

СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КОМПЛЕКСНІ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГЕТИКИ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy, 2019, 1(56): 24–30
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2019.01.0024>

УДК 621.311.183

С.І. АЗАРОВ¹, д-р техн. наук, ст. наук. співр.,
В.Л. СИДОРЕНКО², канд. техн. наук, доц., **О.С. ЗАДУНАЙ**³

¹Інститут ядерних досліджень НАН України, пр. Науки, 47, м. Київ, 03680, Україна

²Інститут державного управління у сфері цивільного захисту,
вул. Вишгородська, 21, м. Київ, 04074, Україна

³Державний науково-дослідний інститут спеціального зв'язку
та захисту інформації, вул. Залізняка, 6, м. Київ, 03142, Україна

ОГЛЯД СТАНУ СВІТОВОЇ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Проаналізовано розвиток ядерної енергетики у світі, вплив на нього масштабних аварій на атомних електростанціях, зокрема і на японській «Фукусіма-1». Виділено пріоритетні властивості реакторів під час розробки ядерних енергетичних установок підвищеної безпеки в провідних країнах світу. Приведено статистичні дослідження щодо вікових категорій працюючих енергоблоків. Показано сучасну тенденцію розвитку ядерної енергетики в різних країнах світу, цінову складову світового енергоринку. Підкреслено необхідність підвищення безпеки атомних електростанцій. Зазначено інноваційні технології реакторів III покоління. Наголошено та тому, що ядерна енергетика є найважливішою складовою світового енергобалансу і на даний момент їй немає серйозних альтернатив.

Ключові слова: ядерна енергетика, атомна енергетика, МАГАТЕ, ядерна енергетична установка, атомна електростанція, безпека.

На початок лютого 2016 р. на всіх атомних електростанціях (АЕС) світу знаходилося в експлуатації 437 ядерних реакторів сумарною потужністю 372,6 ГВт (ел.). З урахуванням цих реакторів і 143-х виведених з експлуатації або що знаходяться в даний час у заглушеному стані енергоблоків АЕС загальний досвід експлуатації атомних реакторів складає 15,2 тис. реакторо-років [1]. АЕС продовжують займати досить міцні позиції в світовій електроенергетиці. На їх частку припадає 16% світового виробництва електроенергії, а в окремих країнах ця частка перевищує 50 і навіть 70%. Дані МАГАТЕ про частку АЕС у виробництві електроенергії станом на кінець 2010 р. надано в табл. 1.

Тут же показано розподіл енергоблоків АЕС за країнами світу та загальна електрична потужність діючих в них АЕС на кінець 2010 р. В дужках наведено кількість енергоблоків, що будувалися на той час у цих країнах.

© С.І. АЗАРОВ, В.Л. СИДОРЕНКО, О.С. ЗАДУНАЙ, 2019

Реакція Німеччини на «фукусимську аварію» – з 17 атомних реакторів було зупинено 8, в результаті чого частка АЕС у виробництві електроенергії знизилася з 28,4 до 22,6%. Але наймасштабніший вихід АЕС з електроенергетики відбувся в Японії [3]. Тут до травня 2012 р. для проведення профілактичних і ремонтних робіт було зупинено всі АЕС. Тим часом за кількістю працюючих енергоблоків, а також за сумарною потужністю ядерних реакторів Японія була третьою в світі після США (104 реактора) і Франції (58 реакторів). На АЕС припадало близько 30% виробленої в країні електроенергії, а до 2018 р. планувалося збільшити цей показник до 41%. З табл. 1 видно, що електроенергетика багатьох країн спирається саме на АЕС, причому, роль останніх у виробництві електроенергії набагато вище, ніж в Японії. Абсолютним світовим лідером за вкладом АЕС до загального обсягу виробленої електроенергії, безумовно, є Франція (74,1%). Однак 30%-ий рівень, на який вийшла Японія, перевищили багато країн Європи – Бельгія, Болгарія, Південна Ко-

Таблиця 1. Розподіл блоків АЕС за країнами світу (2011 р.) [2]

