



ЗАБУЛОНОВ

Юрій Леонідович – член-кореспондент НАН України, директор Державної установи «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України»

ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ В УКРАЇНІ

За матеріалами доповіді на засіданні Президії НАН України 22 березня 2023 року

У доповіді розглянуто перспективи впровадження малих модульних ядерних реакторів в Україні з точки зору енергетичної безпеки держави. Наголошено на необхідності залучення установ НАН України до вирішення актуальних і стратегічно важливих науково-технічних завдань з вибору перспективних інноваційних технологій для енергетичної галузі України, зокрема на участі науковців Академії в національних і міжнародних проєктах зі створення та впровадження малих модульних реакторів.

Успішне повоєнне відновлення і подальший розвиток України потребуватимуть стабільного й надійного енергозабезпечення економіки та комунальної сфери. Ядерна генерація ще тривалий час відіграватиме стратегічну роль в українській енергетиці. Одним із перспективних напрямів розвитку ядерної енергогенерації є будівництво малих модульних реакторів (ММР).

На сьогодні у світі розроблення, створення та впровадження малих модульних ядерних реакторів та мікроядерних реакторів стає трендом сучасного розвитку ядерних технологій. Провідні світові експерти вважають, що ядерні інновації в ММР допоможуть вирішити пріоритетні завдання глобальної енергетичної політики – від виробництва електроенергії з безвуглецевих джерел до забезпечення безпеки енергопостачання, що сприятиме економічному розвитку та процвітанню. Тому зараз у багатьох розвинених країнах світу розробляють широкий спектр концепцій малих модульних реакторів.

На тлі технологічних проривів останнього десятиліття ідея впровадження та використання малих модульних реакторів виглядає все більш обґрунтованою та економічно доцільною. Реальність впровадження ММР наближають фактори, які стають дедалі очевиднішими у подальшому розвитку світової енергетики: підвищення попиту на електроенергію, необхідну для економічного розвитку, а також зростання запиту на енер-

гетичну безпеку та низьковуглецеву енергетику, зумовлене заходами щодо боротьби зі змінами клімату.

Поряд з традиційними атомними електростанціями малі модульні реактори мають усі шанси зайняти свою частку в диверсифікованому енергобалансі, оскільки вони можуть працювати і без підключення до енергомереж, їх також можна використовувати з метою вироблення тепла для технологічних потреб, опріснення води, виробництва водню тощо. На відміну від «великих» реакторів, ММР виготовляються серійно, до того ж їх можна експлуатувати в багатоблоковому варіанті. Велике різноманіття типів установок, їх потужності та призначення значно розширює сферу і можливості їх використання.

З огляду на сказане вище, важливо було б, на мою думку, обговорити можливості, які відкриваються перед Академією в разі її залучення до розроблення нових ядерних технологій на основі ММР. Вважаю, що ця тема може стати одним із перспективних міждисциплінарних інноваційних напрямів розвитку НАН України, забезпечити ефективну інтеграцію науки з вітчизняною економікою та соціальною сферою. Крім того, це дозволить залучити інвестиції, дасть старт новим напрямам наукових досліджень, підвищить статус академічних інститутів та наукових підрозділів університетів, задіяних у виконанні відповідних робіт.

Загалом важливість і новизна теми з розроблення і впровадження ММР потребує комплексного науково-експертного осмислення. Чи може ця ідея бути науково і технологічно проривною або стати значущим елементом проривної технології, тобто такою інновацією, яка розкриє науковий і технологічний потенціал країни, зменшить залежність від невідновлюваних природних ресурсів, суттєво підвищить якість життя і забезпечить перехід нашої країни до групи світових лідерів у галузі розроблення та впровадження перспективних ядерних технологій?

Для того щоб обговорювати можливість і перспективи створення, впровадження та виробництва ММР або їх складових в Україні,

необхідно насамперед неупереджено, точно і достовірно визначити стан їх розроблення, ступінь готовності, типи, інноваційну привабливість, екологічні ризики, перспективний експортний потенціал для нашої країни. Перші кроки на цьому шляху ми вже зробили.

Що таке малий модульний реактор? ММР — новітня технологія, яка в останнє десятиліття почала привертати до себе посилену увагу і зараз стрімко розвивається. Згідно з визначенням Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ), до малих реакторів належать реактори потужністю до 300 МВт, що складаються з модулів, які перед поставкою та монтажем на майданчику серійно виготовляються на заводі-виробнику. Останнім часом фахівці виокремлюють також мікрореактори, тобто реактори з іще меншою потужністю в одиниці чи десятки мегаватів.

На сьогодні МАГАТЕ визначає таку ієрархію ядерних установок: 1) великі реактори; 2) малі реактори; 3) мікрореактори.

Отже, ММР — це конструктивний варіант сучасної ядерної установки потужністю до 300 МВт (ел.) на енергоблок, що становить приблизно третину від генеруючої потужності традиційних ядерних енергетичних реакторів.

Відповідно до прийнятої класифікації, малі модульні реактори є *малими*, оскільки вони в кілька разів менші за традиційні ядерні енергетичні реактори; *модульними*, оскільки їх можна виготовляти і збирати на підприємстві та перевозити єдиним блоком на місце встановлення; *реакторами*, оскільки в них використовується ядерний поділ для виділення тепла з метою одержання енергії.

На сьогодні у світі розробляється понад 80 комерційних проєктів ММР, які перебувають на різних стадіях наукової розробки, на різних етапах проєктування і розраховані на різну продуктивність та різні галузі застосування, такі як електроенергетика, гібридні енергетичні системи, опалення, опріснення води, парогенерація для промислових застосувань, воднева енергетика (рис. 1).

