



## БОРИСЕНКО

**Володимир Іванович** — доктор технічних наук, завідувач відділення атомної енергетики Інституту проблем безпеки атомних електростанцій НАН України

## ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

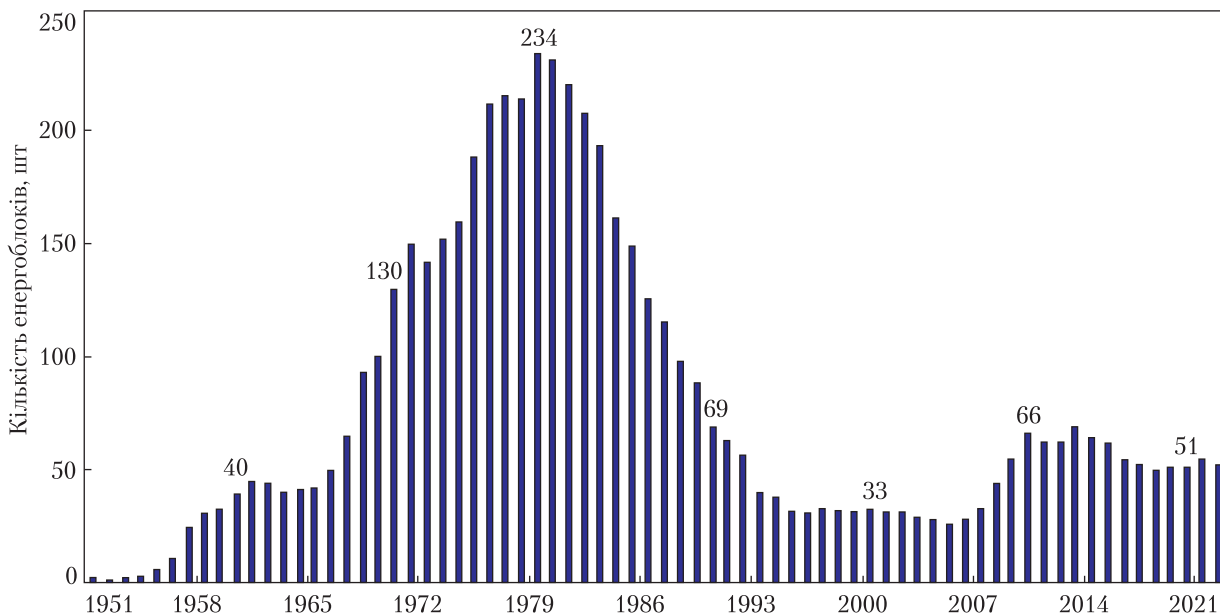
**За матеріалами доповіді на засіданні  
Президії НАН України 8 лютого 2023 року**

*У доповіді наведено інформацію щодо сучасного стану ядерної енергетики в Україні та світі, проаналізовано загальні тенденції, які спостерігаються в галузі електроенергетики. Враховуючи що 12 з 15 енергоблоків АЕС України вже працюють у понадпроектні терміни експлуатації і через 10–20 років настане час зняття їх з експлуатації, актуальним є питання щодо обґрунтованого вибору перспективної реакторної технології для її подальшого впровадження в Україні. Розглянуто техніко-економічні показники сучасних реакторних установок, як тих, що вже впроваджені на АЕС у світі, так і тих, що перебувають на стадії розроблення і можуть виявитися конкурентоспроможними в разі їх успішної реалізації. До таких проєктів належать інноваційні реакторні установки четвертого покоління та малі модульні реактори. Обговорено проблемні питання щодо перспектив впровадження в Україні ще не апробованих реакторних технологій.*

**Ключові слова:** реакторні технології, інноваційні ядерні реактори, реакторні установки четвертого покоління, малі модульні реактори.

**Стан енергетики у світі.** Станом на січень 2023 р. в 32 країнах світу на 192 атомних електростанціях експлуатувалися 422 ядерні реактори; 57 ядерних реакторів перебували на стадії будівництва.

Загалом у 2021 р. у світі на АЕС вироблено 2 653 млрд кВт·г електроенергії, при цьому у 2019 р. вперше після аварії на АЕС «Фукусіма-1» в Японії у 2011 р було перевищено рівень 2010 р. У 2006 р. на атомних станціях у світі було вироблено 2 660 млрд кВт·г електроенергії — це поки що найбільший показник. За останні кілька десятиліть позиції ядерної електроенергетики у світовому енергетичному балансі значно знизилися. Наприклад, частка електроенергії, виробленої на ядерних енергоблоках, відносно всіх типів електрогенерації становила: у 1996 р. — 17,5 % (найвищий показник за весь час), у 2006 р. — 14 %, у 2021 р. — 9,8 %.



**Рис. 1.** Кількість енергоблоків АЕС у стадії будівництва у світі

Основними причинами зниження частки ядерної електрогенерації стали аварії на атомних станціях у різні роки: на АЕС «Three Mile Island» в США у 1979 р., на Чорнобильській АЕС в Україні у 1986 р., на АЕС «Fukushima-Daiichi» в Японії у 2011 р. Так, якщо у 1970-х роках у світі щороку починалося будівництво трьох-чотирьох десятків ядерних енергобло-

ків, а в експлуатацію вводили більше двох десятків енергоблоків, то на сьогодні у світі щороку вводять в експлуатацію лише кілька одиниць ядерних реакторів (рис. 1).

У табл. 1 наведено інформацію за даними 2021 р. про першу десятку країн за обсягами виробництва електроенергії на АЕС.