Країна	Кількість	Загальна електрична потужність блоків, МВт	Частка АЕС у виробництві електроенергії, %	Країна	Кількість	Загальна електрична потужність блоків, МВт	Частка АЕС у виробництві електроенергії, %
Аргентина	2 (1)	935	5,9	Південна Корея	21 (5)	18698	32,2
Бельгія	7	5927	51,2	Росія	33 (10)	23643	17,1
Болгарія	2 (2)	1906	33,1	Румунія	2	1300	19,5
Бразилія	2 (1)	1884	3,1	Словаччина	4 (2)	1816	51,8
Велика Британія	18	9920	15,7	Словенія	1	688	37,3
Вірменія	1	375	39,4	США	104 (1)	101240	19,6
Голландія	1	482	3,4	Тайвань	6 (2)	4982	19,3
Індія	20 (6)	4391	2,9	Угорщина	4	1889	42,1
Іран	1	915		Україна	15 (2)	13107	48,1
Іспанія	8	7567	20,1	Фінляндія	4 (1)	2716	28,4
Канада	18	12569	15,1	Франція	58 (1)	63130	74,1
Китай	16 (26)	11680	1,8	Чехія	6	3678	33,3
Мексика	2	1300	3,6	Швейцарія	5	3263	38,0
Німеччина	9	12068	22,6	Швеція	10	9298	38,1
Пакистан	3 (1)	425	2,6	Японія	50 (2)	44102	29,2
ПАР	2	1800	5,2	Разом	435 (63)	367694	

рея, Словаччина, Словенія, Угорщина, Україна, Чехія, Швеція, Швейцарія.

Станом на кінець 2011 р. в процесі будівництва знаходилися 63 блока, з них 26 блоків – в Китаї, 10 – в Росії, 6 – в Індії, 5 – в Південній Кореї. Розвиток ядерної енергетики (ЯЕ) на той час планували Албанія, Алжир, Бангладеш, Білорусь, Венесуела, В'єтнам, Єгипет, Індонезія, Йорданія, Казахстан, Лівія, Литва, Марокко, Ні-

герія, Об'єднані Арабські Емірати, Таїланд, Туніс, Туреччина.

На рис. 1 представлено динаміку нарощування ядерної генерації в світі за роками [2].

Всього з моменту початку експлуатації атомних станцій в 14 країнах світу сталося понад 150 інцидентів і аварій різного ступеня складності [4]. Найбільш характерні з них: 1957 р. в Уіндскейлі (Англія), 1959 р. в Санта-Сюзанні (США),

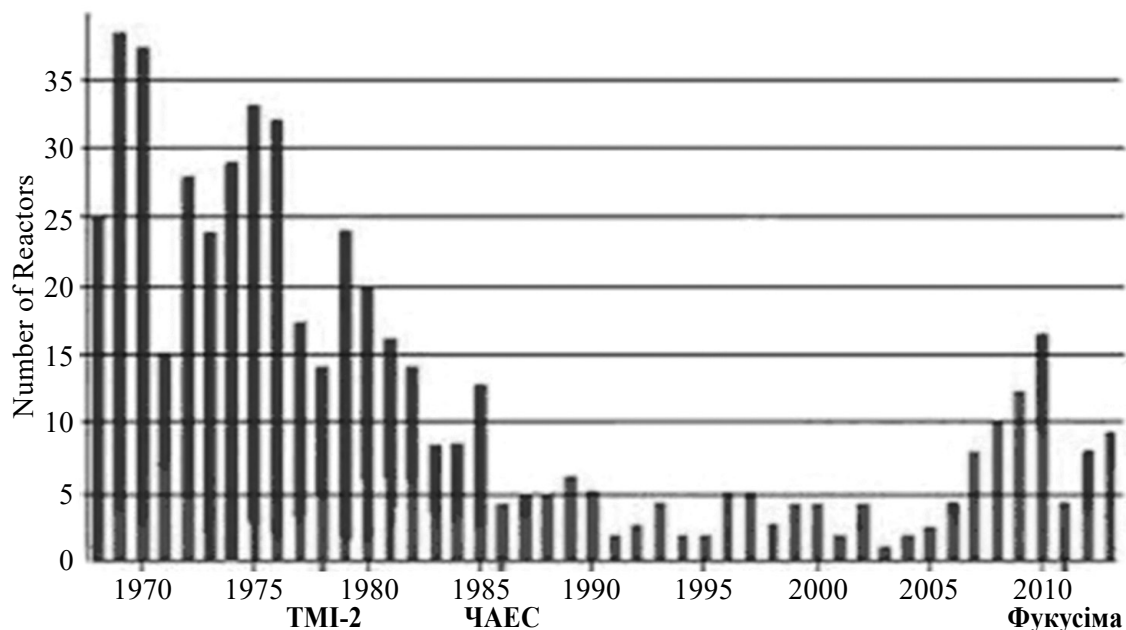


Рис. 1. Кількість енергоблоків, що вводилися в експлуатацію в різні роки в світовій ЯЕ

1961 р. в Айдахо-Фолс (США), 1979 р. АЕС Три-Майл-Айленд (США), 1986 р. на Чорнобильській АЕС (Україна), 2011 р. на АЕС «Фукусіма-1» (Японія).