Очікувані переваги ММР ґрунтуються на «малому» і «модульному» характері їх дизай-

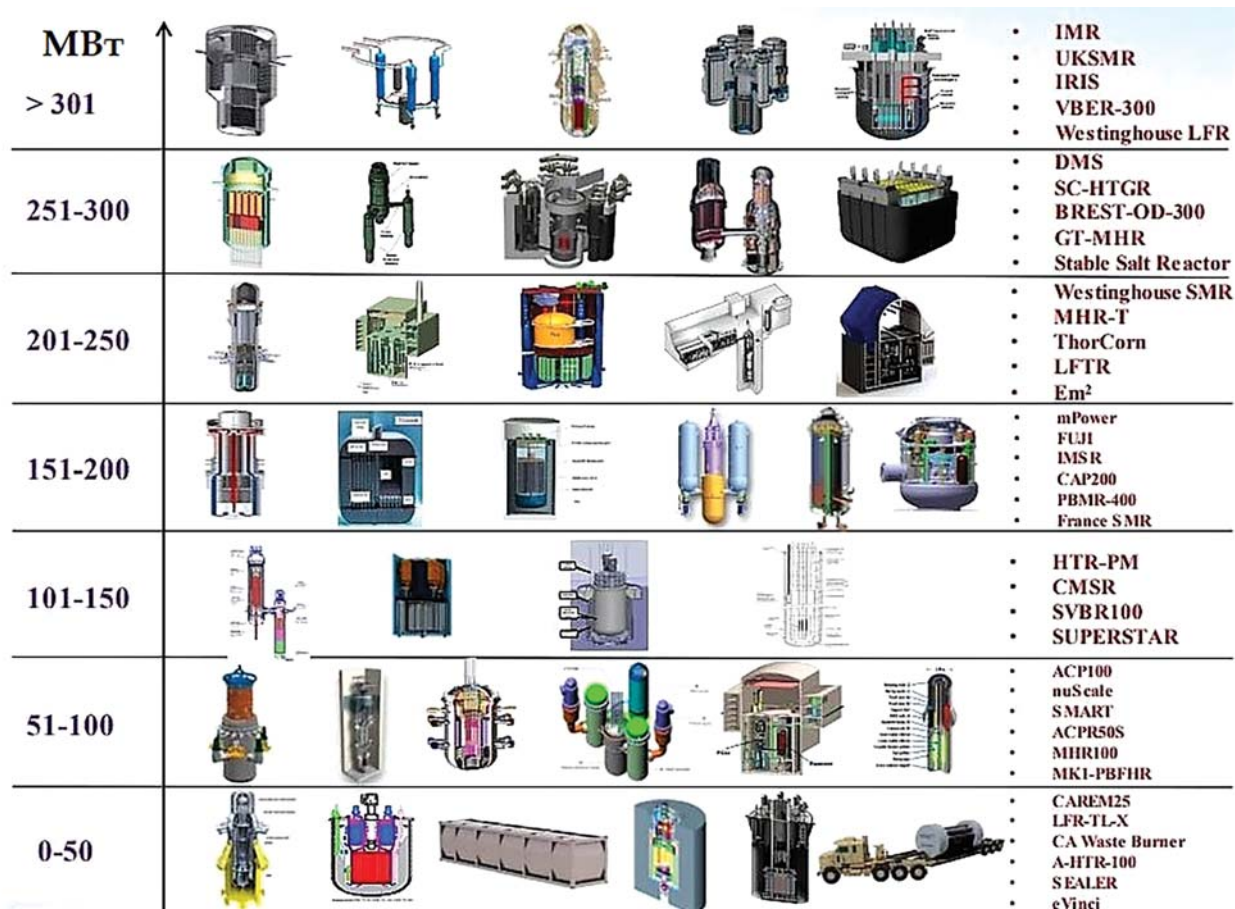


Рис. 1. Проекти малих модульних реакторів залежно від потужності

ну. Невеликий розмір означає, що їх можна розмістити в місцях, непридатних для будівництва великих атомних електростанцій. Збірні блоки можна виготовляти, а потім доставляти і встановлювати на місці, тому вони потенційно є більш доступними для будівництва, ніж традиційні реактори, які зазвичай розробляють спеціально для конкретних місць розташування, що часто призводить до затримок і збільшення строків будівництва.

Технологія ММР розроблена так, щоб заощадити кошти і час на будівництво, з можливістю поступового її розгортання, відповідно до зростання попиту на енергію. Дві основні перешкоди для розширення доступу до енергії — це відсутність мережевої інфраструктури (наприклад, у сільській місцевості) та вартість

підключення до мережі (висока для електрифікації сільської місцевості).

Малі модульні реактори, як правило, безпечніші завдяки використанню пасивних систем, їх меншій потужності і нижчому робочому тиску. Пасивні системи використовують такі фізичні явища, як природна циркуляція, конвекція, гравітація та власний тиск, щоб відключити системи в разі виникнення надзвичайної ситуації. Теоретично це означає, що втручання людини не потрібне.

ММР можна встановлювати як з підключенням кожного блока окремо, так і в багатомодульному варіанті. При багатомодульному варіанті на одному майданчику експлуатується певна кількість однакових реакторів, які використовують спільну інфраструктуру, систе-

му фізичного захисту, їх обслуговує один і той самий персонал.

Крім виробництва електроенергії ММР можна застосовувати для генерації теплової енергії для централізованого опалення, опріснення води, у різних термохімічних і навіть металургійних процесах. Для цього найбільш підходять високотемпературні реактори з газовим охолодженням і теплоносіями з розплавлених солей та металів. Однак це, скоріш за все, перспектива не на найближче майбутнє.

Найбільш опрацьованими на сьогодні у світі є проекти ММР, наведені в таблиці.