У країнах Євросоюзу в 2021 р. експлуатувалося 104 енергоблоки потужністю 101,958 ГВт. Частка ядерної енергетики у виробництві електроенергії перевищує 25 %.

Україна за встановленою потужністю (13,107 ГВт) посідає 8-ме місце. На 15 енергоблоках у 2021 р. було вироблено 86,206 млрд кВт-г електроенергії, що становило 55 % усієї електроенергії, виробленої в країні. Це 6-й показник у світі в абсолютному вимірі (табл. 1).

Станом на кінець 2021 р. у 13 країнах світу щонайменше четверта частина електроенергії вироблялася на атомних електростанціях. За підсумками 2021 р. у Франції, Бельгії, Словаччині та Україні на АЕС було вироблено більше половини споживаної електроенергії.

У Європейському Союзі в рамках представленої у грудні 2019 р. «зеленої угоди» допускається використання країнами-членами

**Таблиця 1.** Перша десятка країн за обсягами виробництва електроенергії на АЕС у 2021 р.

№	Країна	Вироблено електроенергії, млрд кВт-г	Встановлена потужність, ГВт (кількість енергоблоків)
1	США	787,442	94,7 (92)
2	Китай	407,141	52,2 (55)
3	Франція	360,700	61,4 (56)
4	РФ	222,437	27,7 (37)
5	Корея	150,163	24,4 (25)
6	Україна	86,206	13,1 (15)
7	Канада	73,628	13,6 (19)
8	Японія	61,223	16,3 (17)
9	Іспанія	54,087	7,1 (7)
10	Швеція	50,992	6,9 (6)

ядерної енергетики як частини національного енергобалансу. Багато країн, що розвиваються, розглядають можливість будівництва АЕС, які можуть забезпечити виробництво порівняно дешевої електроенергії, що є важливим фактором для економік зі зростаючим енергоспоживанням.

Збільшення частки виробництва електроенергії на АЕС може дозволити країнам скоротити викиди парникових газів в енергетиці, проте ядерна енергетика несе ризики радіоактивного забруднення внаслідок аварій. Проекти з будівництва АЕС пов'язані також з високими витратами і мають тривалий інвестиційний цикл.

Отже, незважаючи на фактичну стагнацію у розвитку ядерної електрогенерації у світі, для більш ніж 20 країн ядерна енергетика відіграє важливу роль, і реалізуються плани щодо її подальшого розвитку. Локомотивом сьогодні виступає Китай, який має амбітні плани і впевнено рухається до широкого впровадження різних реакторних технологій. До речі, поряд з проектами, розробленими китайськими компаніями, у Китаї вже побудовані і з 2018 р. працюють найсучасніші енергоблоки з реакторними установками AP1000 і EPR-1750.

**Стан ядерної енергетики в Україні.** Ядерна енергетика України бере свій початок у 1977 р., коли було введено в експлуатацію перший енергоблок з реактором РБМК-1000 на Чорнобильській АЕС. Зростаюча потреба в електроенергії сприяла швидкому будівництву енергоблоків: на момент техногенної аварії на четвертому енергоблоці Чорнобильської АЕС 26 квітня 1986 р. в Україні в експлуатації перебувало 10 енергоблоків, 8 з яких потужністю 1000 МВт (4 – з реакторними установками ВВЕР-1000). З 1986 по 1990 р. було введено в експлуатацію ще 6 ядерних енергоблоків з реакторними установками ВВЕР-1000: три на Запорізькій АЕС та по одному на Південноукраїнській, Рівненській та Хмельницькій АЕС.

Однак після Чорнобильської аварії Верховна Рада України у серпні 1990 р. оголосила мораторій на будівництво та введення в експлуатацію нових атомних блоків, вна-

слідок чого будівництво нових енергоблоків на Хмельницькій, Запорізькій та Рівненській АЕС було припинено. У 1993 р. було відновлено роботи на 6-му блоці Запорізької АЕС, 4-му блоці Рівненської АЕС та 2-му – Хмельницької АЕС. У жовтні 1995 р. відбувся енергетичний пуск 6-го енергоблока з реакторною установкою ВВЕР-1000 Запорізької АЕС. Запорізька атомна станція зі встановленою потужністю 6 ГВт стала найбільшою у Європі.

На АЕС України станом на 01.01.2023 експлуатуються 15 енергоблоків з реакторами ВВЕР: 13 – з ВВЕР-1000; 2 – з ВВЕР-440. Частка АЕС у загальному виробництві електроенергії в Україні з 2015 р. становить понад 50 % (рис. 2). Очевидно, що ядерна енергетика в Україні відіграє важливу роль у забезпеченні енергетичної незалежності держави. Зусилля науково-технічної спільноти України мають бути спрямовані на підтримку безпечної експлуатації ядерних енергоблоків АЕС, а також на обґрунтування вибору сучасної реакторної технології для подальшого розвитку енергетики України.

На рис. 2 можна бачити, як змінювалося співвідношення теплової, ядерної та інших видів електрогенерації в Україні за тривалий історичний період. За останнє десятиріччя споживання електроенергії в Україні зменшилося. У 2019–2021 рр. діапазони зміни потужності електроспоживання влітку становили 12–17 ГВт, узимку 14–22 ГВт. Отже, можна вважати, що встановлена потужність класичної електрогенерації в Україні, включно з резервними потужностями, має становити приблизно 30 ГВт.