Згідно з міжнародною шкалою ядерних подій (INES) [5], за весь період експлуатації всіх наявних у світі реакторів АЕС найбільшими аваріями є: в Англії (Уіндекейл, 1957 р.) – відповідає 5-му рівню (з ризиком для навколишнього середовища) за шкалою INES; в США (Три-Майл-Айленд, 1979 р.) – відповідає 5-му рівню за шкалою INES; СРСР (Чорнобиль, 1986 р.) і Японія («Фукусіма-1», 2011 р.) – відповідає 7-му рівню (глобальна) за шкалою INES.

З рис. 1 видно, що перший спад у світовій ЯЕ намітився після аварії на АЕС Три-Майл-Айленд в 1979 р. Після аварії на Чорнобильській АЕС з 1986 р. протягом 20 років зберігалася негативна реакція на розвиток ЯЕ, але поступово вона змінилася на позитивні тенденції зростання ядерної генерації. Після аварії на «Фукусіма-1» в 2011 р. після короткотривалого спаду зростання ЯЕ швидко відновився. В кінці 80-х років минулого століття під час оцінки можливих наслідків аварійних ситуацій на АЕС виходили з того, що ймовірність реалізації великої (важкої) радіаційної аварії з плавленням активної зони реактора і виходу значних кількостей радіоактивних речовин за межі енергоблоку мають ймовірність не вище одного випадку на 20 тис. реакторо-років [6]. У цьому ж звіті зазначалося, що радіаційна аварія на енергоблоці АЕС з економічним збитком на рівні 1 млрд дол. має ймовірність реалізації не вище одного випадку на 1 млн реакторо-років. Однак життя показало, що менше, ніж за шістьдесят років розвитку ЯЕ і загальної тривалості експлуатації атомних енергоблоків АЕС трохи перевищує 15 тис. реакторо-років в США (аварія на АЕС ТМІ-2 в 1979 р.), в Україні (аварія на Чорнобильській АЕС в 1986 р.) і в Японії (аварія на АЕС «Фукусіма-1» в 2011 р.) відбулися радіаційні аварії з плавленням активної зони ядерних реакторів і з економічними втратами в десятки млрд дол. Відповідно до класифікації Міжнародної шкали ядерних подій (International Nuclear Event Scale, INES), розробленої МАГАТЕ в 1988 р., радіаційні аварії та інциденти можуть бути оцінені за восьмибальною шкалою, за нульовий рівень, в якій прийнято несуттєві для безпеки події.

Відповідно до сучасних оцінок, до максимального 7-го рівня належать аварії на ЧАЕС і АЕС «Фукусіма-1», а до рівня 5 – аварія на АЕС ТМІ-2. Тут доречно зазначити, що шкала INES має логарифмічний характер і перехід на наступний рівень означає, що масштаби наслідків такої

аварії зростають приблизно в 10 разів. Таким чином, аварії на ЧАЕС і АЕС «Фукусіма-1» (рівень 7) за радіаційними наслідками виявляються приблизно в 100 разів більш значимими аваріями, ніж на АЕС ТМІ-2 [7].

У 90-ті роки ХХ століття в багатьох промислово розвинених країнах, таких як США, ФРН, Франція, Канада, Японія, Швеція і Швейцарія велися розробки ЯЕУ підвищеної безпеки, що економічно могли б конкурувати зі станціями на традиційному паливі з виробництва тепла [8]. Розробники ЯЕУ в рамках «концепції реактора підвищеної безпеки» розглядали в якості пріоритетних наступні властивості реакторів:

- зменшення зазору між корпусом реактора і страхувальним корпусом для гарантованого попередження зневоднення активної зони під час розгерметизації;

- припинення ядерної реакції і відведення тепла за допомогою сил гравітації;

- використання внутрішніх властивостей безпеки в конструкції обладнання і захисних бар'єрів: гравітація (природна циркуляція), термічні й гідравлічні закони передачі тепла, руху і масообміну, захищеність від вибухів «гримучої» суміші під час використання води в якості теплоносія і сповільнювача, зменшення запасеної в теплоносії енергії за рахунок зниження робочих параметрів;

- виключення проникнення радіоактивності за межі захисних бар'єрів і до споживача електроенергії або тепла;

- розхолодження активної зони без участі експлуатаційного персоналу;

- зниження енергонапруженості ядерного палива;

- захист від зовнішніх впливів, пов'язаних з діяльністю людини: близькі вибухи, падіння літака тощо;

- виготовлення за допомогою заводських модулів;

- розбиття потужності на кілька блоків як можливість зменшення зони планування захисних заходів за межами майданчика атомних електростанцій (АЕС) і їх розміщення ближче до споживачів її продукції, можливість більш швидкого, гнучкого, вчасного і поступового нарощування потужностей;

- різноманітність і гнучкість неелектричних застосувань, включаючи когенерацію.

