

А. В. Носовський*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна*

Щодо перспектив будівництва нових атомних електричних станцій

Ключові слова:

ядерна енергетика,
атомні електричні станції,
будівництво нових
ядерних енергоблоків,
економічна ефективність,
рівень безпеки,
тип реакторної установки.

Розглянуто основні проблеми будівництва нових енергоблоків атомних електростанцій (АЕС), проаналізовано стан ядерної енергетики у світі, наведено основні фактори, що стримують розвиток ядерної енергетики. Показано, що зростання потреби в електроенергії, а також економічна ефективність і конкурентоспроможність ядерної енергетики порівняно з іншими шляхами виробництва електроенергії є ключовими факторами для будівництва нових АЕС. Зроблено висновки, що важливим завданням для ядерної енергетики України поряд з забезпеченням експлуатації енергоблоків АЕС у понадпроектні строки є дослідження з обґрунтування оптимального вибору перспективних ядерних установок для заміщення енергоблоків, які виводять з експлуатації. Тому, враховуючи тенденції на ринку постачання електроенергії в Україні і світі, одним із шляхів є оновлення парку існуючих в Україні енергоблоків з водо-водяними енергетичними реакторами на перспективні, більш економічні і безпечні реакторні установки нового покоління. З метою обґрунтування вибору типу реакторної установки необхідно розробити наукові і техніко-економічні основи оптимального вибору перспективних ядерних установок.

Вступ

Електростанції будь-якого типу повинні бути економічно ефективними і при цьому безпечними. Отже, безпека та економічна ефективність є основними критеріями експлуатації енергоблоків атомних електростанцій (АЕС). У деяких країнах АЕС були побудовані насамперед для забезпечення національної безпеки електропостачання. Зменшення залежності від імпортованого органічного палива з непередбачуваними ціновими перспективами залишається важливим завданням для країн, що не мають значних власних запасів нафти, газу та вугілля.

АЕС, що були побудовані понад 40 років тому і перебувають сьогодні в експлуатації, демонструють відповідність економічним реаліям сьогодення і конкурентоспроможність. Коефіцієнти використання

встановленої потужності (КВВП) АЕС значно збільшились, що дозволяє виробляти більше електроенергії за тієї ж встановленої потужності. Експлуатаційні затрати на АЕС є передбачуваними на відміну від електростанцій, що працюють на спалюваному органічному паливі, де мінливі ціни на паливо значно впливають на вартість виробленої електрики.

Світове виробництво енергії та її споживання останнім часом зростає з темпами приблизно 2% на рік, і згідно з більшістю прогнозів ці темпи зберігатимуться до 2030 р. [1]. Сьогодні близько 1,65 млрд людей у країнах, що розвиваються, відчувають нестачу електричної енергії. Світовий попит на електрику практично подвоїться в період до 2030 р., а щорічний темп зростання становитиме 1,6%. Зважаючи на це, уже найближчим часом будуть потрібні значні інвестиції в нові потужності генерування.

© А. В. Носовський, 2019

Стан ядерної енергетики у світі

Станом на 01.09.2019 р. у 30 країнах світу на АЕС експлуатуються 450 енергоблоків. У 18 країнах ведеться будівництво 62 нових енергоблоків [2]. В європейських країнах експлуатуються 183 енергетичних реактори. Частка ядерної енергії в електропостачанні Франції у 2018 р. становила 71,7%, Словацької Республіки — 55%, Бельгії — 39% та України — 53%. В електропостачанні деяких країн, таких як Італія, Португалія та Австрія, частка ядерної енергії також становить значну частину. Ці країни не експлуатують свої ядерні установки, але імпортують електричну енергію, вироблену на АЕС в інших країнах.

В умовах загальної тенденції до закриття АЕС у багатьох країнах у зв'язку з політикою відмови від ядерної енергетики за останні 10 років роль ядерної енергетики в балансі виробництва електроенергії не зазнала значних змін. З експлуатації виводили здебільшого блоки застарілих конструкцій та малої потужності. У деяких країнах Західної Європи, що мають ядерно-енергетичні програми розвитку, їх здійснення було зупинене. Таке рішення було ухвалено урядами і парламентами цих країн під тиском політичних сил і у зв'язку з масштабними аваріями на АЕС Три-Майл-Айленд у США, Чорнобилі та Фукусіма-1 у Японії. Основне рішення стосувалося зупинки вже розпочатого будівництва нових блоків, а в деяких країнах — дострокового зняття діючих блоків з експлуатації. Політичні сили істотно вплинули на стан ядерної енергетики у двох країнах: в Італії — повна одночасна відмова від ядерної енергетики, у Німеччині — поступова відмова від ядерної енергетики.

Особливо важливу роль у визначенні ядерно-енергетичної стратегії зіграли політичні сили Німеччини, які проводять політику, спрямовану на повну відмову від ядерної енергетики. Запланована заміна АЕС джерелами енергії на відновлювальних енергоносіях без відповідної економічної компенсації не зможе забезпечити стійкого енергопостачання. Для вирішення проблеми майбутнього розвитку електроенергетики необхідне рішення, яке б не заперечувало з ідеологічних міркувань значення ядерної енергетики для економіки, охорони довкілля та сталого розвитку країни. Незважаючи на заявлену політику, значна частина населення Німеччини підтримує продовження експлуатації АЕС. Проти рішення уряду виступають мешканці деяких областей, особливо землі Баден-Вюртемберг, на території якої розташо-

вано 58% загальної кількості АЕС. Вони виступають за подовження строку їхньої експлуатації [3].

Італія — єдина країна Західної Європи, яка мала масштабну програму розвитку ядерної енергетики і повністю відмовилась від використання АЕС. Усього було побудовано чотири енергоблоки АЕС. Однак аварія на Чорнобильській АЕС у 1986 р. так сильно вплинула на суспільну думку, що питання про ядерну енергетику стало однією із ключових проблем. У 1988 р. було припинено будівництво нових енергоблоків, а в 1990 р. були зупинені всі діючі енергоблоки АЕС. У 1999 р. уряд ухвалив програму демонтажу всіх ядерно-енергетичних об'єктів.