Згідно з прогнозами Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [1], в Україні планується підвищити споживання електроенергії до 164; 178; 195 млрд кВт·г, відповідно, у 2020, 2025, 2035 рр. В Енергетичній стратегії України до 2030 року, яку було прийнято у 2012 р., плани були ще амбітніші: передбачалося збільшити споживання електроенергії до 236; 259; 282 млрд кВт·г, відповідно, у 2020, 2025, 2030 рр.

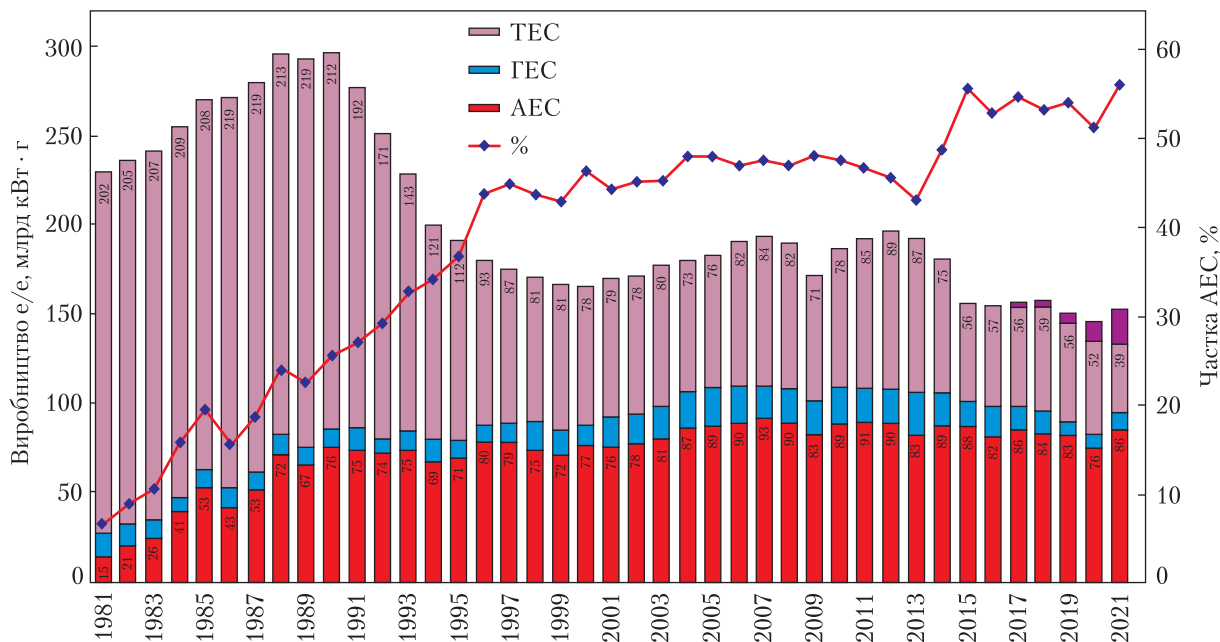


Рис. 2. Обсяги виробництва електроенергії на енергетичних об'єктах України у період з 1981 по 2021 р.

Втім, уже можна впевнено стверджувати, що реальне споживання електроенергії в Україні виявилось меншим і за підсумками 2020 р. становило 149 млрд кВт·г.

Зважаючи на наявні тенденції у споживанні електроенергії у світі та їх істотний вплив на виробництво і споживання електроенергії в Україні у повоєнний період, необхідно переглядати прогностичні показники наступної Енергетичної стратегії відповідно до фактичних потреб.

На рис. 3 наведено інформацію про терміни експлуатації енергоблоків на АЕС України станом на 01.01.2023. З 15 енергоблоків 12 (80 %) вже відпрацювали 30-річний проєктний термін експлуатації, і на сьогодні їх експлуатація відбувається у понадпроектні терміни. Для порівняння: у світі станом на 01.01.2022 з 442 енергоблоків, які перебували в експлуатації, 300 (68 %) перетнули межу 30-річного терміну експлуатації [1].

Отже, можна констатувати, що для підтримання рівня встановленої потужності енергоблоків на АЕС України з урахуванням обмеженого терміну експлуатації енергоблоків

у понадпроектні терміни необхідна програма будівництва нових ядерних енергоблоків в Україні.

Оптимальний сценарій розвитку ядерної енергетики в Україні, який враховує світовий досвід з подовження експлуатації енергоблоків типу ВВЕР, ґрунтується на припущенні, що енергоблоки АЕС можна безпечно експлуатувати до 50–60 років. Тому консервативна оцінка передбачає, що зупинку енергоблоків можна очікувати з 2030 р. Таким чином, у разі застосування консервативного підходу дослідження щодо вибору сучасної реакторної технології вже мали б завершитися.

**Сучасні реакторні технології.** Розвиток ядерної енергетики умовно прийнято поділяти на три покоління за рівнем безпеки енергоблоків АЕС. При цьому перше покоління (покоління I) характеризувалося десятками різних концепцій, друге покоління (покоління II) – серйозними аваріями, а третє покоління (покоління III та покоління III+) ще намагається знайти своє місце в енергетиці.