Вибору прогресивних напрямків розвитку ЯЕ і прогнозами її розвитку в Японії після аварії на АЕС «Фукусіма-1» приділяється велика увага [9]. Зокрема, японські фахівці вважають, що особливу увагу слід звернути на створення наступного покоління легководних реакторів, які завдяки використанню передових

технологій сейсмоізоляції не пред'являють особливих вимог до місць будівництва, мають ресурс близько 80 років і працюють на паливі зі ступенем збагачення більше 5%. Вони вважають, що такі реактори можуть бути створені після 2025 р.

Слід зазначити, що під час будівництва АЕС проектний термін служби в минулому столітті оцінювався 30 роками, а фактичні терміни служби були набагато менші. Так, статистичні дослідження показують, що з 1963 р. (за винятком 1986–1990 рр.) у середньому в світі зупинили для виведення з експлуатації 8 енергоблоків АЕС в рік. З 1986 до 1990 р. було зупинено 37 енергоблоків АЕС в 9 країнах. Середній фактичний термін служби реакторів, зупинених з 1963 до 1975 р., склав менше 6,5 років, зупинених з 1990 до 1998 р. – 24 роки, з 1997 до 1998 р. – більше 25 років. Середній термін служби останніх 85 з усіх зупинених енергоблоків становить всього 17 років. У даний час основна маса працюючих енергоблоків мають вік близько 30 років (рис. 2).

Після аварії на АЕС «Фукусіма-1» країни розділилися на три групи. Частина країн взагалі відмовилася від ЯЕ. У цьому контексті досить показовий виступ Комісара з питань енергетики ЄС пана Етінгера, який заявив, що «ЄС – це демократичний союз, тому він буде шановливо ставитися до кожного рішення, але ми будемо з розумінням ставитися до позиції тих країн, які не хочуть розвивати атомну енергетику». Влітку 2011 р. після аварії на АЕС «Фукусіма-1» він

же заявляв наступне: «У нас демократія. Кожна країна приймає рішення сама. Тому ми з повагою будемо ставитися до вирішення тих країн, що продовжать розвиток атомної енергетики, але в цілому Євросоюз стримано до цього ставиться». Сам пан Етінгер уродженець Німеччини, він є противником розвитку ЯЕ.

У Німеччині відразу остаточно були зупинені 8 енергоблоків, а останній з них буде зупинений у 2022 р. У Швейцарії усі блоки будуть зупинятися в міру вироблення їх ресурсу. Останній блок повинен бути зупинений в 2034 р., але це рішення поки не затверджене парламентом і в майбутньому може бути переглянуто. Згідно з даними опитування, проведеного восени 2013 р., більшість населення Швейцарії висловилися на підтримку атомної енергетики. Громадяни країни вважають, що якщо АЕС безпечні (а їх в Швейцарії п'ять), то вони можуть працювати і далі. Італія, що зупинила всі свої блоки ще в 1988 р. після Чорнобильської аварії, але планувала розвивати ЯЕ, від неї відмовилася. У Німеччині до 2022 р. у буде зупинено всі реактори, що забезпечують 22,6% електроенергії. З експортера електричної енергії Німеччина вже в березні 2012 р. перетворилася в її імпортера. Від використання атомної енергії відмовилися Італія і Іспанія, Венесуела, Філіппіни, Ізраїль, Марокко, Туніс, Уругвай, Кувейт планували розвиток ЯЕ, але після аварії на «Фукусіма-1» відмовилися.

