

УДК 621.039.577-182.3:621.039.58

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202508-017>

## МАЛІ МОДУЛЬНІ ЯДЕРНІ РЕАКТОРИ В УКРАЇНІ: ЕКОЛОГІЧНИЙ КОНТЕКСТ

**Редька І. М., Волошина Н. О.**

Український державний університет

імені Михайла Драгоманова

вул. Пирогова, 9 м. 01601Київ

*VoloshynaNatali@gmail.com**24prf.i.redka@std.udu.edu.ua*

### Анотація

В роботі наведено аналіз технічних та екологічних переваг щодо перспективного використання малих модульних реакторів (ММР), як елемента заміни інших видів генерації електроенергії в кризових умовах енергонебезпеки в Україні. Пошук шляхів енергонезалежності ґрунтується на кліматичних цілях ЄС, Паризькій угоді та місії проєкту Green deal Ukraina.

Малі модульні реактори сьогодні визначають як один із перспективних напрямів розвитку ядерної енергогенерації, зокрема, в умовах повного відновлення, значного попиту на електроенергію, зростання запиту на енергетичну безпеку і низьковуглецеву енергетику в контексті заходів щодо боротьби зі змінами клімату.

Представлено базовий сценарій розгортання малих модульних станцій по роках із сукупною потужністю від 0,3 ГВт у 2030 р. до 8,4 ГВт у 2050 р.

Проведено оцінку «кліматичного дивіденду» та розрахунок уникнення викидів CO<sub>2</sub> на період до 2050 року, та досягнення показника в 57144,7 млн т CO<sub>2</sub>/рік.

Визначено переваги використання ММР: менший розмір, «модульна» структура, більша гнучкість щодо регулювання потужності, високий рівень пасивної безпеки, швидкість у будівництві та введенні в експлуатацію, маневреність обладнання, децентралізація енергосистеми, які дозволяють розглядати ММР як додаткові варіанти енергогенерації в Україні.

Висвітлено екологічні аспекти, як розширення переліку місць потенційного розташування ММР з урахуванням фізико-географічних зон України, цінних для збереження природоохоронних територій, рекреаційних зон та соціальної інфраструктури, визначення зони впливу проєктованого об'єкту, розробка ефективної системи моніторингу та контролю експлуатації ММР, поводження з відходами.

Окреме питання залишається за законодавчим унормуванням впровадження ММР, зокрема, процедури оцінки впливу на довкілля, післяпроєктного моніторингу, оцінювання кумулятивних впливів нової діяльності.

**Ключові слова:** малий модульний реактор, атомна електростанція, викиди CO<sub>2</sub>.

# SMALL MODULAR NUCLEAR REACTORS IN UKRAINE: ENVIRONMENTAL CONTEXT

Redka I. M., Voloshyna N. O.  
Ukrainian State University named  
after Mykhaylo Drahomanov

## Abstract

The paper provides an analytical assessment of the technical and environmental advantages associated with the prospective deployment of Small Modular Reactors (SMRs) as a complementary alternative to traditional electricity-generation technologies under crisis conditions of energy scarcity in Ukraine. The search for pathways toward energy independence is grounded in the EU climate objectives, the Paris Agreement, and the mission of the Green Deal Ukraine initiative.

Small Modular Reactors (SMRs) are currently recognised as one of the most promising directions in the development of nuclear power generation, particularly in the context of post-war recovery, rapid growth in electricity demand, increasing requirements for energy security, and the expansion of low-carbon energy solutions amid global climate-change mitigation efforts.

A baseline scenario for the deployment of small modular nuclear plants across Ukraine is presented, projecting a cumulative installed capacity from 0.3 GW in 2030 to 8.4 GW in 2050.

A «climate dividend» assessment and CO<sub>2</sub>-emission-avoidance estimation were conducted for the period up to 2050, indicating a potential reduction of 57,144.7 million tonnes of CO<sub>2</sub> per year.

The advantages of using SMRs have been identified: smaller size, modular design, greater flexibility in power regulation, a high level of passive safety, faster construction and commissioning, equipment maneuverability, and power system decentralization, which make it possible to consider SMRs as additional electricity generation options in Ukraine.

Environmental aspects are examined through an expanded spatial assessment of potential SMR siting locations, taking into account Ukraine's diverse physiographic zones, the need to preserve protected natural areas, recreational territories, and social infrastructure. The paper also highlights considerations related to impact-zone delineation, the design of effective monitoring and operational control systems, and the management of radioactive waste.

A separate set of challenges concerns the legislative and regulatory framework for SMR deployment, including environmental-impact assessment procedures, post-project monitoring obligations, and the evaluation of cumulative impacts arising from new nuclear activities.