Проекти малих модульних реакторів, що перебувають на різних стадіях технологічної готовності, сьогодні вже роблять значні кроки до комерціалізації. Інформаційна панель NEA Small Modular Reactor Dashboard містить огляд 21 конструкції ММР і аналізує прогрес у їх розгортанні та комерціалізації. Для кожного проекту, крім готовності технології, прогрес оцінюють за шістьма додатковими параметрами: готовність до ліцензування, розміщення, фінансування, ланцюг постачання, залучення фахівців та паливо. Аналіз за цими показниками дає змогу оцінити, як швидко на різних ринках по всьому світу технології та проекти ММР просуваються від концепції до комерціалізації.

Розвиток малих модульних реакторів та значний потенціал їх розгортання в найближчій перспективі спонукали багато держав світу оцінити готовність своєї нормативної бази до регулювання нових проектів ММР.

Переваги ММР. Важливо наголосити, що перспективи використання ММР пов'язані не лише з виробництвом недорогої електроенергії для енергозабезпечення в масштабі всієї країни, а й з тепло- та електроенергетичним забезпеченням окремих міських агломерацій (комунальна сфера) та окремих промислових підприємств (приватна сфера).

Основні переваги ММР порівняно з традиційними великими АЕС — безпека та економічність — пов'язані з деякими їх особливостями.

1) *Надійність.* Заводське серійне виробництво забезпечує ефективне відпрацювання та

уніфікацію технологій виготовлення і кращий контроль якості. Менша потужність та простіша конструкція порівняно з енергоблоками АЕС, а також стандартизація паливних елементів знижують аварійні ризики.

2) *Безпека.* Відсутність чи менша кількість активних систем безпеки, які потребують зовнішнього електроспоживання, їх автоматизація. Менші витрати та коротші терміни введення блоків з експлуатації і ремедіації довілля.

3) *Маневреність.* Можливість зміни режиму виробництва електроенергії — до повного зупину і повторного запуску при швидкому наборі потужності (це також і фактор безпеки). Це одна з найважливіших переваг, яка в Україні може вирішити проблему вирівнювання балансу навантаження систем енергогенерації та енергоспоживання.

4) *Вибір місця для розміщення.* Можливість вибору місць для розміщення ММР значно ширша, ніж для АЕС. Це зумовлено як більшою надійністю і безпечністю ММР, так і тим, що потреби у землевідведенні, як правило, не перевищують 4 га для одного модуля. При розміщенні «куща» реакторів потреби зростають, але вони все одно неперівнянні з потребами для розміщення енергоблока АЕС такої самої

Світові проекти ММР

Стадії розроблення	Назви проектів ММР
Працюють або будуються (9 проектів)	CNP-300, PHWR-220, EGP-6, KLT-40S, RITM-200, CAREM25, HTR-PM, ACP100/Linglong One, BREST
Розроблені, до 25 МВт (11 проектів)	U-battery, Starcore, MMR-5/10, Holos Quad, Gen-4, Xe-Mobile, BANR, Sealer, eVinci, Aurora, NuScale micro
Розгортання найближчим часом (17 проектів)	SMR-160, SMART, Xe-100, ARC-100, Moltex SSR-W
На початку розроблення (21 проект)	mPower, Westinghouse LFR, Moltex SSR-U

потужності. Крім того, важливо, що більшість типів ММР не потребують значних витрат водних ресурсів, навіть для ММР з водяним охолодженням потреби у воді невеликі. Є проекти підземного розміщення модулів у комплексі зі сховищем відпрацьованого ядерного палива.

5) *Управління і персонал.* Оскільки в ММР автоматизовано практично всі технологічні процеси, крім перезавантаження палива, система управління для них простіша і потребує меншої кількості персоналу.

6) *Терміни експлуатації.* Заявлені компаніями-виробниками терміни експлуатації ММР коливаються від 20 до 100 років. Окремі конструкції ММР створюються для одноразового завантаження палива при запуску.

7) *Застосування в інших галузях крім виробництва електроенергії.* Деякі компанії розробляють конструкції ММР, які уможливають їх використання для виробництва тепла, що суттєво розширює потенційний попит у комунальній сфері та різних галузях промисловості.

8) *Екологічність.* Широке впровадження ММР потенційно дає реальну можливість вирішити цілу низку екологічних проблем та істотно знизити споживання природних ресурсів як у межах кожної окремої країни, так і в планетарному масштабі.

Недоліки та невизначеності ММР. Оскільки технології ММР швидко розвиваються, з високою ймовірністю можна очікувати зростання переваг та привабливості ММР. Так само ймовірно, що надалі зменшуватимуться потенційні недоліки та невизначеності, перелічені нижче.

1) *Собівартість.* Заявлені на сьогодні орієнтовні витрати на створення (проекування, розроблення, виробництво, монтаж, запуск) одного реактора потужністю 300 МВт становлять близько \$1 млрд. Очевидно, що в ринкових умовах з налагодженням та відпрацюванням серійного виробництва, розвитком кооперації і суміжних галузей собівартість поступово зменшуватиметься.

2) *Технологічні невизначеності.* Є певні не до кінця відпрацьовані конструктивні й технологічні аспекти, наприклад пов'язані з вибором

ядерного палива та способом його завантаження-розвантаження, поводженням з відпрацьованим паливом. Ці невизначеності, поза сумнівом, будуть усуватися під час реалізації пілотних проектів.

3) *Поводження з відпрацьованим ядерним паливом.* Процес поводження з ВЯП при реалізації проектів ММР потребує окремої уваги. Для ММР, які працюватимуть на тому самому паливі, що й традиційні АЕС, поводження з відпрацьованим паливом буде аналогічним поводженню у випадку великих реакторів. Слід зазначити, що деякі реактори третього і четвертого поколінь характеризуються вищим ступенем вигорання палива і вищою ефективністю його використання, що знижує обсяги ВЯП.

4) *Відсутність законодавчої і нормативної бази.* На сьогодні це найбільша проблема. Вирішити її можна буде лише поступово, аналізуючи і враховуючи досвід реалізації пілотних проектів, які вже втілюють деякі провідні компанії світу.