В Іспанії в експлуатації перебуває 7 блоків АЕС, на яких виробляється 20,4% усієї електроенергії. Для підвищення надійності та безпеки роботи АЕС на них була проведена модернізація, що дало змогу значно збільшити потужність діючих енергоблоків. Це свідчить про те, що Іспанія не збирається повністю відмовлятися від використання ядерної енергії.

Бельгія однією з перших країн Західної Європи почала реалізацію ядерно-енергетичної програми: перша дослідна АЕС з реактором PWR була побудована в 1962 р. На 7 енергоблоках АЕС Бельгії виробляється близько 39% загального обсягу електроенергії. У 2002 р. кабінет міністрів схвалив проект закону про виведення АЕС із експлуатації починаючи з 2015 р. У разі відмови від АЕС ціна на електроенергію зросте і Бельгія буде змушена імпортувати 85% загального спожитого обсягу електроенергії у вигляді газу. Тому у 2009 р. уряд Бельгії вирішив відкласти на 10 років перший етап запланованого згорання ядерної енергетики і підписав угоду про продовження строку експлуатації АЕС до 2025 р.

Частка ядерної енергетики у виробництві електроенергії Великобританії становить близько 18%. Нині обговорюється питання про необхідність негайного планування будівництва нових АЕС, оскільки потреба в заміні діючих блоків може з'явитися вже в найближчі роки. Сучасна позиція уряду щодо ядерної енергетики базується на тому, що перспективи будівництва нових АЕС визначає ринок, зважаючи на питання безпеки, економічності та ставлення громадськості.

У Фінляндії, яка однією з перших країн Західної Європи перейшла до вільного ринку електроенергії, АЕС залишаються конкурентоспроможними порівняно з іншими енергетичними потужностями. В умовах дуже низького рівня забезпеченості власними енергоносіями і у зв'язку з необхідністю імпорту

електроенергії парламент Фінляндії у 2002 р. ухвалив рішення про будівництво нового ядерного реактора великої потужності — 1 600 МВт. Фінляндія — невелика країна, що усвідомлює значення стану навколишнього природного середовища і має чотири ядерних реактори, що експлуатуються, розташовані на двох майданчиках: на одному — західні енергоблоки BWR, на іншому — менш потужні російські енергоблоки ВВЕР. Усі вони демонструють високий рівень безпеки та позитивні економічні показники. Рішення про будівництво п'ятого фінського енергоблока було ухвалено за результатами детального аналізу з боку інвесторів, уряду та населення країни. Було доведено, що новий ядерний реактор є для Фінляндії найдешевшим варіантом генерації енергії.

У Франції здійснення ядерно-енергетичної програми стало символом досягнення національної енергетичної незалежності — на АЕС виробляється до 75 % усієї електроенергії. Уряд, який прийшов до влади в 1997 р., узяв курс на енергозабезпечення і використання відновлювальних джерел енергії. Почався перегляд сформованого уявлення про ядерну енергетику як єдиного надійного способу забезпечення енергетичної незалежності країни. Проте прогноз розвитку енергетики передбачає як один із варіантів забезпечення країни електроенергією заміну старих АЕС після 40 років експлуатації на АЕС з реакторами нового типу. Спільними зусиллями французької фірми Framatome ANP та німецької фірми Siemens був створений проект реактора EPR, який і передбачається встановлювати на нових АЕС. У той же час уряд країни пропонує скоротити до 2025 р. частку ядерної енергетики з 75 до 50 % і ухвалити стратегію розвитку відновлювальних джерел енергії.

У багатьох країнах до органів регулювання подані заявки та отримані дозволи на подовження термінів експлуатації АЕС. Більше половини діючих АЕС світу експлуатуються менше 20 років. У довгостроковій перспективі після амортизації капітальних витрат, що становлять близько 60 % наведених витрат виробництва, АЕС стають найдешевшими джерелами виробництва електроенергії. Для експлуатуючих організацій це є стимулом укладення коштів у модернізацію і подовження термінів експлуатації АЕС.

Сьогодні лише у двох країнах Західної Європи є конкретні плани будівництва нових енергоблоків АЕС: у Фінляндії та Франції. Обидві країни мають намір побудувати по одному енергоблоку з реакторами EPR спільної франко-німецької розробки. У Фінляндії висловлюється намір про будівництво

ще одного енергоблока. В інших країнах питання про будівництво нових енергоблоків конкретно не обговорювалося, але були висловлені припущення про таку можливість для заміни тих, що виводяться з експлуатації. У Великобританії як можливий проєкт розглядають конструкцію AP-1000.

У США спостерігається незвично високий рівень підтримки ядерної енергетики, незважаючи на можливість загрозу терористичних атак, спрямованих на АЕС, особливо після 11 вересня 2001 р. Дві третини населення заявляють, що вони підтримують використання ядерної енергії. Нині в США працюють 97 ядерно-енергетичних блоків. Кількість згодних на будівництво додаткових ядерних блоків коливається залежно від сприйняття населенням необхідності споживання більшої кількості енергії. Коли засоби масової інформації повідомляють про дефіцит електроенергії, підтримка населенням будівництва нових ядерних енергоблоків зростає. Люди, які живуть поблизу АЕС, більш прихильні до ядерної енергетики, ніж загальна маса населення. Можливі пояснення такого рівня підтримки — обізнаність спільноти, якість роботи АЕС і хороші відносини з населенням [4]. Сьогодні в США ведеться будівництво 2 енергоблоків з AP-1000 на майданчику Vogtle.

У Китайській Народній Республіці нині працює 48 ядерних енергоблоків і ще 9 енергоблоків перебувають на етапі будівництва. Згідно з довгостроковим планом розвитку ядерної енергетики Китаю до 2020 р. на АЕС будуть генеруватися 40 000 МВт [2].

У Росії експлуатуються 36 енергоблоків та 6 перебувають на етапі будівництва. Росія у 2008 р. ухвалила програму розвитку ядерної енергетики, згідно з якою починаючи з 2012 р. передбачене щорічне введення в експлуатацію одного ядерного енергоблока.

У 2012 р. були розпочаті будівельні роботи на Островецькому майданчику Гродненської області в Республіці Білорусь, де заплановано побудувати два енергоблока російського проєкту «АЕС-2006», відповідно до якого побудований енергоблок № 1 Ленінградської АЕС-2 у Російській Федерації.

