 за десятибальною шкалою). Виявлено також слабку значиму негативну кореляцію між величиною показника індекса демократії [20] та кількістю і потужністю реакторів, що будуються ($K_{\text{кор.}} \sim -0,3$).

Незважаючи на те, що за оптимістичним прогнозом МАГАТЕ частка електроенергії, виробленої на АЕС, зросте до 12 % у 2050 р. [21], статистичний аналіз даних за останні 15 років вказує на достовірний ($R^2 = 0,91$) стійкий спадаючий експоненційний тренд (рис. 7). У разі збереження цієї тенденції у 2050 р. ця частка зменшиться до 4 % (песимістичний прогноз МАГАТЕ – 6 %), а до 2077 р. становитиме близько 1,5 %, що добре узгоджується з прогнозованим 99 % вичерпанням можливостей нині застосовуваної технології (див. табл. 1).

Висновки. Проаналізовано сучасний розвиток атомної енергетики, фактичні та майбутні тенденції її розвитку з використанням актуальних баз даних МАГАТЕ та Всесвітньої ядерної асоціації. Графічна інтерпретація отриманих часових трендів зростання світових діючих ядерних потужностей являє собою лінійну проекцію завершеного витка спіралі розвитку. Виположування кривої розвитку ядерної енергетики на початку третього тисячоліття приводить до висновку, що подальший розвиток ядерної галузі в паритеті зі зростанням енергетичних потреб вимагає «технологічного стрибка».

Сучасна атомна енергетика головним чином представлена легководними реакторами PWR, на яких вироблено 67 % електроенергії та BWR (21 %). Прогноз інтегрального показника генерування електроенергії (IEG) ядерними реакторами на основі 50-річних даних свідчить, що їхніх технологічні можливості ймовірно будуть вичерпані до кінця нинішнього століття (99 % – у 2077 р.).

Майже 70 % ядерних реакторів, що експлуатуються в світі, виробило свій нормативний ресурс (30 років). Враховуючи реактори з сучасними технологіями генерування електроенергії, що знаходяться у стадії будівництва, а також ті, що підлягають виведенню з експлуатації, протягом наступних 10 років слід очікувати двократний дефіцит ядерно-енергетичних потужностей. Збереження сучасних тенденцій динаміки глобальної частки електроенергії, що генерується на АЕС, призведе до її зниження до 4 % до 2050 р. та до 1,5 % до 2077 р., що узгоджується з прогнозованою оцінкою вичерпання технологічних можливостей сучасних реакторів.

Сучасні тенденції щодо виробництва урану свідчать про вичерпування сировинної бази ядерної енергетики. За їх збереження протягом 30 років виробництво може зменшитися вдвічі, а забезпечення потреб до 2040 р. становитиме 50 % від необхідного. У надрах України

зосереджено близько 2 % світових запасів урану, що забезпечить власні потреби на 100 років, запасів торію, як альтернативної сировини палива ядерних реакторів, вистачить на тисячоліття.

Високі темпи розвитку ядерної енергетики в 70-х – 80-х роках минулого століття не відповідали рівню її безпеки. Однією з причин уповільнення її розвитку є проблеми безпеки і вразливості ядерно-енергетичних установок. Розбіжність між розрахованими і спостережуваними ймовірностями важкої радіаційної аварії досягає двох порядків. Найбільш вразливими до терористичних актів є сховища відпрацьованого ядерного палива, яке містить понад 90 % техногенної радіоактивності на планеті. Унаслідок російського вторгнення в Україну з'явився новий вид тероризму – великодержавний ядерний тероризм, – що нагально потребує кардинальної перебудови світової системи ядерної безпеки.

Популяризація наукових досліджень, культура освіти та формування громадської думки істотною мірою впливають на розвиток ядерно-енергетичного комплексу. Розвиток ядерної енергетики у країнах з високим рівнем демократії стримується громадськістю. Серед реакторів, що будуються у світі, більше половини розташовано в країнах з авторитарним режимом. Встановлено наявність кореляційного зв'язку між величиною індексу демократії та кількістю і потужністю ядерних реакторів, що будуються.

Єдина відома на сьогодні технологія, яка дозволила б здійснити «технологічний прорив» в ядерній енергетиці, – термоядерний синтез. Однак малоімовірно, що вона буде реалізована у промислових масштабах протягом 50 років. В очікуванні нового ядерного реактора найбільш перспективними проєктами на перехідний період є впровадження малих модульних реакторів, які характеризуються високими темпами будівництва, більш високим рівнем безпеки та прийнятними техніко-економічними показниками. Перспективним видається також розвиток водневого енергетичного комплексу на базі ядерних реакторів.

Подяки. Дослідження виконувалася за грантом ERASMUS Пізанського університету (Project No 2021-1-IT02-KA131-HED-000005909, Contratti 121/2023 del 26.01.2023). Автори висловлюють глибоку подяку Prof. Rosa Lo Frano (DICI University of Pisa) за консультації, дискусію, зауваження та виправлення.