5) *Невизначеність позиції суспільства.* На сьогодні ставлення суспільства до ММР поки несформоване, але можна очікувати негативну реакцію «зеленої» громадськості та потенційну настороженість з боку місцевих громад.

Переваги і недоліки ММР в контексті України. На час підготовки цієї статті МАГАТЕ ще не ввело вимоги до безпеки ММР, що гальмує їх впровадження. Підготовка та імплементація відповідної нормативно-правової бази є ключовою проблемою впровадження ММР в Україні.

Коли йдеться про висвітлення переваг та недоліків ММР, їх прийнято порівнювати з АЕС, що, на наш погляд, не зовсім правильно, принаймні для України. Ядерна енергетика є стратегічною галуззю української економіки, на якій тримається весь промисловий потенціал країни. ММР — це дуже перспективний напрям посилення цього потенціалу, але повністю замінити АЕС в досяжному майбутньому вони навряд чи зможуть.

Серед компаній, які є лідерами з технічних розробок у цій галузі і найбільш близькі до втілення своїх проектів у життя, можна назвати

NuScale Power, Holtec International, Westinghouse, Hitachi Nuclear Energy, Rolls-Royce та ін. Однак наразі єдиної стратегії розвитку ММР немає ані у компаній-розробників, ані у державних органів. В Україні на сьогодні ситуація невизначена. НАЕК «Енергоатом» демонструє зацікавленість у заміні на ММР енергоблоків АЕС, які доведеться через деякий час виводити з експлуатації. Тобто вони розглядають ММР як імовірну альтернативу будівництву нових енергоблоків, необхідних для підтримання ядерної енергогенерації. Проте крім підписання рамкових угод з двома американськими компаніями — Holtec International у 2019 р. і NuScale Power у 2020 р., реальних дій у цьому напрямі не спостерігається.

Паралельно з державним монополістом у галузі ядерної енергетики певну зацікавленість у ММР починають виявляти потужні приватні промислово-енергетичні холдинги, наприклад ДТЕК. Це пов'язано насамперед з особливістю окремих типів ММР — можливістю їх так званого неелектроенергетичного використання, зокрема для виробництва або виключно тепла, або тепла паралельно з електрикою.

Стратегія Державної інспекції ядерного регулювання України полягає в очікуванні результатів реалізації проектів ММР провідними компаніями-виробниками та напрацьованої нормативної бази від країн — лідерів з впровадження ММР.

Сьогодні розробники ММР, фахівці з ядерної енергетики та уряди різних країн намагаються прискорити роботу, щоб першими запустити готовий до експлуатації енергоблок, а потім почати експортувати технологію на світовий ринок на основі референтної системи ліцензування, гарантування безпеки та регулювання. Поряд з внутрішніми інвестиціями на якомога скоріший початок промислового застосування ММР впливають і такі глобальні фактори, як підвищення попиту на електроенергію, зростаючий запит на енергетичну безпеку та прагнення до переходу на низьковуглецеву енергетику.

На жаль, Україна в цій гонці дещо затрималася на старті. Однією з об'єктивних причин

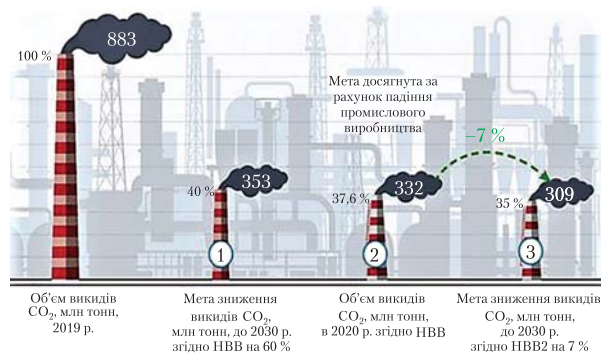


Рис. 2. Зменшення викидів CO₂ Україною до 2030 р. згідно з Національно визначеним внеском у Паризьку кліматичну угоду

цього є пострадянська спадщина і залежність від російського ядерно-енергетичного комплексу, який має великий вплив як на галузеві та науково-технологічні установи, так і на владні структури, що призводить до гальмування розвитку сучасних ядерних технологій.

На сьогодні перед енергетичною сферою нашої держави стоять серйозні енергетичні виклики, зумовлені застарілими технологіями спалювання вугілля та вичерпанням ресурсу ядерних енергоблоків. У рамках Кіотського протоколу, а також згідно з Національно визначеним внеском у Паризьку кліматичну угоду Україна має міжнародні зобов'язання щодо зниження викидів CO₂ та розроблення низьковуглецевої стратегії розвитку енергетики з метою зменшення негативного впливу на довкілля (рис. 2).

Рівень смертності, пов'язаної із забрудненням повітря, в Україні є одним із найвищих у світі — за результатами дослідження групи вчених Всесвітньої організації охорони здоров'я він оцінюється у 120 смертей на 100 тис. населення. За кількістю смертей через забруднення навколишнього середовища Україна потрапляє до першої п'ятірки серед країн Європи, про що йдеться в дослідженні Глобального альянсу з питань здоров'я та забруднення (ГАНР). Загалом у світі забруднене повітря — найбільший «екологічний» вбивця, адже є причиною кожного третього випадку інсульту, раку легень та хвороб серця.