Японія під тиском з боку громадськості, пов'язаним із наслідками аварії на АЕС Фукусіма-1, оголосила про плани щодо закриття всіх діючих АЕС до 2040 р. Нова енергетична політика передбачає зняття з експлуатації енергоблоків, старіших за 40 років, і зупинення будівництва нових ядерних реакторів. Після фукусімських подій робота всіх діючих енергоблоків була зупинена. Після отримання відповідних дозволів в експлуатації перебувають 9 енергоблоків

з наявних 37. За результатами 2018 р. на АЕС Японії вироблено 6,2 % електроенергії, а до 2011 р. цей показник становив ~30 %.

На АЕС України експлуатуються 15 енергоблоків: 13 з реакторами типу ВВЕР-1000 і 2 з ВВЕР-440. Загальна встановлена потужність АЕС — 13835 МВт, що становить ~26 % від сумарної встановленої потужності всіх електростанцій України. Уже відпрацювали понад 30 років та отримали ліцензії на експлуатацію у понадпроектний строк 10 енергоблоків. Ще на 2 енергоблоках у 2020 р. закінчується 30-річний строк експлуатації і нині виконуються роботи з обґрунтування безпечної експлуатації у понадпроектний строк.

Національна атомна енергогенеруюча компанія (НАЕК) «Енергоатом» планує добудувати енергоблоки № 3 та 4 Хмельницької АЕС, будівництво яких за проектом реакторної установки ВВЕР-1000/В-320 почалося в 1986 р., проте в 1991 р. було призупинено мораторієм на будівництво АЕС. На момент призупинення будівництва готовність енергоблоків становила 75 % для енергоблока № 3 та 28 % для енергоблока № 4.

Для завершення будівництва енергоблоків № 3 та 4 Хмельницької АЕС було обрано проект реакторної установки ВВЕР-1000/В-392Б, запропонований російською компанією ЗАТ «Атомстройэкспорт». У 2010 р. було підписано та ратифіковано Верховною Радою України міжурядову угоду між Україною та Російською Федерацією щодо будівництва енергоблоків. Рішення про початок будівництва було закріплено Законом України «Про розміщення, проектування та будівництво енергоблоків № 3, 4 Хмельницької АЕС», який було ухвалено у 2012 р., проте через події в Україні, пов'язані зі збройним конфліктом на Донбасі, втратив свою чинність через три роки. Причиною стала денонсація угоди між Україною та Росією, яка стосувалася співробітництва у сфері будівництва 3-го та 4-го енергоблоків Хмельницької АЕС в аспекті використання російської реакторної установки. Наступним кроком у зрушенні питання стало коригування та доопрацювання техніко-економічного обґрунтування вищезгаданого будівництва в частині зміни постачальника реакторної установки. Київський інститут «Енергопроект» виіс зміни, які визначили чеську компанію Skoda майбутнім постачальником реакторної установки для ВВЕР-1000.

У 2019 р. проводиться обстеження наявних будівельних конструкцій енергоблоків № 3 та 4 Хмельницької АЕС для підтвердження можливості забезпечення вимог до проектної довговічності та

надійності експлуатації наявних будівельних конструкцій, враховуючи проведення комплексу ремонтно-відновлювальних робіт. Китайська компанія China Zhongyuan Engineering Corporation (CNNC) висловила зацікавленість щодо можливої участі у проекті добудови енергоблоків № 3 та 4 Хмельницької АЕС.

Оцінюючи можливі впливи подій 11 березня 2011 р. в Японії, можна впевнено стверджувати, що за винятком політичної реакції в Німеччині, Італії, Швейцарії та Японії ці події не вплинули істотно на поточні і довгострокові плани розвитку ядерної енергетики.

Економічна ефективність будівництва нових АЕС

АЕС є найбільш капіталомісткими електростанціями сучасного типу. Однак у довгостроковій перспективі після амортизації капітальних вкладень АЕС стають достатньо конкурентоспроможними джерелами виробництва електроенергії. Конкурентоспроможність ядерної енергетики залежить не тільки від власних показників АЕС, але й від економічних показників інших джерел енергії.

Європейським Союзом були ініційовані дослідження з метою забезпечення експертної оцінки зовнішніх витрат життєвого циклу для виробництва електрики в Європі, які передбачають витрати щодо здоров'я людей і стану довкілля, що не входять у вартість електричної енергії і тому покладені на суспільство в цілому. До них належать вплив забруднення повітря на людське здоров'я, на врожаї, розвиток професійних хвороб, нещасні випадки та аварії. Вплив глобального потепління було виключено з тієї причини, що його поки що не можна кількісно виміряти.

Результати досліджень [5] показують, що зовнішні витрати ядерної енергетики становлять лише приблизно одну десяту зовнішніх витрат вугільної енергетики. Це пояснюється тим, що витрати на управління відходами ядерної енергетики вже враховані, що призводить до зменшення конкурентоспроможності ядерного варіанта, коли розглядають лише внутрішні витрати, як це робиться в звичайному фінансовому аналізі. Середня вартість електрики без урахування зовнішніх витрат становить в середньому 4 цента/(кВт · год). Облік зовнішніх витрат в ядерному варіанті додав би додаткову частку лише 0,4 цента/(кВт · год), тоді як вугілля додає б більше 4 центів/(кВт · год), а у випадку газу добавка становить

ла б 1,3–2,3 цента/(кВт · год). Лише для вітрової енергетики результати кращі ядерного варіанта — додаткова частка становить лише 0,1–0,2 цента/(кВт · год). Якби зовнішні витрати могли бути включені у розрахунки, то вартість електрики, що виробляється на вугільних електростанціях, подвоїлася б, а на газових — підвищилася б приблизно на 50 %. Якщо додати потенційний вплив спалювання органічного палива на глобальне потепління, то вплив буде значно більшим.

Результати досліджень підтверджують, що ядерна енергетика є досить сприятливою незалежно від того, проводиться аналіз на основі простого розгляду енергетичних витрат і виробленої енергії чи він також враховує зовнішні витрати. Єдиною можливою перешкодою інтенсивного розвитку ядерної енергетики є проблема поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП). Критики стверджують, що поки не ухвалені остаточні рішення щодо поводження з ВЯП і не введені в експлуатацію відповідні сховища, важко підрахувати довгострокові витрати для різних варіантів рішень.