Станом на 2023 р. серед апробованих у світі реакторних технологій, які можуть бути впро-

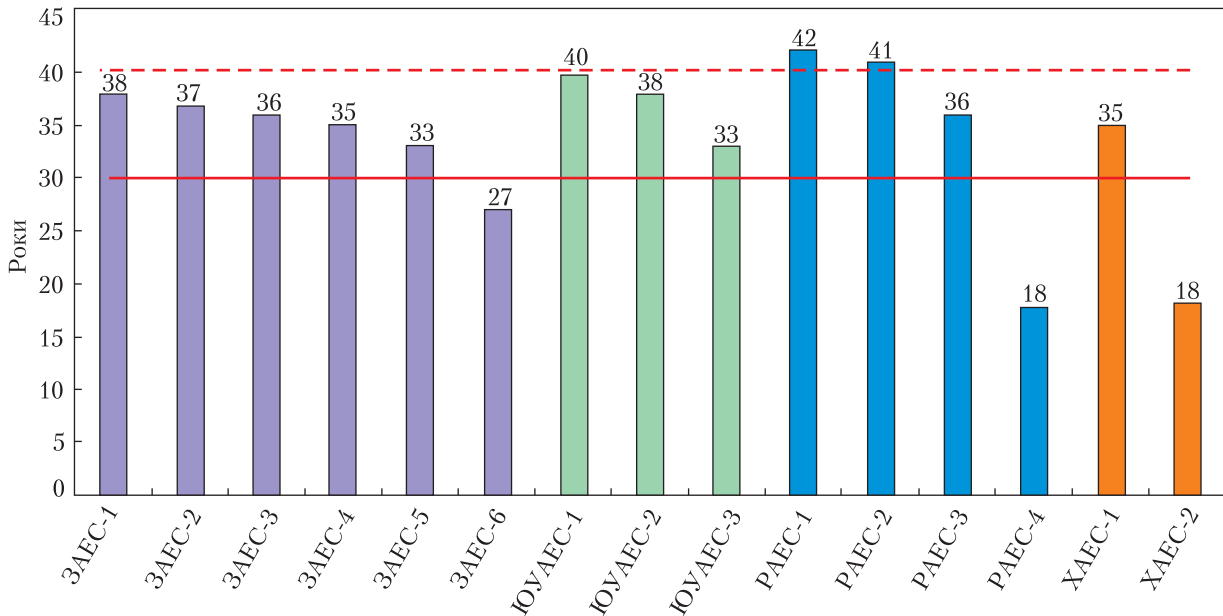


Рис. 3. Вік енергоблоків АЕС України станом на 01.01.2023 р.

ваджені в Україні відповідно до вимог нормативно-технічної документації [2], вибір обмежено трьома проектами: 1) проєкт AP1000 компанії Westinghouse; 2) проєкт EPR-1750; 3) проєкт ВВЕР 1200 Росатома.

Енергоблоки цих трьох проєктів уже побудовані та експлуатуються понад 5 років, а отже, їх можна вважати апробованими досвідом експлуатації.

Зазначені проєкти реакторних установок належать до покоління III+ і характеризуються високими показниками безпеки, досягнутими завдяки широкому впровадженню пасивних систем безпеки, а також вирішенню питання локалізації розплаву ядерного палива активної зони реактора в разі малоймовірних аварійних подій. Таким чином забезпечено умови експлуатації енергоблока, за яких гарантується, що радіаційні наслідки від можливої серйозної аварії обмежуватимуться лише територією самої АЕС.

Техніко-економічні й безпекові показники експлуатації реакторних установок покоління III+ можна оцінити на основі аналізу доступної інформації про загальне виробництво

електроенергії та аномальні події на енергоблоках, які перебувають у стані експлуатації, за останні три роки (табл. 2).

Серед основних експлуатаційних подій, що сталися на зазначених у табл. 2 реакторних установках, слід відзначити такі:

- AP1000 — на блоці № 2 АЕС Саньмень заміна головного циркулярного насоса тривала 8 місяців;
- EPR-1750 — на блоці № 2 АЕС Тайшань сталося підвищення активності теплоносія 1-го контуру внаслідок розгерметизації твєлів; час вимушеного простою становив 2 місяці;
- ВВЕР-1200 — на двох з чотирьох енергоблоків на першому році експлуатації були відмови генераторного обладнання; блоки перебували у вимушеному простої від 2 до 7 місяців.

Строки будівництва перших енергоблоків покоління III+ перевищують проєктні і становлять 8–10 років.

Ядерна енергетика є однією з найконсервативніших енергетичних галузей і, як вважають, уже досягла вершини свого розвитку. За останні приблизно 30 років зовнішній спостерігач

Таблиця 2. Коефіцієнт використання встановленої потужності за перші роки експлуатації енергоблоків з реакторними установками покоління III+

Рік	Тип реакторної установки									
	AP1000				EPR-1750		ВВЕР-1200			
	S-1	S-2	H-1	H-2	T-1	T-2	NV-1	NV-2	L-1	L-2
2019	0,89	0,09	0,96	1,01	0,82	0,37	0,74	0,36	0,76	0,00
2020	0,86	0,87	0,89	0,92	0,63	0,86	0,78	0,78	0,81	0,07
2021	0,93	0,90	0,93	0,94	0,52	0,75	0,77	0,75	0,92	0,90

**Примітка.** S-1, S-2 – енергоблоки, встановлені на Sanmen NPP (АЕС Саньмень, Китай); H-1, H-2 – на Haiyang NPP (АЕС Хаян, Китай); T-1, T-2 – на Taishan NPP (АЕС Тайшань, Китай); NV-1, NV-2 – на Нововоронезькій АЕС (РФ); L-1, L-2 – на Ленінградській АЕС (РФ)

не помітив би змін у ключових технологіях – одні й ті самі тепловидільні збірки з твєлів, що передають теплову енергію теплоносію, з подальшим перетворенням теплової енергії на електричну.