До другої групи належать країни, що відклали прийняття рішення щодо розвитку ЯЕ. Бель-

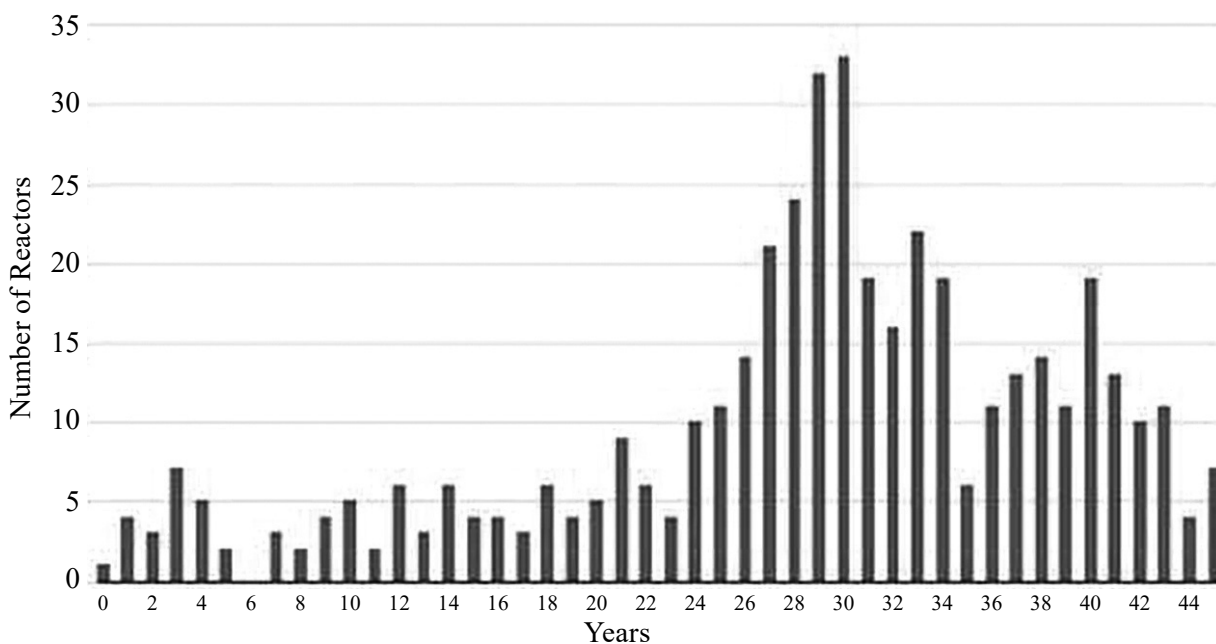


Рис. 2. Вік енергоблоків

гія, в якій понад 50% електроенергії припадає на ядерну генерацію, рішення поки не прийняла. Таїланд, який планував розвиток ЯЕ, відклав реалізацію цих намірів до кращих часів.

Після аварії на АЕС «Фукусіма-1», як показали опитування, за відмову від атомної енергетики виступали 80% населення Японії. Разом з тим, більшість опитаних вважає, що повна відмова від неї можлива лише в довгостроковій перспективі. Брак електроенергії, що виник після відключення японських АЕС, відчутно вплинув на життя країни. Істотне поглиблення процесів енергозбереження в господарській сфері, тим більше негайне, було практично нереальним, оскільки Японія вже давно вийшла тут на рівень найвищої енергоефективності. Високої економічності досягла побутова і офісна техніка, так що для подальшої економії електрики в побуті і в установах залишається лише обмежувати використання певної її частини, в першу чергу, обігрівачів та кондиціонерів. Оскільки Японія розташовується в межах одного часового поясу, то у разі гострої нестачі електроенергії в денний час має місце її надлишок вночі. Не бракує її і в загальноприйнятті вихідні дні. Тому багато підприємств перебудували свій графік, перемістивши робочі зміни на дні та години менш напружені за витратами електроенергії. Однак всі прийоми пристосуватися до моделі «урізаного енергоспоживання» лише ще сильніше підкреслюють необхідність вирішувати цю проблему на великомасштабному загальнонаціональному рівні. І, зрозуміло, використовуючи традиційні енергоносії, а не малопотужні і дорогі установки з альтернативними джерелами енергії, що характеризуються до того ж непередбачуваним надходженням енергії від цих джерел. Тому основним способом пом'якшення енергетичної проблеми стало збільшення споживання газу, однак, виникли певні труднощі через обмежені можливості терміналів з прийому зрідженого газу.

Енергетична проблема Японії стала свого роду катализатором гострих обговорень перспектив ЯЕ в усьому світі. Загальна думка фахівців зводиться до того, що після серйозної аварії на японській АЕС, поставленої в один ряд з Чорнобильською, розвиток світової атомної енергетики не зупиниться, так само як воно не зупинилося і після Чорнобильських подій. Безумовно, старі АЕС будуть закриватися, але через деякий час почнеться будівництво нових, більш досконалих з точки зору безпеки їх робочого процесу і можливого впливу на навколишнє середовище.