Під час вибору стратегії розвитку електроенергетики і зокрема під час обговорення проблеми будівництва нових енергоблоків АЕС як основний критерій розглядають економічний (витрати виробництва, зростання цін на паливо), але враховують також надійність енергозабезпечення та вплив на зниження викидів CO₂ в атмосферу. В умовах впровадження ринкових відносин в електроенергетику в межах Європейського Союзу всі ці критерії взаємопов'язані, але водночас кожна країна повинна орієнтуватися насамперед на власні особливості енергозабезпечення. Так, країни зі значними запасами природних енергоресурсів (Великобританія, Німеччина, Нідерланди) приділяють увагу насамперед оцінкам витрат виробництва електроенергії на АЕС і, отже, термінам окупності нових АЕС в умовах вільного ринку електроенергії. Під час відкриття такого ринку в Європі з 1999 р. з'ясувалося, що існує загальний значний надлишок потужностей електрогенерування, проте недостатність ліній зв'язку перешкоджає вільному обміну електроенергією між країнами.

Під час оцінки економічної ефективності нових АЕС зазвичай порівнюють витрати виробництва електроенергії на АЕС із витратами виробництва на електростанціях інших типів, а далі оцінюють додаткові фактори, що впливають на ці витрати (плата за викиди, зміни цін на різні види палива, можливість використання електростанції в базово-

му чи змінному режимі навантаження). Так, наприклад, у Франції діючі АЕС конкурентоспроможні порівняно з тепловими електростанціями (ТЕС) на імпортованому газі: витрати виробництва електроенергії на АЕС становлять 3,20 євроцента/(кВт · год), на газових ТЕС — 3,05–4,26 євроцента/(кВт · год) залежно від різних умов, на вугільних ТЕС — 3,81–4,57 євроцента/(кВт · год).

В умовах розвитку вільних ринкових відносин в електроенергетиці важливого значення набуває питання фінансування будівництва енергоблоків АЕС. Рівність умов конкуренції виробників електроенергії передбачає невтручання з боку уряду в питання фінансування електростанцій будь-яких типів, особливо з метою надання прямої чи непрямої фінансової підтримки або створення більш сприятливих умов.

У Фінляндії для будівництва нового 5-го енергоблока АЕС засоби промислових підприємств залучені як сплата за майбутні постачання електроенергії. До складу акціонерів входять приватні та державні підприємства. Усі акціонери будуть забезпечені прямими контрактами на постачання електроенергії протягом усього строку експлуатації нового енергоблока. Приватними акціонерами є переважно великі промислові підприємства зі значним споживанням електроенергії в режимі базового навантаження, і тому для них має дуже велике значення підтримання низької ціни на електроенергію, особливо в умовах імовірного зростання цін на паливо. Подвоєння цін на паливо призведе до зростання витрат на виробництво електроенергії: для АЕС на 9 %, для ТЕС на вугіллі на 31 %, для ТЕС на газі на 66 %.

Розрахунки показують, що виробництво електроенергії на АЕС під час будівництва серії енергоблоків з реактором EPR може конкурувати з виробництвом на електростанціях, що використовують нову вугільну технологію, або ТЕС на газі з урахуванням значного зростання цін на газ. Навіть одиничний енергоблок EPR може скласти конкуренцію новим ТЕС на вугіллі та газі, якщо буде введено плату за викиди CO₂ в розмірі 15 євро/т. Проте вигода для енергетичних компаній від будівництва АЕС з реакторами нового типу буде залежати від ціни на електроенергію. Щорічне повернення капітальних витрат може становити близько 9 % [6].

Економічна проблема під час будівництва нових ядерних блоків передбачає високі капітальні, але низькі експлуатаційні витрати, тоді як для газотурбінних блоків, що конкурують з АЕС на більшості ринків, тенденція буде зворотною. Економічна оцінка включає балансування цих двох елементів вартості.

Будівництво нових газотурбінних енергоблоків оцінюється в 500–600 дол./кВт установленної потужності. Для останніх моделей ядерних енергоблоків будівельні витрати перевищують 2000 дол./кВт ел. П'ятий фінський реактор з водою під тиском (EPR) уже сьогодні оцінюється в 8,5 млрд євро за 1 600 МВт ел., тобто понад 5 000 євро/кВт. У США ведуть роботи з модернізації АЕС Browns Ferry I, а в Канаді намагаються знову пустити реактори АЕС Pickering A, причому рівень капітальних витрат у всіх цих випадках оцінюється близько 1 500 дол./кВт. Незважаючи на достатньо високі витрати, постачальники ядерних реакторів стверджують, що для нових споруджуваних реакторів можна досягти показників 1 000–1 300 дол./кВт [7].

Капітальні витрати на АЕС становлять приблизно 45–75 % від загальної вартості електроенергії, на ТЕС, що працюють на вугіллі, — 25–60 %, на газі — 15–40 %. Це стримує розвиток атомної енергетики. Однією з основних вимог є скорочення терміну будівництва АЕС, який повинен становити 5–6 років з моменту підписання контракту до введення в промислову експлуатацію, з них власне будівництво повинно тривати 3–4 роки, а 2 роки відводиться на підготовку до введення АЕС в експлуатацію.

Проведені дослідження демонструють, що якщо нові ядерні установки зможуть бути побудовані з низькими капітальними витратами, а ціни на вугілля і газ залишаться на поточних рівнях чи підвищаться, наведена вартість АЕС може бути нижчою за альтернативні варіанти. Проте нові проекти АЕС постають перед серйозною проблемою витрат на вперше проведені технічні роботи і потребують державної підтримки, щоб бути економічно вигідними. Набутий досвід і знання під час спорудження нового енергоблока дають підстави для реалістичного припущення, що наступні енергоблоки будуть повністю економічними [8].

Необхідно зробити все для того, щоб зменшити капітальні витрати нових ядерних установок до можливого в промисловості рівня, а саме до вартості 1 100–1 400 дол. за встановлений кВт. Крім того, істотну економію можна отримати за рахунок збільшення розмірів і потужності ядерних реакторів, хоча можуть існувати деякі обмеження на це зростання, що накладаються мережами електропередачі. Інший підхід полягає в будівництві декількох реакторів на одному майданчику, що може призвести до скорочення витрат. Стандартизація ядерних реакторів і серійне будівництво також веде до істотної економії.