**Інноваційні проекти ядерних реакторів.** Міжнародний проект з інноваційних ядерних реакторів і паливних циклів (INPRO), який зараз реалізується, є невід'ємною частиною регулярної програми Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ). Його цілі сформульовано так:

- сприяння забезпеченню доступності ядерної енергії для сталого задоволення енергетичних потреб XXI ст.;
- об'єднання власників технологій і користувачів для спільного обговорення міжнародних і національних дій, спрямованих на досягнення необхідного рівня інновацій у ядерних реакторах і паливних циклах.

У рамках проекту INPRO з початку 2000-х років розпочато дослідження шести «революційних» концепцій реакторних установок четвертого покоління (покоління IV), кожна з яких по-своєму зрушує парадигму ядерної енергетики в той чи інший бік. Перелічимо ці інноваційні реакторні технології:

1) реактор на швидких нейтронах з газовим охолодженням (gas-cooled fast reactor – GFR);

2) реактор на швидких нейтронах зі свинцевим теплоносієм (lead-cooled fast reactor – LFR);

3) реактор на швидких нейтронах з натрієвим охолодженням (sodium-cooled fast reactor – SFR);

4) рідкосольовий реактор (molten salt reactor – MSR);

5) реактор із надкритичними параметрами води (supercritical water reactor – SCWR);

6) високотемпературний реактор (very-high-temperature reactor – VHTR).

Важливо зазначити, що всі ці концепції виникли не у 2000-х роках, а ще в період зародження ядерної індустрії, але тоді програли в конкурентній боротьбі реакторам з водою під тиском.

Четверте покоління ядерних реакторів має стати певним проривом і виходом з «глухого кута», в якому сьогодні опинилася світова ядерна енергетика. Для цього необхідно вирішити одразу кілька суперечливих завдань – не втратити в безпеці ядерного реактора, поліпшити його економічні показники і розв'язати проблему переходу від використання  $^{235}\text{U}$  до  $^{238}\text{U}$ .

Після більш як 20 років досліджень у галузі інноваційних реакторних технологій наразі поки що тривають роботи на прототипах реакторних установок. Найважливішими з досягнутих на сьогодні результатів є такі:

- у Китаї в 2021 і 2022 рр. введено в експлуатацію по одному енергоблоку високотемпературного реактора VHTR потужністю по 200 МВт на АЕС Шидаовань (Shidao Bay NPP);



• у 2021 р. в РФ розпочато будівництво реактора на швидких нейтронах зі свинцевим теплоносієм БРЕСТ-300 (быстрый реактор естественной безопасности со свинцовым теплоносителем).

**Проекти малих модульних реакторів.** Малі модульні реактори (ММР) — це сучасні ядерні реактори потужністю до 300 МВт (ел.) на енергоблок. Деякі з переваг ММР пов'язані з їх конструкцією — вони невеликі і модульні. ММР можна розміщувати в місцях, які не підходять для будівництва потужних АЕС. Збірні модулі ММР можна виготовити заздалегідь, а потім привезти і встановити на майданчику, тобто їх використання є більш доступним, ніж реакторів великої потужності.

Порівняно з реакторними установками, які вже експлуатуються, запропоновані конструкції ММР є загалом простішими, а концепція безпеки для ММР більшою мірою спирається на пасивні системи і такі властиві цим реакторам внутрішні характеристики безпеки, як мала потужність та низький робочий тиск. Це означає, що для відключення систем не потрібне втручання людини або зовнішньої енергії чи сили, оскільки пасивні системи покладаються на фізичні явища, такі як природна циркуляція, конвекція, гравітація та створення підвищеного тиску.

Завдяки цьому в деяких випадках усувається або значно знижується ймовірність небезпечних радіоактивних викидів у навколишнє середовище та контакту з ними населення в разі аварії.

Однак станом на 2022 р. погляди деяких фахівців щодо розв'язання енергетичних проблем України на основі «перспективних» технологій ММР ще не мають належного техніко-економічного і наукового обґрунтування, а також не підтверджуються необхідною практичною апробацією, оскільки у світі такі реактори ще тільки розробляються. Сьогодні можна лише констатувати, що виробництво електроенергії із застосуванням технологій ММР буде дорожчим порівняно з використанням традиційної, апробованої технології експлуатації енергоблоків потужністю 500–1000 МВт.

Технологію ММР широко обговорюють у науково-технічних публікаціях як один зі шляхів можливого перспективного розвитку ядерної енергетики. Однак появу першого енергоблока, побудованого за технологією ММР, можна очікувати не раніше ніж через 5–6 років, а результати референтного досвіду з експлуатації першого блока — ще приблизно через 5 років.

Станом на 2022 р. поки що єдиним проектом ММР, який пройшов основні етапи ліцензування в Комісії з ядерного регулювання (NRS) США, є проєкт NuScale. Слід зазначити, що процес ліцензування в NRC пройшов проєкт NuScale потужністю 50 МВт, який поки що не планується до будівництва. Що стосується запланованого до будівництва проєкту NuScale потужністю 77 МВт, то подання документів у NRC для отримання ліцензії на його будівництво і експлуатацію заплановано лише на січень 2024 р. Тому в найкращому випадку перший модуль NuScale може бути побудовано у США через 6–7 років.

Слід підкреслити, що зміна потужності проєкту NuScale відбувалася вже неодноразово: спочатку, у 2003 р. вона становила 35 МВт, у 2009 р. — 40 МВт, у 2016 р. — 50 МВт (саме цей проєкт проходив ліцензування в NRC), у 2018 р. — 60 МВт, а поки що останній на сьогодні проєкт має потужність 77 МВт.