**Keywords:** small modular reactor, nuclear power plant, CO<sub>2</sub> emissions

Складна ситуація з енергозабезпеченням в Україні, яка виникла внаслідок російської агресії, спрямувала зусилля дослідників на пошук альтернативних варіантів задля забезпечення енергонезалежності, стабільної генерації та розподілення електроенергії [1, 394-399]. В основі пошуку нових підходів з енергозабезпечення лежить оновлена стратегія низьковуглецевого розвитку (СНВР) України до 2050 року, яка включає більш актуальні політики, заходи та інструменти для забезпечення «зеленого» відновлення економіки з урахуванням викликів пов'язаних з війною та відповідає кліматичним цілям ЄС та Паризькій угоді.

Європейський «зелений курс» (Green deal) має на меті досягнення кліматичної нейтральності. Зокрема, проєкт Green deal Ukraina (GDU), який

розпочався у 2023, визначив місії серед яких стала реконструкція енергетичної системи України і декарбонізація енергетичної системи та економіки України.

З метою досягнення кліматичної нейтральності економіки України було розроблено 3 сценарії декарбонізації, а саме:

1. WEM (With Existing Measures – з існуючими заходами) (оновлений сценарій Національного плану з енергетики та клімату – NECP);

2. WAM (With Additional Measures – з додатковими заходами) (оновлений сценарій NECP);

3. Сценарій NZE (Net Zero Emissions – чистий нульовий викид) (новий сценарій) [2, С. 34-42].

Малі модульні реактори (ММР) або (SMR) (англ. Small Modular Reactors) сьогодні розглядають як один із перспективних варіантів заміщення вугільних ТЕС, що здатні знизити системні витрати резервування відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), забезпечити комунальне та промислове тепло, а також надати гнучкість для електронасичених регіонів [3, 4]. Тож, доцільно дослідити екологічний контекст і наслідки для навколишнього середовища будівництва і введення в експлуатацію ММР, аналізуючи їх вплив на два компоненти навколишнього середовища: викиди CO<sub>2</sub> та екологічний слід.

## Матеріали і методи

В роботі використовувались методи аналізу джерел науково-технічної літератури, законодавчої бази України, присвяченій забезпеченню енергонезалежності енергосистеми за допомогою малих модульних реакторів, та результати комп'ютерного моделювання, оцінку кліматичного дивіденду.

Оцінку «кліматичного дивіденду» виконано для заміщення вугілля/газу з урахуванням CF та поступової деградації факторів. Базова формула:  $Avoided = Generation \times (EF_{ref} - EF_{SMR})$ , де  $Generation = Capacity \times CF \times 8760$ . Для довідки взято  $EF_{ref}$ : вугілля 0,8–1,1 тCO<sub>2</sub>/МВт·год; газ 0,35–0,5; для SMR/AEC – 0,005–0,02 (LCA).

## Результати дослідження

Визначені стратегією Європейського «зеленого курсу», скорочення викидів парникових газів

та вирішення екологічних проблем, визначають ядерну енергетику як таку, що сприяє пом'якшенню вуглецевої залежності [5]

Малими модульними реакторами згідно з визначенням МАГАТЕ, вважаються ядерні реактори з вихідною електричною потужністю від 10 МВт(е) до 300 МВт(е) [6].

За класифікацією ММР поділяють на легководні (NuScale, BWRX-300, SMR-160); високотемпературні газохолоджувані (HTGR); швидкі (SFR/LFR); розплавлено-сольові (MSR). Їх об'єднують характеристики пасивної безпеки – природна циркуляція, гравітаційне відведення тепла, довготривале утримання реактивності без зовнішнього живлення. Підземне або захищене розміщення та спрощена конфігурація систем мінімізують ризики аварій зі значним радіусом контамінації навколишніх територій [1, 394-399].

Серед переваг ММР відзначають: невелику потужність і модульний характер установки. Це дозволяє задовольнити попит на енергію у найвіддаленіших місцях. Терміни будівництва і введення в експлуатацію ММР складають 3-5 років, а терміни служби – 40-80 років. Стабільність та гнучкість енергопостачання забезпечується здатністю інтегруватися в існуючі енергетичні мережі України [1, 394-399].

Передбачається, що ММР можуть стати екологічно прийнятним та чистим джерелом електроенергії. Станом на 2025 рік у різних країнах відсутній досвід масового промислового застосування ММР. Більшість проектів знаходяться на стадії розробки, відтак, інформація про потенційні чи реальні наслідки їхньої експлуатації для довкілля залишаються невідомі [2, 34-42].