Розробки АЕС нового покоління

За останні роки в ядерній енергетиці було запропоновано кілька міжнародних ініціатив, спрямованих на розробку нових проектів для об'єднання зусиль багатьох країн у створенні інноваційних ядерно-енергетичних технологій, щоб забезпечити енергетичну безпеку, знизити ризики розповсюдження ядерних матеріалів та вирішити проблему радіоактивних відходів (РАВ). Ці ідеї стали основою великого міжнародного проекту INPRO, що діє під егідою Міжнародного агентства з ядерної енергії (МАГАТЕ) і метою якого є розробка принципів забезпечення прийнятності, ефективності та конкурентоспроможності атомної енергетики, а також об'єднання організацій, що володіють ядерними технологіями та майбутніх користувачів для спільних дій, спрямованих на удосконалення ядерних реакторів та паливних циклів. За ініціативи США була створена програма «Покоління-4» (Generation IV). Вона передбачає створення та впровадження до 2030 р. однієї чи кількох конкурентоспроможних ядерних систем енергопостачання, в яких будуть вирішені проблеми експлуатаційної безпеки, поводження з РАВ, нерозповсюдження ядерних матеріалів. У всіх проектах основна увага спрямована на технології, пов'язані з покращенням технічних характеристик ядерних установок [9]. Планується проведення детальної розробки 12 проектів, серед яких: легководні реактори п'яти типів, важководний реактор, реактори на швидких нейтронах з рідкометалевим теплоносієм двох типів, газовий реактор, реактор з паливом на основі розплавлених солей, два реактора інших типів.

Перспективна стратегія поводження з РАВ палива передбачає також процес трансмутації деяких довгоживучих радіоізотопів, організацію ефективного тепловідведення за їхнього розпаду, можливість проміжного зберігання відходів, зберігання відходів у відповідних геологічних структурах. Усі ядерні системи IV покоління повинні бути спроектовані таким чином, щоб під час розподілу продуктів ядерних відходів було виключено вилучення плутонію, включно з його відокремленням від інших актиноідів. Необхідно вжити заходи щодо обмеження несанкціонованого доступу до збройних матеріалів на всіх стадіях паливного циклу. Використання в більшості перспективних паливних циклів реакторів на швидких нейтронах у поєднанні з відповідною технологією переробки палива дозволить на кілька порядків знизити радіоактивність усіх відходів палива з реакторів.

Нові програми передбачають також розробку комбінованих паливних циклів на основі спільного використання теплових та швидких реакторів. У цьому випадку актиноїди, що накопичуються в теплових реакторах, можуть бути перероблені у швидких реакторах. Підвищення ефективності спалювання актиноїдів у теплових реакторах із газовим і водяним теплоносієм також приводитимуть до більш інтенсивного спалювання актиноїдів у комбінованих системах. Ядерна енергія має унікальні можливості для забезпечення ринку виробництва енергії, оскільки паливна складова ядерного циклу за вартістю не перевищує 20%.

Сьогодні існує проект ядерної установки AP1000, розробленої компанією Westinghouse Electric, що має підвищену економічність та безпеку [10]. Дві експлуатуючі організації США обрали проект AP1000 для будівництва. Проект AP1000, адаптований до вимог європейських експлуатуючих організацій (EUR) та названий EP1000, був розроблений Westinghouse спільно з італійською компанією Genesi. Однією з європейських країн, де може бути побудована АЕС з реактором AP1000, є Великобританія. Іншим перспективним сегментом світового ринку є Китай, де в 2018 р. було введено в експлуатацію 4 енергоблоки з реакторною установкою AP1000, на яких встановлено близько 70% обладнання китайського виробництва.

Компанія Westinghouse оцінила, що вартість 1 кВт встановленої потужності АЕС, конкурентоспроможної на американському ринку, повинна дорівнювати 1 000–1 200 дол. США. Проект AP1000 задовольняє цю вимогу, вартість вироблення електроенергії становить 3,0–3,5 центів/(кВт · год). Результати розрахунків показують, що оцінка загальної капітальної вартості AP1000, починаючи з 3-го серійного енергоблока не перевищила 1 200 дол. США за 1 кВт встановленої потужності в цінах 2001 р. [11]. Зниження витрат було досягнуто за рахунок упровадження пасивних систем безпеки, які значно простіші та дешевші за активні системи, що виконують ті ж функції. Використання модульних конструкцій під час спорудження АЕС також вплинуло на зниження витрат. Стандартний блок AP1000 складається з 50 великих і 250 малих модулів, які можна перевозити залізницею. Модулі серійно виготовляють на заводі і транспортують на майданчик АЕС. Усі ці фактори вплинули й на скорочення термінів будівництва АЕС.

До того ж Westinghouse за участі партнерів з різних країн розробила детальну тривимірну модель AP600, витративши на це понад 8 років [10]. Паралельно було підготовлено план будівництва із застосуван-

ням програми Primavera, тривалість якого оцінюється в 36 місяців з моменту закладання першого бетону до початку завантаження ядерного палива за п'ятиденного робочого тижня. Це дозволило створити чотири-вимірний графік спорудження АЕС. Крім того, була розроблена чотири-вимірною моделлю CAVE візуалізації будівництва. Використовуючи CAVE, яка дозволяє спостерігати спорудження АЕС в реальному масштабі в будь-який обраний момент часу, передбачається скоротити термін будівництва принаймні на 4 місяці.

Підхід до убезпечення AP1000 базується на використанні пасивних систем безпеки. Проект AP1000 задовольняє усі вимоги органу регулювання США, починаючи з принципу одиничної відмови та закінчуючи новими вимогами до пасивних систем АЕС, зокрема й необхідності забезпечення пасивного охолодження у випадку найбільш несприятливої аварії протягом не менше трьох діб без використання зовнішніх джерел енергії та дій оператора [12].