На думку соціологів Левада-центру та незалежного агентства Remarket, заснованому на даних опитувань громадської думки, проведених

в період 2009–2013 р., населення бачить в атомній енергетиці енергетичне майбутнє країни. На зміну нафти і газу нічого більш вагомого, крім атомної енергії, не існує. Більше 30% опитаних після подій 2011 р. на «Фукусіма-1» вже в 2013 р. висловилося за активний розвиток ЯЕ, 39% – за збереження на нинішньому рівні і тільки 20% виступили за необхідність згорнути ЯЕ.

У Великій Британії протягом останнього десятиліття підтримка ЯЕ постійно зростає. Викликаний «Фукусімою-1» ефект зниження підтримки проіснував недовго: вже до кінця 2011 р. 50% респондентів виступали за будівництво нових АЕС в країні. У Німеччині 65% респондентів вважають, що розворот її енергетичної політики не впливає на плани розвитку ЯЕ в інших країнах, 31% – вважає, що такий вплив є, 55% висловилися проти німецького політичного втручання в процес прийняття рішень про використання ЯЕ в інших країнах. 85% респондентів вважають, що ядерні дослідження повинні, як і раніше, займати провідне місце в німецькій науці і заслуговують відповідного фінансування. У Франції тільки 8% опитаних (у 2011 р., відразу після «Фукусіма-1», таких було 18%) назвали ризики ЯЕ основною причиною для занепокоєння. У Швейцарії 74% громадян продемонстрували зростаючу довіру до місцевих АЕС (відразу після «Фукусіма-1» їх було 68%). Майже 64% респондентів вважають ЯЕ досить недорогим. У Швеції 49% опитаних підтримують будівництво нових енергоблоків АЕС на заміну вибуваючим, 30% виступають проти, а 21% займають невизначену позицію. Суб'єктивне відчуття небезпеки у шведів (кожен десятий сприймає ЯЕ із занепокоєнням і страхом) залишається важливою проблемою для ЯЕ.

У Парижі 10 лютого 2012 р. пройшла зустріч учасників нового об'єднання на підтримку ЯЕ, в якому представлено 12 країн Євросоюзу, що експлуатують АЕС (Франція, Велика Британія, Іспанія, Нідерланди, Швеція, Фінляндія, Чехія, Словаччина, Словенія, Угорщина, Румунія, Болгарія), і 4 країни, що планують їх будівництво (Польща, Литва, Естонія і Латвія). Нове неформальне об'єднання буде виступати зі спільними ініціативами щодо її сталого розвитку.

Більшість країн світу (третья група): США, Велика Британія, Китай, Франція й ін. прийняли рішення про продовження політики розвитку ЯЕ. Зараз у світі будуються більше 60 енергоблоків і більше 150 проектів нових АЕС знаходяться на стадії ліцензування і на просунутій стадії розробки. Турція, В'єтнам, Бангладеш, Йорданія, ОАЕ, що почали будувати АЕС, підтвердили плани подальшого розвитку ЯЕ. Польща, Саудівська Аравія, Єгипет також планують

будівництво АЕС. Китай має потужну перспективну програму розвитку ЯЕ. Два нових блоки з реакторами PWR будуть побудовано на АЕС «Пакш» в Угорщині. Чехія має намір добудувати АЕС «Темелін», в Фінляндії одночасно з добудовою третього блоку АЕС «Олкілуото» починають реалізацію проекту АЕС «Ханхіківі». Болгарія активно опрацьовує плани з будівництва енергоблоку «Козлодуй-7». Уряд Польщі схвалив програму розвитку ЯЕ, представлену Міністерством економіки. Відповідно з програмою, в країні буде побудовано дві атомні станції. Ці приклади підтверджують наміри Європи розвивати атомну енергетику. Європа вже позбулася «синдрому Фукусіми» і неупереджений аналіз різних варіантів енергозабезпечення показав, що саме атомна енергетика здатна забезпечити європейські країни достатньою кількістю екологічно чистої енергії.

До лютого 2014 р. громадська думка відновила своє уявлення про ЯЕ. Франція, де три чверті енергії виробляють АЕС, не відмовляється від своїх програм розвитку АЕ. Для малих європейських країн атомна енергетика стане менш доступною. Єврокомісія не дозволить їм будувати нові реактори. Тому Європі доведеться більше заощаджувати, вкладати чималі кошти в розвиток відновлюваної енергетики, збільшувати імпорт природного газу, займатися видобутком сланцевого газу. Більші кошти інвестуються в генеруючі потужності, технології та енергопередачу, енергозбереження та енергонакопичення.