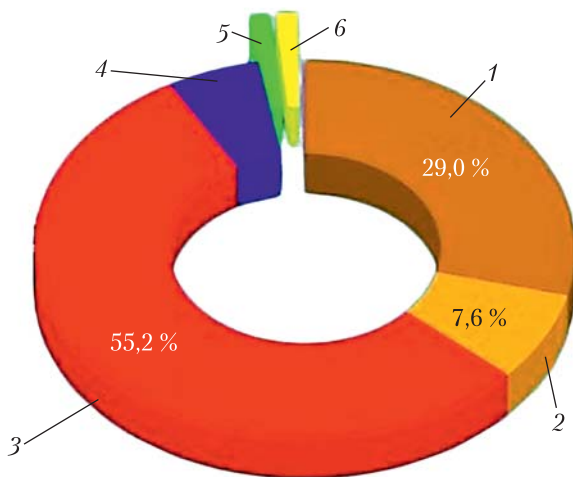


Рис. 3. Структура потужностей енергосистеми України: 1 – теплові; 2 – комбіновані; 3 – атомні; 4 – гідро; 5 – вітрові; 6 – сонячні електростанції

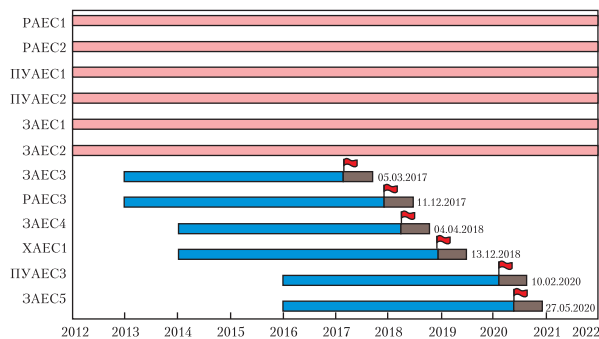


Рис. 4. Подовжені терміни експлуатації енергоблоків АЕС України. Фактично з 15 діючих блоків лише ЗАЕС-6, ХАЕС-2 і РАЕС-4 працюють ще в межах проектних термінів експлуатації

Україна на сьогодні має потужну ядерну галузь, яка робить вагомий внесок в економічну та енергетичну безпеку держави, а також її екологічну стійкість. В останні 5 років частка електроенергії, виробленої на АЕС, перевищувала 50 % (рис. 3). Нині в Україні на чотирьох АЕС налічується 15 діючих енергоблоків. У 2023–2025 рр. вдруге буде переглянуто термін подовження строків експлуатації енергоблоків, у 2030–2031 рр. кілька з них мають бути зупинені, у 2040 р. закінчується термін експлуатації 10 реакторів, а з 2040 до 2055 р. —

ще трьох реакторів. Зрозуміло, що нескінченно подовжувати термін експлуатації енергоблоків неможливо (рис. 4).

Крім того, до ядерної галузі України входить значна кількість підприємств ядерно-паливного циклу — уранові родовища, заводи з перероблення уранової сировини тощо.

Відповідно до чинної Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», ядерна енергетика вважається одним з найбільш економічно ефективних низьковуглецевих джерел енергії. Подальший розвиток енергетики на період до 2035 р. ґрунтується на тому, що частка ядерної енергетики в загальному виробництві електроенергії зростатиме, і вона продовжуватиме відігравати провідну роль у забезпеченні енергетичної безпеки країни, надійної та безпечної генерації електроенергії.

Вплив ядерної галузі на економічну та енергетичну безпеку важко переоцінити. В ядерній промисловості України задіяно більш як 45 тис. фахівців, є розвинене виробництво, науково-дослідні інститути НАН України, десятки тисяч наукових співробітників, конструкторів та інженерів. Все це створює потужну базу для розроблення власних технологій ММР, а на першому етапі — можливості для впровадження вже наявних проєктів ММР.

Доцільність впровадження ММР в Україні.

Доцільність використання ММР слід обґрунтувати з огляду на прогнозну оцінку потреб України в період повоєнного відновлення та на етапі подальшої соціально-економічної розбудови країни. Аналіз наявної інформації свідчить, що можна визначити такі основні місця потенційного розміщення ММР:

- на промислових майданчиках нині діючих АЕС НАЕК «Енергоатом»;
- поблизу або в межах міст і міських агломерацій;
- на території великих промислових підприємств — споживачів значних обсягів електроенергії та/або тепла;
- в прибережних зонах акваторій морів і водосховищ.

Слід зазначити, що ці потенційні напрями використання ММР можуть нівелювати роль НАЕК «Енергоатом» як державного монополіста у сфері атомної енергогенерації і, звичайно, потребують відповідної законодавчої бази.

Нижче розглянемо детальніше способи використання ММР.

1) *Доцільність розміщення ММР на промислових майданчиках АЕС.* НАЕК «Енергоатом» неодноразово офіційно висловлювала зацікавленість у реалізації пілотного проекту з розміщення одного чи кількох модулів малих реакторів на промайданчику однієї з діючих АЕС, зокрема на Південноукраїнській АЕС. НАЕК «Енергоатом» розглядає можливість застосування ММР у двох аспектах: 1) як компенсатора ймовірного (чи вже наявного) дефіциту енергогенерації; 2) як заміну будівництва нових енергоблоків АЕС замість тих, які будуть виводити з експлуатації у недалекому майбутньому. Тобто у другому варіанті ММР планують використовувати як ще одну складову наявної системи атомної енергогенерації. На думку фахівців НАЕК «Енергоатом», впровадження ММР економічно більш виправдане, ніж будівництво нових традиційних енергоблоків, і крім того, не потребує значних початкових капіталовкладень, а також значно простіше в організаційному плані.

Переваги такого способу розміщення ММР очевидні — готові промайданчики, інфраструктура, магістральні лінії електропередачі (ЛЕП); наявність кваліфікованого персоналу; відсутність або незначні рівні екологічних обмежень.

На нашу думку, вибір майданчика Південноукраїнського енергокомплексу (ПУЕК) для пілотного проекту з розміщення ММР є вдалим і цілком виправданим, зокрема завдяки наявності гідроакмулюючих потужностей Ташлицької ГАЕС, які забезпечують високу маневреність процесу енерговиробництва.

2) *Доцільність розміщення ММР в містах та поблизу великих міських агломерацій* для ефективного забезпечення комунальних потреб в електро- та теплоенергопостачанні в період повоєнного відновлення України.