Крім того, у NRC залишилися такі питання до проєкту NuScale [1]:

- конструкція парогенератора (її не апробовано);
- несвоєчасне спрацювання системи аварійного охолодження активної зони;
- аналіз аварій з розчином бору в нижній камері змішування реактора.

Отже, терміни реалізації проєкту NuScale переносяться, а в процесі ліцензування було виявлено різні проблеми з безпекою. Тому можна очікувати нові затримки.

Проєкт NuScale — це єдиний проєкт, який фінансово підтримується Департаментом енергетики (DOE) США. Станом на березень 2020 р. федеральний уряд США виділив на нього 314 млн дол. США при загальних витратах на проєкт 957 млн дол. США [3]. Врахо-

вуючи затримки в реалізації проекту NuScale Департамент енергетики погодився надати для його виконання «нові багаторічні асигнування Департаменту енергетики США у номінальній сумі 1,4 мільярда доларів» [3].

Що стосується вартості електроенергії, яка вироблятиметься на АЕС з модулями NuScale, то її нижня межа становить \$58/МВт г, а верхня — \$110/МВт г.

Крім того, при оцінюванні безпеки проєктів ММР необхідно враховувати такі аспекти:

- обсяги відпрацьованого ядерного палива на одиницю виробленої енергії будуть приблизно у 1,5–2 рази більшими, ніж у сучасних реакторних установках;
- обсяги радіоактивних відходів на одиницю виробленої енергії під час експлуатації, а також зняття з експлуатації ММР будуть у 2–30 разів більшими порівняно із сучасними реакторними установками [3, 4].

Отже, доцільність прийняття рішень щодо впровадження технології малих модульних реакторів в Україні може бути науково обґрунтованою лише після аналізу реальних техніко-економічних показників, що стане можливим у разі реалізації проєктів ММР в інших країнах.

**Підвищення ефективності використання наявного парку ВВЕР.** В Енергетичній стратегії України на період до 2035 року серед основних заходів з реалізації стратегічних цілей у сфері генерації електроенергії передбачено, зокрема, такі [1]:

- реалізація програм зі збільшення ефективності використання потужностей державних підприємств, зокрема підвищення КВВП АЕС

(КВВП — коефіцієнт використання встановленої потужності);

- вибір реакторних технологій для будівництва нових атомних енергоблоків на заміщення потужностей АЕС, які виводитимуться з експлуатації після 2030 р.

Розглянемо окремо кожен з цих позицій.

Основою ядерної енергетики України є реакторні установки ВВЕР-1000. Всього станом на 2022 р. в стані експлуатації перебувають 35 енергоблоків з ВВЕР-1000 в шести країнах світу. Це Україна, Болгарія, Чехія, Китай, Індія, РФ [2].

Для того щоб оцінити ефективність використання реакторних установок з ВВЕР-1000 в Україні, необхідно порівняти основні показники експлуатації цих реакторних установок, насамперед ті, що визначають їхню економічну ефективність. Одним з таких показників є обсяг виробленої електроенергії на різних реакторних установках з ВВЕР-1000 за останні роки. Такий аналіз дасть змогу порівняти і КВВП різних енергоблоків.

Серед усіх енергоблоків з ВВЕР-1000 для аналізу виберемо по 2 енергоблоки з України, Болгарії, Чехії, Китаю і РФ. Критерій відбору — найбільш сучасні енергоблоки.

Отже, в цьому разі до списку потрапляють такі енергоблоки (табл. 3):

- Україна — енергоблок № 2 Хмельницької АЕС, енергоблок № 4 Рівненської АЕС;
- Болгарія — енергоблоки № 5 і № 6 АЕС Козлодуй (Kozloduy NPP);
- Чехія — енергоблоки № 1 і № 2 АЕС Темелін (Temelin NPP);

Таблиця 3. Обсяги виробництва електроенергії на енергоблоках з ВВЕР-1000 за 2010–2021 рр., млн кВт·г

Параметр	Енергоблоки ВВЕР-1000									
	R-4	Kh-2	T-1	T-2	K-5	K-6	R-1	R-2	TW-1	TW-2
Усього	74498	77845	85930	84008	90267	90132	92926	84137	91269	92424
Середнє	6208	6487	7161	7001	7522	7511	7744	7649	7606	7702

**Примітка.** R-4 — енергоблок № 4 Рівненської АЕС; Kh-2 — енергоблок № 2 Хмельницької АЕС; T-1, T-2 — енергоблоки № 1 і № 2 АЕС Темелін (Чехія); K-5, K-6 — енергоблоки № 5 і № 6 АЕС Козлодуй (Болгарія); R-1, R-2 — енергоблоки № 1 і № 2 Ростовської АЕС (РФ); TW-1, TW-2 — енергоблоки № 1 і № 2 АЕС Тяньвань (Китай)



- Китай — енергоблоки № 1 і № 2 АЕС Тяньвань (Tianwan NPP);
- РФ — енергоблоки № 1 і № 2 АЕС Ростовської АЕС.

Результати порівняння загального обсягу виробництва електроенергії за тривалий період разом з порівнянням КВВП однотипних енергоблоків можуть бути найбільш обґрунтованим показником ефективності організації всіх технологічних процесів на АЕС. З аналізу даних, наведених у табл. 3, можна зробити певні висновки. По-перше, середній річний обсяг виробництва електроенергії на розглянутих енергоблоках ВВЕР-1000 в Україні на 11–14 % менший, ніж в інших країнах; по-друге, за максимальними показниками виробництва електроенергії за останні 12 років на ХАЕС-2 і РАЕС-4 електроенергії виробляється на 15–20 % менше, ніж на ВВЕР-1000 в інших країнах.