Дисбаланс у розвитку енерготехнологій та прийнятті вольових політичних рішень впливає на цінову складову світового енергоринку. Найдорожча на сьогоднішній день електроенергія в Данії, де частка поновлювальних джерел енергії (ПДЕ) становить близько 40%, і вартість електроенергії становить 29 цент/кВт·год. Але оскільки в цій європейській країні відсутня енергоємна промисловість, а вся електроенергія, в основному, витрачається на побутові цілі, національний ВВП менш чутливий до вартості електроенергії. У Німеччині, де частка ПДЕ в енергогенерації становить 25%, ціна електроенергії сьогодні складає 25 цент/кВт·год. Плануючи довести частку генерації ПДЕ до 50%, німецька продукція ризикує стати неконкурентоспроможною. У країні багато енергоємних промислових гігантів. Щоб замінити 16% ядерної генерації на ПДЕ, буде потрібно близько 150 млрд євро. Німецькі енергокомпанії подали в суд, вимагаючи компенсацію від уряду в розмірі близько 20 млрд євро за втрачену вигоду через закриття АЕС і витрачені кошти на їх модернізацію для підвищення безпеки.

Одна з найнижчих цін на електроенергію (14 цент/кВт·год) у Франції, де частка ядерної генерації 78%. У Болгарії ціна енергії, виробленої АЕС «Козлодуй», становить 2,2 цент/кВт·год, сонячних електростанцій – 35 цент/кВт·год і вітряних – 9,5 цент/кВт·год. Тобто сонячна електроенергія в 17 разів дорожче електроенергії, одержуваної від АЕС «Козлодуй».

Відновлювана енергетика на сьогоднішній день має цілий ряд недоліків, основні з яких – проблема підключення ПДЕ до мереж і низька ефективність. Порівняння річної ефективності для різних видів генерації (сонячна енергетика – 1350 год; вітроенергетика – 1700 год; гідроенергетика – 2200 год; атомна енергетика – 7960 год) демонструє перевагу атомної енергетики.

На даний момент атомній енергетиці немає серйозних альтернатив. Більш того, посилення вимог до безпеки АЕС неминуче призведе до виведення з експлуатації найбільш старих станцій (особливо в Західній Європі і США), що потребують будівництва нових потужностей. Китай і Індія, де потреба в енергії швидко зростає, згортали свої ядерні програми не збираються, будуть більш обережно дивитися на нові проекти АЕС і посилять порядок отримання ліцензій, будуть переглянуті схеми розміщення нових атомних об'єктів. Індія планує побудувати 23, Китай – 77 АЕС. Проте, практично підготовлений ввід першого блоку з реактором ВВЕР на індійській АЕС Куданкулам був відкладений через стрімко виникнену опозицію населення. Страх перед новою ядерною катастрофою змусив уряди цих країн форсувати програми розвитку альтернативних, відновлювальних джерел енергії. У Південній Кореї функціонує 21 реактор, що забезпечує третину всієї електроенергії країни. Заплановано будівництво ще 11 реакторів. За оцінкою Торгової палати США, обсяг світового ринку ядерної продукції, послуг і палива за 10 наступних років складе 500–740 млрд дол. Після короткочасного спаду, викликаного післяфукусімським синдромом, почалося зростання кількості задіяних реакторів. На сьогодні 15 країн світу будують 66 реакторів – у цей перелік включено і плановані два реактори на Хмельницькій АЕС.

За проектами «Покоління 3+» (реактори з підвищеними вимогами безпеки) на даний час споруджується тільки 4 блоки. Решта блоків споруджуються за проектами покоління 2+ і 3. Китай в 2015 р. запустив 8 блоків CPR1000 (другого покоління). На Південнокорейській АЕС «Шин-Корі» споруджується два енергоблоки з APR-1400 з одинарною захисною оболонкою. Експортний варіант для ОАЕ має подвійну оболонку (табл. 2).

Таблиця 2. Реактори III покоління

Реактор	Країна-проектант	Захист від зовнішніх впливів	Захисна оболонка реакторного залу	Наявність системи пасивного відводу тепла (СПВТ)
EPR-1600	Франція	+	Подвійна	+
AP-1000	США	+	Подвійна	+
APR-1400	Південна Корея	+	Одинарна (подвійна для експорту)	+

Наведені в табл. 2 проекти реакторів III покоління відрізняються наявністю інноваційних технологій:

- повністю цифрова система контролю і управління, включаючи системи безпеки АЕС;
- подвійна захисна оболонка над будівлею реактора;
- головні циркуляційні насоси на водяному мас-тилі;
- комплекс діагностики стану основного обладнання та металу АЕС, що не має аналогів;
- здатність енергоблоку АЕС працювати в режимі добового регулювання навантаження і багато іншого.