Одним з першочергових завдань на початку повоєнного відновлення України буде забезпечення належного рівня надання комунальних послуг населенню міст, зруйнованих або постраждалих унаслідок бойових дій. ММР невеликої потужності спроможні оперативно забезпечити потреби в електроенергії та теплі. На першому етапі ММР можна розглядати як заміну теплової генерації. В Україні багато ТЕС, термін експлуатації яких закінчується. Крім того, майданчики теплових електростанцій можна використати для будівництва ММР, оскільки там є готова інфраструктура. Такий проект найлегше реалізувати.

Для цього вже зараз необхідно заповнити правові прогалини, які можуть загальмувати цей процес. Процедура має передбачати місцеве громадське обговорення цього питання.

Забезпечення електроенергією та теплом за допомогою ММР великих міських агломерацій скоріше за все буде питанням більш довгострокової перспективи.

Окремо стоїть надзвичайно серйозна і комплексна проблема відновлення Донбасу. У цьому аспекті доцільним видається використання ММР для поступової заміни вугільних ТЕЦ. У цьому разі ММР зможуть достатньо ефективно забезпечувати потреби і населення, і виробничої сфери. Однак проблема ускладнюється тим, що різнострокові перспективи вирішення питання відновлення Донбасу безпосередньо пов'язані з політичним процесом, а тому не є предметом наукового аналізу.

3) *Доцільність розміщення ММР на промайданчиках великих промислових державних і приватних підприємств* для електроенергетичної та теплової генерації, розробки техногенних родовищ. ММР можна ефективно застосувати при раціональному використанні відходів урановидобувної промисловості, хвостів уранопереробної промисловості та інших галузей, насамперед таких як переробка забалансових руд, за умови розширення мінерально-сировинних ресурсів України за рахунок не лише урану, а й нікелю, кобальту, ванадію, скандію, цинку та деяких інших металічних корисних копалин. В Україні є більше десятка техноген-

них родовищ, підготовлених до економічно доцільної розробки. Навіть сьогодні з відвалів уранових шахт видобувають уран та супутні елементи (ванадій, скандій, рідкісноземельні елементи).

Деякі компанії, такі як ДТЕК чи інвестиційна компанія BGV Group Management, ще довго до початку активної фази війни висловлювали зацікавленість у впровадженні ММР у виробничі процеси. Очевидно, великий бізнес добре розуміє переваги і вигоди цієї технології, яка спроможна забезпечити фактичну енерго-незалежність великих підприємств-енергоспоживачів.

ММР можуть бути ефективними в галузях, які потребують значних витрат електроенергії чи/та тепла: металургії, хімічній промисловості, або, наприклад, в установках з опріснення морської води.

У питанні використання ММР для обслуговування потреб промислових підприємств ініціатива належить державному чи приватному інвестору. Роль держави при цьому має реалізовуватися у площині нормування та правового регулювання.

4) *Доцільність розміщення плавучих ММР в прибережних акваторіях морів та водосховищ Дніпровського каскаду.* Однією з переваг ММР є їх виробництво у заводських умовах, у тому числі завантаження палива, пусконаладжувальні роботи та запуск реактора на виробничих потужностях компанії-розробника. Після завершення планового терміну експлуатації такий реактор можна повернути на завод, де його буде виведено з експлуатації. Потім після профілактики реактор повторно завантажать паливом і повернуть власнику для подальшої експлуатації. По суті, функції власника реактора — експлуатуючої організації зводяться до дотримання правил безпеки та експлуатаційних регламентів, наданих виробником.

Однак постає проблема транспортування реактора. На сьогодні запропоновано лише одне її рішення — розміщення ММР на судні, так званому «ядерному кораблі» (nuclear ship). При цьому судно з ММР рухається до місця призначення з використанням енергії, яку ви-

робляє реактор. МАГАТЕ позитивно оцінює такий варіант можливої експлуатації ММР. Проте реактор до його зупинки не можна демонтувати з судна, тому є лише один варіант його експлуатації — в межах прибережної акваторії поблизу місця споживання генерованої енергії.

На нашу думку, такий варіант розміщення ММР також можна розглядати як пріоритетний на першому етапі повоєнного відновлення країни, оскільки він дає змогу швидко і надійно забезпечити потреби в енергоресурсах міст та промислових підприємств уздовж берегів Чорного і Азовського морів та водосховищ Дніпровського каскаду, а також дозволяє подавати електроенергію в єдину енергосистему держави.

Цей напрям також потребує відповідного нормативно-правового врегулювання та усунення законодавчих перешкод.

Екологічні аспекти. Очевидно, що питання, пов'язані з техніко-економічним обґрунтуванням вибору місця розташування ММР, його типу, потужності, способу і терміну використання, умов експлуатації та виведення з експлуатації, мають розглядатися та проходити в індивідуальному порядку всі необхідні експертизи й передбачені законодавством процедури (для кожного модуля і кожного окремого реактора, як це рекомендує МАГАТЕ). При цьому важливо звернути увагу на такі аспекти.

1) Екологічні процедури підготовчої стадії слід проводити з урахуванням того, що, порівняно з АЕС, проекти ММР можуть мати конструктивні особливості та відмінності на стадіях заводського виробництва й тестування, будівництва, введення в експлуатацію, а також під час довгострокової експлуатації та обслуговування.

2) Жодних принципових змін у процесі розгляду проекту ММР порівняно з проектом АЕС немає, однак екологічні аспекти, пов'язані з розширенням переліку місць потенційного розташування ММР (зокрема, підземних, підводних, плавучих), можуть впливати на їх проектування в плані безпеки. Нові можливості з вибору місць для розміщення ММР мають пе-

редбачати оцінку вразливості до конкретних додаткових зовнішніх небезпек і явищ навколишнього середовища. Для багатоблоккових (модульних) ММР слід враховувати потенційні небезпеки одночасного впливу різних факторів на кілька блоків/модулів на майданчику.