Отже, лише завдяки впровадженню передових технологій експлуатації ВВЕР-1000 на АЕС України можна додатково виробляти до 15 млрд кВт·г, що еквівалентно обсягу електроенергії, який може бути вироблений на двох нових енергоблоках потужністю по 1000 МВт.

**Перспективна реакторна технологія на базі проекту AP1000.** Станом на 2022 р. серед проєктів реакторних установок, що належать до покоління III+, реакторна установка AP1000 компанії Westinghouse є найбільш привабливою для енергетики України за багатьма аспектами:

- 1) реактор AP1000 ліцензовано в США, Канаді і деяких інших країнах;
- 2) чотири енергоблоки з реактором AP1000 понад 5 років експлуатуються на двох АЕС у Китаї (Sanmen-1, 2, Haiyang-1, 2);
- 3) у США на АЕС Vogtle триває будівництво двох енергоблоків з реакторами AP1000; фізичний пуск першого енергоблока заплановано на березень 2023 р.;
- 4) реактор AP1000 має електричну потужність 1150 МВт, яка є найменшою серед інших реакторів нового покоління: EPR-1750, APR-1400, ВВЕР-1200. Таким чином, потужність AP1000 становить майже 10 % сумарної

потужності всіх джерел електропостачання в нічний мінімум літнього електроспоживання в Україні, відповідно, і вимоги до «гарячого» резерву є менш жорсткими;

5) економічні показники експлуатації AP1000 у Китаї є хорошими. Наприклад, коефіцієнт використання встановленої потужності перебуває в діапазоні 90–99 %, що є одним з найкращих показників серед АЕС світу [2].

Станом на 2022 р. реактор AP1000 є найбільш апробованим серед інших проєктів реакторів покоління III+, зокрема тому, що в проєкті широко використовують наявні на сьогодні технології та пасивні системи безпеки. У конструкції реактора зменшено кількість компонентів, у тому числі труб, кабелів, електроарматури. Порівняно з попередніми проєктами компанії Westinghouse в проєкті AP1000 кількість клапанів, пов'язаних із системами безпеки, зменшено на 50 %; насосів — на 35%; трубопроводів, пов'язаних із системами безпеки, — на 80 %; кабелів систем керування — на 85 %; будівельний об'єм — на 45 %.

Однак у AP1000 є також і проблемні моменти, а саме:

1) відомо про проблеми з головним циркуляційним насосом як на етапі попередніх випробувань, під час яких було виявлено пошкодження різних елементів ГЦН, так і в процесі промислової експлуатації на Sanmen-2. У 2019 р. на Sanmen-2 відмовив один з ГЦН, для заміни якого знадобився майже рік;

2) для перших шести енергоблоків, які вже практично побудовано (4 — в Китаї, 2 — у США), реальні терміни будівництва значно перевищують проєктні. Так, середні строки будівництва енергоблоків з AP1000 в Китаї реально становлять 8–9 років порівняно з проєктними 4 роками. У США енергоблоки з AP1000 також будуються вже 10 років [1];

3) питання щодо вартості будівництва також не з'ясоване. Станом на кінець 2021 р. загальна вартість будівництва двох енергоблоків з AP1000 на АЕС Vogtle вже перевищує \$25 млрд;

4) логістичне питання щодо доставки на майданчик АЕС великогабаритних конструк-

цій і обладнання. Діаметр корпусу реактора AP1000 в районі патрубків — близько 5 м, а діаметр парогенератора — близько 6 м. Тому традиційна схема доставки обладнання залізницею неможлива, і для майданчиків ХАЕС, РАЕС і ПАЕС необхідно вирішувати проблему доставки вантажів автотранспортом на великі відстані (понад 100 км).

Станом на 2022 р. енергоблоки з AP1000 в інших країнах не будують. У 2016 р. на рівні керівництва США та Індії було зроблено заяву про наміри щодо будівництва 6 енергоблоків з AP1000 в Індії у штаті Андхра Прадеш, однак до практичних кроків сторони поки що не перейшли. Відомо також про наміри Польщі побудувати 6 реакторів американського виробництва, про що було заявлено у 2020 р., але у 2023 р. з'явилися повідомлення про плани побудувати 3 енергоблоки з AP1000.

У самих США було видано 14 ліцензій на будівництво AP1000: по 2 енергоблоки на АЕС Bellefonte, Levy Country, V.C. Summer, Vogtle, W.S. Lee, Turkey Point, Harris. Як відомо на сьогодні, будівництво ведеться лише на АЕС Vogtle, на АЕС V.C. Summer будівництво припинено у 2018 р. Отже, за останні 9 років, починаючи з 2013 р., нове будівництво енергоблоків з AP1000 не починалося. Велика Британія на тендері у 2018 р. обрала технологію EPR-1750 для будівництва заміщувальних потужностей на АЕС Hinkley Point [2].

Підсумовуючи наведену інформацію, можна погодитися з визначенням технології AP1000 як пріоритетної реакторної технології легководних реакторів великої потужності для подальшого врахування при формуванні стратегії розвитку ядерної енергетики України. Проте цей вибір зроблено на основі експертних оцінок згідно з використаним методом багатокритеріального аналізу безпеки. А до експертних оцінок завжди є багато питань. Науковці Інституту проблем безпеки АЕС НАН України мають досвід не лише у використанні методу багатокритеріального аналізу, а й у практичних роботах з розроблення пристроїв для реакторів AP1000, оскільки ці роботи виконувалися для китайських АЕС, а також у за-

стосуванні нових видів бетонних сумішей для біологічного захисту. Вважаємо, що досвід наукових установ НАН України буде враховано під час прийняття рішення про будівництво нових ядерних енергоблоків.