Японська компанія Japan Atomic Power Co. нині проводить оцінку можливості створення досить економічних ядерних реакторів середньої та малої потужності [13]. У компанії розроблено придатні до реалізації реактори середньої та малої потужності, орієнтовані на їхній можливий вибір енергетичними підприємствами в найближчому майбутньому. За основу взято проекти наявних реакторів великої потужності і дослідження реакторів середньої та малої потужності, які проводяться сьогодні. У результаті було обрано реактори потужністю 300–400 МВт, за якої можливо стримувати початкові капіталовкладення і використовувати лінії електропередач та іншу наявну інфраструктуру. Планується досягти значення КВВП вище 95%. Скорочення термінів будівництва розраховують досягти за рахунок зменшення площі будівель, кількості поверхів та використання модульного методу будівництва.

У світі зростає інтерес до реакторів малої й середньої потужності та модульних реакторів (до 300 МВт ел.), які отримали назву — малі модульні реактори (ММР), а в англійській аббревіатурі SMR — small modular reactors. За даними МАГАТЕ, у світі налічується понад 50 проектів ММР, більшість з яких перебувають на ранніх етапах науково-дослідних та дослідно-конструкторських розробок. ММР можуть виявитися конкурентоспроможними у разі розміщення в регіонах із менш розвинутою інфраструктурою за рахунок зниження капітальних та експлуатаційних витрат, скорочення термінів будівництва і можливості більш оптимального повернення інвестицій.

Міжнародна компанія Holtec International, що спеціалізується на виготовленні обладнання у сфері ядерної енергетики, запропонувала Україні організувати виробництво обладнання для SMR-160, будівництво яких може розпочатися в середині 2020-х рр. У 2019 р. НАЕК «Енергоатом» та Holtec International уклали угоду про створення міжнародного консорціуму з впровадження в Україні технології малих модульних реакторів SMR-160 [14].

Іншими провідними проектами ММР, які вже перебувають на етапі будівництва, є NuScale (США), CAREM-25 (Аргентина), KLT-40S (Росія), HTR-PM (Китай).

Відповідно до вимог європейських компаній у Франції була розроблена концепція простого компактного реактора SCOR (Simple COmpact Reactor) із тепловою потужністю 2 000 МВт [15]. В основі проекту SCOR лежить компактний корпус реактора, що містить усі компоненти першого контуру. При цьому використовується контайнмент зниження тиску з інертним середовищем, що забезпечує високий рівень безпеки та певні економічні переваги. У реакторі використовуються тепловидільні збірки стандартних параметрів французьких PWR. Враховуючи знижену щільність енерговиділення були розроблені більш прості системи безпеки, що дозволило підвищити коефіцієнт готовності установки і збільшити інтервал між зупинками для технічного обслуговування як мінімум до 24 місяців. Проектний строк експлуатації реактора без заміни його корпусу становить 60 років.

Пасивні властивості безпеки SCOR дозволяють без наслідків виходити з усіх проектних аварій з мінімальним втручанням операторів. Більшість порушень проектних режимів у цьому реакторі не розвиваються до аварійних. Розробка реактора SCOR сьогодні перебуває на стадії концептуального проекту [16].

У Російській Федерації розроблено проект реакторної установки ВВЕР-300 для енергоблоків з електричною потужністю до 300 МВт із використанням рішень і технологій суднових транспортних реакторів [17]. ВВЕР-300 створений як перспективне енергоджерело для регіональних АЕС і плавучих АЕС малої та середньої потужності з невеликими термінами реалізації і привабливими техніко-економічними показниками. У проекті використано досвід розробки ВВЕР і досягнення у сфері забезпечення безпеки АЕС і суднових ядерних енергетичних установок.

У 2019 р. проведено завантаження ядерного палива в реактори першої у світі плавучої електростанції

«Академік Ломоносов». У вересні 2019 р. заплановано його транспортування на місце дислокації в Чаунській губі на Чукотці. Плавучий енергоблок виробляє в номінальному режимі до 60 МВт електроенергії і до 50 Гкал/год теплової енергії для теплопостачання.

Висновки

До ядерної галузі населення висуває безліч вимог — стосовно безпеки АЕС, радіоактивних скидів та викидів у довкілля, можливостей розповсюдження ядерної зброї, транспортування ядерних матеріалів, поводження з ВЯП і РАВ, зняття з експлуатації ядерних установок і особливо вартості вирішення цих проблем. За останні роки ядерна галузь істотно підвищила рівень безпеки АЕС і роботи з громадськістю. Проте необхідно ще багато зробити для створення неспростованих економічних доказів, які переконують спільноту в конкурентоспроможності ядерної енергетики, що дозволить ухвалити рішення про будівництво нових АЕС.

Найважливішим фактором розвитку ядерної енергетики в умовах вільного ринку електроенергії є її конкурентоспроможність порівняно з іншими способами виробництва електроенергії. Порівняння фінансових витрат на будівництво та експлуатацію з отриманням гарантованого прибутку від продажу виробленої електроенергії визначатиме це рішення.

За останні роки у світі реалізовується кілька міжнародних ініціатив, спрямованих на розробку нових проектів з метою об'єднати зусилля багатьох країн у створенні інноваційних ядерно-енергетичних технологій. Планується, що нові програми забезпечать розробку ядерно-енергетичних систем четвертого покоління з високими експлуатаційними характеристиками, підвищеною економічністю та безпекою, які можуть бути введені в експлуатацію в найближчі роки.

Проблемним питанням для ядерної галузі України є добудова двох енергоблоків на Хмельницькій АЕС. У 2010 р. було ухвалено рішення щодо добудови цих блоків за російським проектом ВВЕР-1000/В392Б. Однак після подій 2014 р. це рішення було скасовано, і сьогодні ведуться перемовини про добудову енергоблоків за проектом чеської компанії Skoda. Проте цією компанією володіє «Росатом», і до того ж вона перебуває під дією санкцій. Тому існує можливість співпраці з китайською компанією CNNC, яка висловила зацікавленість щодо можливої участі у проекті добудови енергоблоків № 3 та 4 Хмельницької АЕС.