3) Одним з питань, на якому МАГАТЕ акцентує особливу увагу, є вибір чи встановлення зони впливу ММР (за термінологією МАГАТЕ, emergency planning zone (EPZ) — зона планування надзвичайної ситуації). У випадку багатомодульних ММР запропоновано підхід, який ґрунтується на аналізі аварійних сценаріїв. Очевидно, що директивний підхід до встановлення зон впливу для майданчиків з більш ніж одним ММР не можна вважати виправданим. Для обґрунтування придатності земельних ділянок для створення промайданчиків ММР можна використовувати метод оцінки встановленої зони ефективного впливу. Цю зону впливу слід оцінювати з точки зору наявності факторів природного й техногенного характеру, які потенційно можуть впливати на ММР — посилювати чи послаблювати наслідки його діяльності для довкілля і населення.

4) Проблеми забезпечення фізичного захисту зростають з розширенням вибору місць розташування. При розміщенні ММР на промайданчиках АЕС додаткові проблеми створює багатомодульність.

На наш погляд, процедура екологічної оцінки розміщення та експлуатації ММР має виходити з визначення зони впливу проєктованого об'єкта. Інший важливий аспект — створення ефективної системи моніторингу та контролю, як об'єктової, так і незалежної.

З точки зору екологічного унормування діяльності необхідно встановити уніфіковані вимоги до зон впливу ММР, які враховуватимуть природно-кліматичні особливості різних фізико-географічних зон України. Ці вимоги можуть бути основані на традиційному для нас директивному підході або ж на оцінці ефективного впливу (оцінці ризику), як це практикується в деяких країнах.

Визначення зони ефективного впливу для ММР передбачає встановлення певних обме-

жень для інших видів діяльності на цій території, наприклад вимог щодо відсутності зон відпочинку, вразливих об'єктів соціальної інфраструктури тощо. При цьому слід звернути увагу на такий аспект: екологічне законодавство містить положення про необхідність оцінювання кумулятивних впливів нової діяльності. Збільшення кумулятивного впливу може бути підставою для відхилення проєкту на стадії оцінки впливу на довкілля. Це може ускладнити процес погодження інсталяції ММР на промайданчиках АЕС. Зазначимо, що публікації МАГАТЕ не містять рекомендацій щодо можливості встановлення ММР на майданчиках АЕС, хоча й не забороняють таке розташування. На нашу думку, ця проблема має бути предметом окремих консультацій з експертами МАГАТЕ та відповідними фахівцями за участю органу екологічного контролю. Ймовірно, найкращим вирішенням проблеми може стати програма впровадження ММР на заміну енергоблокам АЕС, які виводяться з експлуатації.

Питання, на які необхідно отримати відповіді до прийняття рішення про перспективи впровадження ММР. Нижче наведено проблемні питання, які, на нашу думку, потрібно вирішити до прийняття рішення про перспективи впровадження ММР в Україні.

1) *Гарантії безпеки та надійності.* Оскільки на сьогодні немає тривалої історії експлуатації ММР, гарантування заявлених параметрів слід розглядати як обов'язкову вимогу, незалежно від експертної оцінки проєкту та результатів його ліцензування. Гарантії, які надаються компанією-виробником чи країною походження ММР, мають бути застраховані міжнародною страховою компанією та/або підкріплені відповідною урядовою угодою.

2) *Питання вартості та собівартості.* На сьогодні питання собівартості енергогенерації на ММР не до кінця з'ясоване. Очевидно, є всі підстави вважати, що з розширенням та уніфікацією виробництва ціна самих установок та їх експлуатації знижуватиметься; водночас вартість палива залишається непрогнозованою: вона може як зростати зі збільшенням попиту, так і знижуватися внаслідок розробки нових

родовищ та вдосконалення технологій видобування (наприклад, підземного вилуговування).

3) *Форма розрахунків*. Питання полягає у тому, які принципи закупівлі матимуть пріоритет на етапі впровадження ММР, коли цінний фактор не стабілізований. В принципі можливі різні варіанти придбання ММР: на заводі, «в порту», «під ключ» або проміжні варіанти. Іншим варіантом є закупівля не установок, а енергії через укладання відповідних довгострокових угод (PPAs — power purchase agreements). При цьому необхідна ділянка (або кілька ділянок) надається компанії-виробнику після проходження всіх передбачених національним законодавством ліцензійних процедур. Можливо, цей варіант є оптимальним на першому етапі повоєнного відновлення країни.

4) *Законодавче забезпечення*. За нашою оцінкою, нова діяльність з впровадження ММР не потребує суттєвих змін законодавства, проте нормативна база має пройти перевірку (тестування) на визначення можливих прогалів та з метою адаптації до особливостей ММР, таких як, наприклад, багатомодульність. Як уже зазначалося, доцільно запровадити уніфіковані вимоги до майданчиків ММР та їхніх зон впливу, а також методик розрахунків параметрів зон впливу (або використовувати методику МАГАТЕ).

5) *Вибір пріоритетних напрямів використання ММР*. Потрібно визначити найважливіші напрями і способи впровадження ММР з урахуванням нинішніх потреб та прогнозів щодо майбутніх потреб країни, а також можливих альтернативних варіантів.

6) *Екологічні аспекти*. Потрібно розробити методичні рекомендації (на основі чинного законодавства та нормативів їх коригування) щодо підготовки екологічно-експертної документації для ММР: стратегічної екологічної оцінки, оцінки впливу на довкілля, проекту організації санітарно-захисної зони, а також проектної документації — розділу «Оцінка впливу на навколишнє середовище». Крім того, як уже зазначалося, доцільно встановити вимоги до проектування зони ефективного впливу (можливо, в рамках оцінки впливу на довкілля).