Усі ми розуміємо важливість інноваційних технологій для підтримки й розвитку ядерної енергетики. Ядерна енергетика у світі розвивається лише завдяки науково-технічному прогресу. Прикро про це говорити, але в Україні нічого не робиться, щоб піднести інноваційну діяльність у ядерній галузі на відповідний рівень. Поки що «інноваційна діяльність», на жаль, зводиться до закупівлі за кордоном наявних і не завжди прогресивних технологій та обладнання. В результаті маємо знищення національних наукових шкіл і занепад наукових інституцій.

Доцільним є використання в Україні досвіду Китаю, набутого при спорудженні 4 енергоблоків з AP1000. Наприклад, середній рівень локалізації при будівництві у Китаї цих енергоблоків становив у середньому 55 %. При цьому на першому з чотирьох енергоблоків Sanmen-1 рівень локалізації був 25 %, а на четвертому Haiyang-2 — вже 70 %. Слід також звернути увагу й на відому неузгодженість між американськими і китайськими партнерами при внесенні змін у проектну документацію. Загалом тільки за період з 2009 до 2013 р. у проект енергоблока Sanmen-1 було внесено 18 000 змін.

**Висновки.** Проведено науково-технічний і техніко-економічний аналіз реакторних технологій і окремих проектів реакторних установок, які станом на 2022 р. вважають перспективними для ядерної енергетики. Серед розглянутих проектів є і такі, що тільки розробляються (INPRO, MMP), і ті, що вже перебувають в експлуатації (AP1000, EPR-1750, ВВЕР-1200).

Наведено результати порівняльного аналізу роботи різних реакторних установок з ВВЕР-1000 за основним економічним показником ефективності — обсягом виробництва електроенергії. Зроблено висновок, що в разі впровадження передових світових технологій і підходів до організації технологічних процесів на реакторних установках з ВВЕР-1000 на

АЕС України можна додатково виробляти до 15 млрд кВт·г електроенергії на рік, що зіставне з річним виробництвом електроенергії на двох нових енергоблоках потужністю 1000 МВт.

На основі порівняльного аналізу основних техніко-економічних показників сучасних реакторних технологій, які належать до покоління III+ і вже перебувають у стадії експлуатації, а саме AP1000, EPR-1750, APR-1400, ВВЕР-1200, перевагу віддано технології AP1000.

Вибір технології AP1000 як пріоритетної для подальшого врахування при формуванні стратегії розвитку ядерної енергетики України є прийнятним, але цей вибір потребує підтвердження з боку експлуатуючої організації з проведенням необхідних процедур узгодження відповідного ТЕО та інших заходів згідно з чинним законодавством України.

При обґрунтуванні рішення щодо вибору AP1000 необхідно звернути увагу на вже відомі проблемні питання, які виникли в процесі впровадження цієї технології Westinghouse, а також на досвід Китаю з будівництва AP1000.

Станом на 2023 р. прийняття рішень щодо вибору для впровадження в Україні будь-якого з проєктів малих модульних реакторів є передчасним і науково не обґрунтованим.

При формуванні тематики фундаментальних і прикладних наукових досліджень варто передбачати пріоритетні завдання, спрямовані на вирішення питань, пов'язаних з розвитком ядерної енергетики. Крім того, слід забезпечити подальше виконання прикладних досліджень з розроблення наукової і техніко-економічної основи оптимального вибору перспективних ядерних установок для України.

## REFERENCES

### [СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Energy strategy of Ukraine until 2035 “Safety, energy efficiency, competitiveness”. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 605 of 18.08.2017 (in Ukrainian). <https://bit.ly/3LfdCWq>  
[Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Розпорядження КМУ № 605-р від 18.08.2017.]
2. The Database on Nuclear Power Reactors. <https://pris.iaea.org/pris/>
3. Ramana M.V. Eyes Wide Shut: Problems with the Utah Associated Municipal Power Systems Proposal to Construct NuScale Small Modular Nuclear Reactors. Oregon Physicians for Social Responsibility. Oregon PSR, 2020. <https://bit.ly/401HXf4>
4. Krall L.M., Macfarlane A.M., Ewing R.C. Nuclear waste from small modular reactors. *PNAS*. 2022. **119**(23): 1–12. <https://doi.org/10.1073/pnas.2111833119>

Volodymyr I. Borysenko

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3035-0760>

## PROSPECTIVE DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF THE NUCLEAR ENERGY INDUSTRY OF UKRAINE

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, February 8, 2023

The report provides information on the current state of nuclear energy in Ukraine and the world, analyzes the general trends that are observed in the electric power industry. Currently, 12 out of 15 power units of Ukrainian NPPs are already operating beyond design life, so in 10–20 years the time will come for their decommissioning, therefore the question of a reasonable choice of promising reactor technology for its further implementation in Ukraine is relevant. The technical and economic parameters of modern reactor units, both already implemented at nuclear power plants in the world, and those under development, which can be competitive if they are successfully implemented, are considered. Such projects include innovative fourth-generation reactor units and small modular reactors. The problematic issues of the prospects for the introduction in Ukraine of not yet tested reactor technologies are discussed.

**Keywords:** reactor technologies, innovative nuclear reactors, generation IV nuclear reactors, small modular reactors.

**Cite this article:** Borysenko V.I. Prospective directions of development of the nuclear energy industry of Ukraine. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. (4): 51–61. <https://doi.org/10.15407/visn2023.04.051>