Відповідно до діючої «Енергетичної стратегії України на період до 2035 р.» важливу роль як одного

з найбільш економічно ефективних низьковуглецевих джерел енергії відведено саме ядерній енергетиці. Подальший розвиток ядерного енергетичного сектору на період до 2035 р. передбачає збільшення виробництва електроенергії на АЕС України до 94 млрд кВт/год. Для досягнення такої мети важливим завданням поряд з забезпеченням експлуатації енергоблоків АЕС у понадпроектні строки експлуатації є дослідження з обґрунтування оптимального вибору перспективних ядерних установок для заміщення енергоблоків, які виводяться з експлуатації. Враховуючи наявні у світі і в Україні тенденції на ринку постачання електроенергії, одним із шляхів є оновлення парку наявних в Україні енергоблоків з ВВЕР на перспективні, більш економічні і безпечні проекти реакторних установок нового покоління. Україна протягом багатьох років так і не може визначитись із перспективами будівництва нових ядерних установок, які в майбутньому будуватимуться замість енергоблоків, що знімаються з експлуатації. З деякою періодичністю як перспективні реактори розглядають канадські реактори CANDU з важководним теплоносієм, російські проекти ВВЕР, малі модульні реактори та ін.

Для обґрунтування вибору типу реакторної установки необхідно розробити наукові і техніко-економічні основи оптимального вибору перспективних ядерних установок для України. Оптимізація вибору має виконуватися за різними показниками, серед яких:

безпека різних етапів життєвого циклу АЕС, включаючи будівництво, експлуатацію, зняття з експлуатації, поводження з ВЯП і РАВ;

техніко-економічні показники, включаючи витрати на проектування, будівництво, ліцензійні та експлуатаційні витрати, паливну складову, витрати на поводження з ВЯП і РАВ;

характеристики насосного, паротурбінного та генераторного обладнання;

вимоги до конструкційних та інших матеріалів, включаючи технологічні матеріали, будівельні конструкції та ін.

Список використаної літератури

1. Мировая ядерная энергетика в 2011 году // Атомная техника за рубежом. — 2012. — № 7. — С. 28–33.
2. Power Reactor Information System (IAEA-PRIS) / International Atomic Energy Agency. — Режим доступу: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryStatisticsLandingPage.aspx>.
3. Warning to German government of nuclear need // Nucleonics Week. — 2004. — Vol. 21. — No. 10. — P. 7.
4. Бисконти А. Почему американцы поддерживают ядерную энергетику / А. Бисконти // Атомная техника за рубежом. — 2004. — № 1. — С. 31–34.
5. Кидд С. Перспективы ядерной энергетики в конкуренции с другими источниками энергии / С. Кидд // Атомная техника за рубежом. — 2006. — № 3. — С. 31–33.
6. Колесникова Н. М. Современное состояние и тенденции развития ядерной энергетики в странах западной Европы / Н. М. Колесникова // Атомная техника за рубежом. — 2006. — № 4. — С. 11–17; № 5. — С. 3–15.
7. Кидд С. Наступит ли эра строительства большого числа новых реакторов / С. Кидд // Атомная техника за рубежом. — 2004. — № 12. — С. 29–31.
8. Кидд С. Как можно выстроить доводы в пользу нового строительства / С. Кидд // Атомная техника за рубежом. — 2006. — № 11. — С. 29–32.
9. Перера Ю. Международные инициативы в области разработок ЯЭУ и топливных циклов новых поколений / Ю. Перера // Атомная техника за рубежом. — 2005. — № 7. — С. 21–26.
10. Токмачев Г. В. АЭС с реактором AP 1000 компании Westinghouse, обладающая повышенной экономичностью и безопасностью / Г. В. Токмачев // Атомная техника за рубежом. — 2006. — № 5. — С. 17–23.
11. Cummins W. E. Westinghouse AP1000 Advanced Passive Plant / W. E. Cummins, M. M. Corletti, T. L. Schulz // Proceedings of ICAPP'03 (Cordoba, Spain, May 4–7, 2003). — Paper 3235.
12. International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1474. Natural circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants. Phenomena, models, and methodology for system reliability assessments. — Vienna : IAEA, 2005. — 640 p.
13. Хирай К. Разработка реакторов средней и малой мощности / К. Хирай // Атомная техника за рубежом. — 2006. — № 3. — С. 21–22.
14. Малые реакторы на смену крупным АЭС: как Украина не оседлать волну глобальных изменений в энергетике // УНІАН : веб-сайт. — Режим доступу: <https://www.unian.net/economics/energetics/10612260-malye-reaktory-na-smenu-krupnym-aes-kak-ukraine-osedlat-volnu-globalnyh-izmeneniy-v-energetike.html>
15. International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1485. Status of innovative small and medium sized reactor designs 2005. Reactors with conventional refuelling schemes. — Vienna : IAEA, 2005. — 704 p.
16. Исаев А. К. Французский компактный реактор SCOR тепловой мощностью 2000 МВт / А. К. Исаев // Атомная техника за рубежом, 2006. — № 11. — С. 9–17.

17. Костин В. И. Реакторная установка ВБЭР-300 и энергоблоки на ее основе для региональной ядерной энергетики / В. И. Костин, В. В. Петрунин, О. Б. Самойлов, А. В. Кураченков // Атомная энергия. — 2007. — Т. 102. — Вып. 1. — С. 35–39.

А. В. Носовский

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины,
ул. Лысогорская, 12, Киев, 03028, Украина*

О перспективах строительства новых атомных электрических станций

Рассмотрены основные проблемы строительства новых энергоблоков атомных электростанций (АЭС), приведен анализ состояния ядерной энергетики в мире, показаны основные факторы, сдерживающие развитие ядерной энергетики.

Показано, что возрастающие потребности в электроэнергии, а также экономическая эффективность и конкурентоспособность ядерной энергетики по сравнению с другими способами производства электроэнергии являются ключевыми факторами для строительства новых АЭС.

Сделаны выводы, что важной задачей для ядерной энергетики Украины наряду с обеспечением безопасности эксплуатации энергоблоков АЭС сверх проектного срока являются исследования по обоснованию оптимального выбора перспективных ядерных установок для замещения энергоблоков, которые выводятся из эксплуатации. Поэтому, учитывая существующие в мире и в Украине тенденции на рынке поставок электроэнергии, одним из путей является обновление парка существующих в Украине энергоблоков с водо-водяными энергетическими реакторами на перспективные, более экономичные и безопасные проекты реакторных установок нового поколения. А с целью обоснования выбора типа реакторной установки необходимо разработать научные и технико-экономические основы оптимального выбора перспективных ядерных установок.