Acknowledgments. The research was supported by an ERASMUS grant from the University of Pisa (Project No. 2021-1-IT02-KA131-HED-000005909, Contratti 121/2023 del 26.01.2023). The authors express their deep gratitude to Prof. Rosa Lo Frano (DICI University of Pisa) for advice, discussion, comments and corrections.

Література

1. Ферми Э. Ядерные процессы при больших энергиях. *Успехи физических наук*. 1952. Т. 46, № 1. С. 71–95.
2. Zinn W. E. (1955). Fermi and Atomic Energy. *Review of Modern Physics* 27: 263–268. doi:10.1103/RevModPhys.27.263.

3. Энергетика: история, настоящее и будущее. Т. 3. Развитие тепловой и ядерной энергетики / под ред. И.Н. Карпа, И.Я. Сигала, Е.П. Домбровской. Киев, 2008. 528 с.
4. Кошарна О.П. Аварія на АЕС «Фукусіма-1» та її вплив на перспективи розвитку ядерної енергетики в Україні та світ. *Вісник експортного контролю*. 2011. № 2. С. 4–6.
5. Glossary of Terms in PRIS Reports. URL: <https://pris.iaea.org/PRIS/Glossary.aspx>.
6. World Nuclear Association. URL: <https://world-nuclear.org/>.
7. IAEA Power Reactor Information System. URL: <https://pris.iaea.org/>.
8. Долін В.В., Пушкар'ов О.В., Шраменко І.Ф. та ін. Тритій у біосфері.-Київ: Наукова думка, 2012.- 224 с.
9. Азаренков Н.А., Булавин Л.А., Залубовський І.І. Ядерная энергетика : учебное пособие. Харьков : ХНУ имени В.Н. Каразина, 2012. 535 с.
10. ITER: L'ÉNERGIE DE FUSION. URL: <https://www.iter.org/fr/accueil>.
11. Nuclear fusion. *Postnote*. January 2003. No 192. URL: <http://www.parliament.uk/post/pn192.pdf>.
12. Крылова В.П., Куличенко В.В. Обращение с отходами от переработки облученного ядерного горючего. *Атомная техника за рубежом*. 1974. № 2. С. 37.
13. Uranium 2020: Resources, Production and Demand. NEA (No 7551), IAEA, 2020. 484 p.
14. HSE Health and Safety Executive, Nuclear Directorate, Generic Design Assessment – New Civil Reactors Build, Step 3, PSA of the EDF and Areva UK EPR division 6, Assessment report n° AR 09/027-P, 2011.
15. Lévêque François. The risk of a major nuclear accident: calculation and perception of probabilities. 2013. fihal-00795152v2f. 39 p.
16. Benjamin K. Sovacool (2011). Contesting the Future of Nuclear Power: A Critical Global Assessment of Atomic Energy, World Scientific, 296 p.
17. IAEA Incident and Trafficking Database (ITDB). URL: <https://www.iaea.org/resources/databases/itdb>.
18. Dolin V., Kopylenko O., Zabulonov Yu. GLOBAL NUCLEAR THREATS CAUSED BY RUSSIA'S INVASION OF UKRAINE. *Geochemistry of Technogenesis*. 2022. No 7. P. 7–17.
19. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14 (Rev. 1). Vienna: IAEA, 2022. 102 p.
20. Democracy Index 2021. The China challenge. *The Economist Intelligence Unit Limited*, 2022. 85 p.
21. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050: 2021 edition. Vienna : IAEA, 2021. 148 p.
- Modern Physics 27: 263–268. doi:10.1103/RevModPhys.27.263
3. Energetika: istoriya, nastoyashcheye i budushcheye. – T. 3. Razvitiye teplovy i yadernoy energetiki // pod red. I. N. Karpa, I. Ya. Sigala, Ye. P. Dombrovskoy. – K., 2008. – 528 s.
4. Kosharna O.P. Avariya na AES «Fukusima-1» ta yiyi vplyv na perspektyvy rozvytku yadernoyi enerhetyky v Ukraini ta svit // Visnyk eksportnoho kontrolyu. – 2011. – № 2. – S. 4–6.
5. Glossary of Terms in PRIS Reports // <https://pris.iaea.org/PRIS/Glossary.aspx>
6. World Nuclear Association // <https://world-nuclear.org/>
7. IAEA Power Reactor Information System // <https://pris.iaea.org/>
8. Dolin V.V., Pushkar'ov O.V., Shramenko I.F. ta in. Tritiy u biosferi [Tritium in the Biosphere] / Za red. E.V. Sobotovicha, V.V. Dolina. – K.: Nauk. dumka, 2012. – 224 s.
9. Azarenkov N. A., Bulavin L. A., Zalyubovskiy I.I., Kirichenko V. G., Neklyudov I. M., Shilyayev B. A. Yadernaya energetika: uchebnoye posobiye. – Khar'kov: KHNU imeni V. N. Karazina, 2012. – 535 s.
10. ITER: L'ÉNERGIE DE FUSION: <https://www.iter.org/fr/accueil>
11. Nuclear fusion // *Postnote*. – January 2003. – No 192: <http://www.parliament.uk/post/pn192.pdf>
12. Krylova V.P., Kulichenko V.V. Obrashcheniye s otkhodami ot pererabotki obluchennogo yadernogo goryuchego // *Atomnaya tekhnika za rubezhom*. – 1974. – № 2. – S. 37.
13. Uranium 2020: Resources, Production and Demand. – NEA (No 7551), IAEA, 2020. – 484 p.
14. HSE Health and Safety Executive, Nuclear Directorate, Generic Design Assessment – New Civil Reactors Build, Step 3, PSA of the EDF and Areva UK EPR division 6, Assessment report n° AR 09/027-P, 2011.
15. Lévêque François. The risk of a major nuclear accident: calculation and perception of probabilities. 2013. fihal-00795152v2f. – 39 p.
16. Benjamin K. Sovacool (2011). Contesting the Future of Nuclear Power: A Critical Global Assessment of Atomic Energy, World Scientific, 296 p.
17. IAEA Incident and Trafficking Database (ITDB) // <https://www.iaea.org/resources/databases/itdb>
18. Dolin V., Kopylenko O., Zabulonov Yu. GLOBAL NUCLEAR THREATS CAUSED BY RUSSIA'S INVASION OF UKRAINE // *Geochemistry of Technogenesis*. – 2022. No 7. P. 7–17.
19. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management // IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14 (Rev. 1). – Vienna: IAEA, 2022. – 102 p.
20. Democracy Index 2021. The China challenge // *The Economist Intelligence Unit Limited*, 2022. – 85 p.
21. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050: 2021 edition. – Vienna: IAEA, 2021. – 148 p.