7) *Ставлення громадськості*. Суспільство може по-різному сприймати тему ММР. Важливо уникнути поширення неправдивої та тенденційної інформації, оскільки після аварії на ЧАЕС громадськість чутливо ставиться до ядерної енергетики. Особливо небезпечними можуть бути тези про використання території України як «полігону для випробовування нових ядерних установок». Загалом українська громадськість цілком спроможна усвідомити очевидні переваги ММР.

Варіанти стратегічних сценаріїв. Згідно з проектом Плану відновлення України Національної ради з відновлення України від наслідків війни, «енергетична безпека відіграє важливу роль у забезпеченні економічного функціонування і зростання держави... У процесі відновлення України енергетика має стати однією з ключових галузей, яка забезпечуватиме експортні надходження і підтримуватиме фінансову стійкість держави... Головна тенденція для відновлення України в енергетиці — швидка електрифікація економіки завдяки енергетичному переходу, а також значне підвищення енергоефективності».

Залучення установ НАН України до наукового супроводу впровадження закордонних проектів ММР на першому етапі з подальшим переходом до розроблення і створення власних технологій на основі ММР може стати потужним імпульсом у розвитку наукової інноваційної діяльності, започаткуванні нових наукових напрямів, залученні міжнародних інвестицій, розширенні міжнародної співпраці та партнерства.

Вибір шляхів для реалізації заявленої мети належить до компетенції органів державної влади за обов'язкової умови врахування громадської думки та участі експертного середовища.

Далі розглянемо сценарії, які, на нашу думку, можливі у середньостроковій перспективі.

1) *Нульова толерантність до ядерної енергетики*. Поступове виведення з експлуатації енергоблоків АЕС, відмова від подовження термінів їх експлуатації та будівництва нових енергоблоків, у перспективі — відмова від

ядерної енергії. Прискорений розвиток альтернативної енергетики. На думку більшості фахівців, такий сценарій супроводжуватиметься зростанням собівартості електроенергії, ймовірним її дефіцитом і, можливо, втратою енергонезалежності. Питання ММР за цим сценарієм не є актуальним.

2) *Продовження нинішньої енергетичної політики.* Варіант розвитку згідно з чинною Енергетичною стратегією України на період до 2035 року. Подовження строків експлуатації енергоблоків АЕС після завершення проектних термінів. Збереження теплової енергогенерації та продовження експлуатації ГЕС. Розвиток альтернативної енергетики. Такий варіант призведе до поступової деградації енергетичної галузі в міру вичерпання традиційних енергоресурсів та старіння обладнання. Найменш «екологічний» варіант, обсяги викидів декларуються, але реально не скорочуються. Можливе наростання енергодефіциту. За цим сценарієм введення в дію ММР можливе в окремих випадках.

3) *Розвиток великих АЕС.* Подовження термінів експлуатації енергоблоків АЕС; будівництво нових реакторів за західними технологіями, ймовірно, наступного (третього, надалі – четвертого) покоління. Скорочення теплогенерації, поступова відмова від неї в міру здорожчання та зменшення ресурсної бази. За цим сценарієм енергонезалежність держави забезпечується ефективно, однак потребує значних капітальних витрат. Водночас, скоріш за все, буде необхідним подальший розвиток маневрових потужностей. Такий сценарій не суперечить розвитку ММР, які можуть стати ефективною допоміжною ланкою енергогенерації, і крім того, займуть свою нішу в деяких галузях (теплозабезпечення, опріснення морської води, виробництво водню, хімічна та ме-

талургійна промисловість, енергозабезпечення віддалених територій тощо).

4) *Пріоритетний розвиток ММР.* Заміна енергоблоків великих АЕС, які виводяться з експлуатації, впровадження у промисловості, можливо, у комунальній сфері. Скорочення і поступова відмова від теплогенерації. Паралельний розвиток малої та альтернативної енергетики. Цей сценарій забезпечує більшу гнучкість у використанні капітальних ресурсів і швидшу окупність порівняно з попереднім варіантом. Певним недоліком цього і попереднього стратегічних напрямів буде технологічна залежність України від країн-лідерів галузі, принаймні на початковому етапі.

5) *Розвиток ядерно-паливного циклу.* Стратегічні напрями, орієнтовані на використання як великих АЕС, так і ММР, набувають більшої ефективності та осмисленості в разі їх поєднання з розвитком вітчизняного ядерно-паливного циклу, що крім енерговиробництва передбачає збільшення видобування та переробки сировини ядерної енергетики, а за оптимістичним сценарієм і виробництво ядерного палива в майбутньому. Попри те, що вже розвідані запаси урану в Україні цілком можуть задовольнити власні потреби принаймні на століття, а торієвої сировини – на тисячоліття, сьогодні видобуток урану становить не більш як 20 % сучасних потреб. Україна експортує уран, оскільки не виробляє ядерне паливо.

Хоча наведені вище сценарії стратегічного розвитку енергетичної галузі досить умовні і в реальності можуть реалізуватися якись проміжні варіанти, важливо наголосити, що в період повоєнного відновлення напрям подальшого розвитку України значною мірою залежатиме саме від того, яким шляхом піде енергетика.

Yuriy L. Zabulonov

Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8239-8654>

PROSPECTS FOR THE IMPLEMENTATION OF SMALL MODULAR REACTORS IN UKRAINE

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, March 22, 2023

The report examines the prospects for the implementation of small modular nuclear reactors in Ukraine from the perspective of the country's energy security. The need to involve the NAS of Ukraine institutions in solving urgent and strategically important scientific and technical tasks for the selection of promising innovative technologies for the energy industry of Ukraine, in particular, through the participation of the Academy's scientists in national and international projects on the creation and implementation of small modular reactors, is emphasized.

Cite this article: Zabulonov Yu.L. Prospects for the implementation of small modular reactors in Ukraine. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. (6): 34–46. <https://doi.org/10.15407/visn2023.06.034>