Ключевые слова: ядерная энергетика, атомные электрические станции, строительство новых ядерных энергоблоков, экономическая эффективность, уровень безопасности, тип реакторной установки.

A. V. Nosovskyi

*Institute for Safety Problems of NPP, NAS of Ukraine,
12, Lysogirska st., Kyiv, 03028, Ukraine*

On the Prospects for the Construction of New Nuclear Power Plants

The nuclear power plants (NPP), which were built more than forty years ago and are in operation today, demonstrate compliance with modern economic realities and competitiveness. The installed capacity ratios of the NPP have been increased significantly, allowing more electricity to be produced at the same installed capacity. Operating costs for NPP are predictable unlike power plants that burn organic fuel, where volatile fuel prices are a significant part of the cost of produced electricity.

There are many requirements for the nuclear industry — regarding the safety of NPP and the cost of solving safety problems. In recent years, the nuclear industry has significantly increased the safety level of NPP. However, a lot of tasks remain to be done to create simple economic evidence that will convince the community of the competitiveness of nuclear power, which will allow the decision to build new NPP.

The most important factor in the development of nuclear power in a free market of electricity is its competitiveness in comparison with other methods of electricity production.

The main problems of construction of NPP power units are considered in the article. The analysis of the state of nuclear power in the world is given, the main factors holding back the development of nuclear power are shown.

It is shown that the increasing needs for electricity, as well as the economic efficiency and competitiveness of nuclear power compared to other methods of electricity production, are key factors for the construction of new NPP.

International programs aimed at developing new projects to unite the efforts of many countries for the creation of innovative nuclear energy technologies are mentioned in the article. The implementation of these programs will ensure the development of nuclear power systems of fourth generation with high performance, increased cost-effectiveness and safety, which can be put into operation in the coming years.

It is concluded that an important task for the nuclear power industry of Ukraine along with ensuring the operation of NPP units in extra-project terms is a study to justify the optimal choice of promising nuclear installations for the

replacement of decommissioning units. Therefore, taking into account current trends in the electricity supply market in the world and Ukraine, one of the ways is to upgrade the fleet of water-water energetic reactor units that exist in Ukraine for perspective, more economical and safer projects of the new generation of reactor plants. And in order to justify the choice of reactor type it is necessary to develop the scientific and technical and economic bases for the optimal choice of prospective nuclear installations.

References

- [World Nuclear Power in 2011]. *Atomnaya tekhnika za rubezhom* [Nuclear technology abroad], 2012, vol. 7, pp. 28–33. (in Russ.)
- International Atomic Energy Agency. *Power Reactor Information System (IAEA-PRIS)*. Available at: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryStatisticsLandingPage.aspx>.
- Warning to German government of nuclear need. *Nuclear Week*, 2004, vol. 21, no. 10, p. 7.
- Biskonti A. (2004). [Why do Americans support nuclear power?]. *Atomnaya tekhnika za rubezhom* [Nuclear technology abroad], vol. 1, pp. 31–34. (in Russ.)
- Kidd S. (2006). [Prospects for Nuclear Energy in Competition with Other Energy Sources]. *Atomnaya tekhnika za rubezhom* [Nuclear technology abroad], vol. 3, pp. 31–33. (in Russ.)
- Kolesnikova N. M. (2006). [Current status and development trends of nuclear energy in Western Europe]. *Atomnaya tekhnika za rubezhom* [Nuclear technology abroad], vol. 4, pp. 11–17; vol. 5, pp. 3–15. (in Russ.)
- Kidd S. (2004). [Will the era of building a large number of new reactors come]. *Atomnaya tekhnika za rubezhom* [Nuclear technology abroad], vol. 12, pp. 29–31. (in Russ.)
- Kidd S. (2006). [How to argue for new construction]. *Atomnaya tekhnika za rubezhom* [Nuclear technology abroad], vol. 11, pp. 29–32. (in Russ.)
- Perera Yu. (2005). [International initiatives for the development of nuclear power units and fuel cycles of new generation]. *Atomnaya tekhnika za rubezhom* [Nuclear technology abroad], vol. 7, pp. 21–26. (in Russ.)
- Tokmachev G. V. (2006). [Westinghouse AP1000 nuclear power plants with enhanced fuel economy and safety]. *Atomnaya tekhnika za rubezhom* [Nuclear technology abroad], vol. 5, pp. 17–23. (in Russ.)
- Cummins W. E., Corletti M. M., Schulz T. L. (2003). Westinghouse AP1000 Advanced Passive Plant. Proceedings of ICAPP'03 (Cordoba, Spain, May 4–7, 2003), paper 3235.
- International Atomic Energy Agency (2005). *IAEA-TECDOC-1474. Natural circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants. Phenomena, models, and methodology for system reliability assessments*. Vienna: IAEA, 640 p.
- Khirai K. (2006). [Development of medium and low power reactors]. *Atomnaya tekhnika za rubezhom* [Nuclear technology abroad], vol. 3, pp. 21–22. (in Russ.)
- [Small reactors to replace large nuclear power plants: how Ukraine can ride a wave of global changes in energy]. UNIAN: web-site. Available at: <https://www.unian.net/economics/energetics/10612260-malye-reaktory-na-smenu-krupnym-aes-kak-ukraine-osedlat-volnu-globalnyh-izmeneniy-v-energetike.html>. (in Russ.)
- International Atomic Energy Agency (2005). *IAEA-TECDOC-1485. Status of innovative small and medium sized reactor designs 2005. Reactors with conventional refuelling schemes*. Vienna: IAEA, 704 p.
- Isaev A. K. (2006). [French compact reactor SCOR with a thermal capacity of 2000 MW]. *Atomnaya tekhnika za rubezhom* [Nuclear technology abroad], vol. 11, pp. 9–17. (in Russ.)
- Kostin V. I., Petrunin V. V., Samoylov O. B., Kurachenkov A. V. (2007). [VBER-300 reactor installation and units based on it for regional nuclear power]. *Atomnaya energiya* [Atomic energy], vol. 102, no. 1, pp. 35–39. (in Russ.)

Надійшла 09.09.2019

Received 09.09.2019