References

1. Fermi E. Yadernyye protsessy pri bol'shikh energiyakh // *Uspekhi fizicheskikh nauk*. – 1952. – T. 46, № 1. – S. 71–95.
2. Zinn W. E. (1955). Fermi and Atomic Energy // *Review of GLOBAL TENDENCIES IN NUCLEAR POWER ENGINEERING Dolin V.V., Zabulonov Yu.L., Kopylenko J.L., Shramenko I.F.*

Dolin V.V., Dr. Sc. (Geol.), Prof., State Institution “The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine”, Department of Civil and Industrial Engineering-University of Pisa, ORCID: 0000-0001-6174-2962, vdolin@ukr.net
Zabulonov Yu.L., Corresponding member of the NAS of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), Prof., State Institution “The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine”, ORCID: 0000-0002-4517-9927, Zabulonov@nas.gov.ua
Kopylenko O.L., Academician of NAS of Ukraine, Dr. Sc. (Jur.), Prof., People’s Deputy of Ukraine, ORCID: 0000-0003-2644-151X, Kopylenko@nas.gov.ua
Shramenko I.F., PhD (Geol.), State Institution “The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine”, ORCID: 0000-0001-7746-2332, shramenko_ivan@ukr.net

The paper is devoted to the analytical inspection and parameterization of the dynamics of the world's nuclear energy complex from the first self-sustaining chain reaction to the present day. The rapid development of nuclear power in the 1970s and 1980s slowed down significantly at the beginning of the third millennium. The dynamics of increasing operational capacities is a linear unfolding of the completed turn of the spiral of development.

Almost 90 % of electricity in the nuclear power industry in 1970–2021 was generated by PWR and BWR light water reactors. It is expected that their technological resources will be exhausted by 99 % by 2077. If the current pace of development is maintained, the share of electricity generated by NPPs in the world by that time will decrease to 1,5 %. Nuclear power capacities in Europe and America are declining, while is developing in Asia, particularly in China, where almost 70 % of the nuclear power plants under construction are located. The rate of decline in uranium production indicates to by 2040 no more than half of the world's nuclear fuel demand will be met. Safety and security of the nuclear energy complex are considerably decreasing with the growth of reactor capacity, and the discrepancy between the calculated and observed probabilities of a severe radiation accident reaches two orders of magnitude. As a result of current manifestation of great-power nuclear terrorism, the global nuclear safety and security system needs to be overhauled. Further development of the nuclear energy requires a “technological leap”. At present, there is no technology available for widespread implementation that could increase nuclear reactor capacity by an order of magnitude without compromising nuclear safety, especially considering that fusion reactor technology is unlikely to be widely implemented in the next few decades. A technological bridge between existing and future developments could serve small modular reactors which in the short term could mitigate the energy supply shortage.

Key words: nuclear energy, reactor, pace of development, exhaustion of technological capabilities, raw material base, nuclear safety and security, fusion, small modular reactors.