Головне завдання щодо запобігання серйозних аварій на АЕС – це усунути саму можливість пошкодження активної зони, втрати щільності оболонки реактора, виключити вихід радіоактивності в навколишнє середовище [10]. Для цього потрібно забезпечити гарантоване електропостачання АЕС після аварійної зупинки її власних енергоблоків і подачу води для охолодження активної зони протягом перших же годин. На станції повинні бути мобільні технічні засоби, що не пошкоджуються та дозволяють зробити охолодження реактора навіть в умовах повної ізоляції АЕС, тобто коли до неї не можна нічого доставити ззовні. Природно, що всі ці заходи виявляються ефективними лише за умови відмінної професійної підготовки персоналу станції. Важливою справою є вдосконалення міжнародноправових актів у сфері безпеки АЕС. Цілий ряд їх пунктів повинен мати не рекомендаційний, а обов'язковий характер. Крім того, необхідно поглиблювати наукові дослідження з атомно-енергетичної тематики і вести розробки нових схем і конструкцій. Велику увагу треба приділяти радіаційній та ядерній безпеці, вдосконаленню законодавства та технічного регулювання, вирішувати проблему централізованого зберігання відпрацьованого ядерного палива.

ВИСНОВКИ

Третій раз після аварії на «Фукусіма-1» атомна енергетика виявилася перед загрозою спалаху недовіри світової громадськості до атомних технологій. Для відновлення позитивного імпульсу розвитку ЯЕ має бути велика роз'яснювальна робота серед населення, фахівців і політиків. Японська трагедія – привід більш тверезо оцінювати ризики і відмовитися від економії на безпеці. Аналіз енергетичної безпеки світу підтверджує, що ЯЕ є найважливішою складо-

вою світового енергобалансу, без якої людство обійтися не може, і рівноцінної заміни їй поки що не знайдено. Абсолютною більшістю країн прийнято рішення про продовження розвитку ЯЕ. Ключовим питанням розвитку ЯЕ є її безпека, тому у всьому світі різко посилені вимоги до безпеки АЕС, що повинні виконуватися завжди і всюди.

Сподіваємося, отримані уроки підуть людству на користь. Атомні реактори стануть набагато надійнішими і безпечнішими. І тоді, якщо в майбутньому і відбудеться велика аварія на АЕС, то лише через пряме попадання в неї астероїда. Наш головний обов'язок – винести з аварії на «Фукусіма-1» усі корисні уроки і застосувати отримані знання в подальшому на практиці.

1. Азаров С.І., Задунай О.С., Євланов В.М. Методичні основи екологічного аудиту АЕС. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2017. № 2(10). С. 48–59.
2. Nuclear Power Reactors in the World. Vienna, June 2011. P. 10–11. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=3607> (дата звернення: 12.10.2018).
3. Азаров С.І., Задунай О.С., Євланов В.М. Аналіз аварії на АЕС Fukushima-Daiichi. *The scientific heritage* (Budapest, Hungary). 2018. No. 27. P. 41–49.
4. Матвєєва І.В., Азаров С.І., Кутлахмедов Ю.О., Харламова О.В. Стійкість екосистем до радіаційних навантажень: монографія. К.: НАУ, 2016. 396 с.
5. ИИЕС руководство для пользователей международной шкалы ядерных и радиологических событий: пер. с англ. МАГАТЭ, 2010. 250 с.
6. Projected Cost of Generating Electricity 2010. Paris: OECD / IEA, 2010. P. 35–37.
7. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Серета Ю.П. Порівняльний аналіз радіоекологічних наслідків аварій на ЧАЕС та «Фукусіма-1». *Радіоекологія-2017*: зб. ст. наук.-практ. конф. із міжнар. уч. (Київ, 24–26 квітня 2017 р.). Житомир: Вид-во ЕЦ «Укрекобіокон», 2017. С. 29–33.
8. Атомная промышленность и наука в атомной сфере. Наука в атомной сфере. URL: http://matkb.ru/nauka_atom/promatom74 (дата звернення: 12.10.2018).
9. Examination of accident at Tokyo Electric Power Co., Inc.'s Fukushima Daiichi Nuclear Station and Proposal of Countermeasures. JNTI, 2012. P. 35–42.
10. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Аналіз факторів техногенного впливу АЕС на довкілля. *Екологічна наука*. 2018. Вип. 1(20). Т. 1. С. 57–65.

Надійшла до редколегії: 10.01.2019