Виробництво ядерної енергії відносять до видів діяльності, що спричинює значний вплив на довкілля, відповідно, такі об'єкти проходять процедуру оцінки впливу на довкілля. Атомні електростанції та інші ядерні реактори, включаючи будівництво, виведення (зняття) з експлуатації таких електростанцій або реакторів (крім дослідницьких установок для виробництва і конверсії ядерного палива та сировини для одержання вторинного ядерного палива, матеріалів, що діляться та відтворюються, потужність яких не перевищує 1 кіловат постійного теплового навантаження відносять до першої категорії видів планованої діяльності та об'єктів, які можуть мати значний

вплив на довкілля і підлягають оцінці впливу на довкілля) (ст. 3 п. 2 пп. 2 Закону України «Про оцінку впливу на довкілля») [7].

ММР, як і АЕС працюють на радіоактивному паливі. Тому, важливим залишається питання управління радіоактивними відходами. Вдосконалені конструкції реакторів як малі модульні реактори та реактори IV покоління пропонують покращену безпеку, паливну ефективність та можливості управління відходами.

Через складнощі із управлінням ядерними відходами або «аварійне» надходження речовин в навколишнє середовище деякі країни вважають ядерну енергетику небезпечною. Враховуючи це окремі європейські держави взяли курс на повну відмову від ядерної енергетики (Німеччина, Іспанія). Наслідком безпекових заходів стала переорієнтація економік на альтернативні джерела енергії, посилення державного регулювання енергопостачання та формування вищих стандартів безпеки і управління ресурсами. В той же час, інші країни як Франція зосередилася на диверсифікації енергетики та її подальшому використанні і сьогодні є другою за величиною країною у світі з ядерними реакторами, де ядерна енергетика становить близько 70 % виробництва електроенергії в країні [5].

Залишається не з'ясовним питання впливу ММР на флору і фауну, природні оселища, природні екосистеми. Враховуючи, що ММР менші за традиційні реактори, територія їх розташування та зона впливу будуть суттєво меншими порівняно з АЕС. Відповідно, кількість вироблених ядерних відходів, які необхідно зберігати або утилізувати також буде меншою. Окремі моделі ММР передбачають взагалі безвідходне виробництво. Окремо розглядаються варіанти щодо можливості встановлення ММР на промайданчиках майданчиків АЕС і створення програми їх впровадження на заміну енергоблокам АЕС, які виводяться з експлуатації [9, 42-43].

На думку Барбашева С.В. існує значна ймовірність того, що ММР можуть мати значний вплив на навколишнє середовище, зокрема, порушувати стійкість екосистем [2, 34-42].

Інші дослідники оцінюють зростання вуглецевого сліду від ММР, які можна буде розмішувати окремо, але вони формуватимуть мережу з порівняно більшої кількості реакторів та установок [8].

Крім того, розширенням переліку місць потенційного розташування ММР (підземних, підводних, плавучих) потребують розробку критеріїв щодо ділянок для їх розміщення з урахуванням потенційні небезпеки для довкілля та встановлення зони впливу, так звана emergency planning zone (EPZ) – зона планування надзвичайної ситуації (за термінологією МАГАТЕ).

Дослідники звертають увагу на врахування природно-кліматичних особливостей різних фізико-географічних зон України та необхідність розробки уніфікованих вимог до зон впливу ММР. За основу може бути взятий директивний підхід або оцінка ризиків. Також, важливим є розташування поруч з ділянкою розміщення ММР рекреаційно-оздоровчих територій, територій і об'єктів природно-заповідного фонду, вразливих об'єктів соціальної інфраструктури тощо [9, 42-43].

До дорожньої карти провадження ММР входять: адаптація класифікації SSC (конструкції, системи та компоненти) і категорій безпеки для ММР; випуск методичних документів для пасивних систем (природна циркуляція, гравітаційне заливання), кіберзахисту й захищеності; узгодження процедур ОВД із регуляторними етапами (попередня оцінка майданчика → звіт із безпеки → дозвіл на будівництво → дозвіл на введення в експлуатацію); рамка взаємовизнання серійних модулів за ідентичним серійним номером дизайну.

Ліцензування ММР потребує гармонізації національних норм із рекомендаціями МАГАТЕ (SSR-2/1, SSG-2, SSG-30), а також обміну досвідом з регуляторами країн-партнерів (NRC/CSA/ONR), унормування згідно з Конвенцією про ядерну безпеку, будуть потрібні додаткові процесуальні дії щодо інтерпретації визначення видів діяльності в рамках Конвенції про оцінку впливу на навколишнє середовище в транскордонному контексті (Конвенція Еспо) та Конвенції про доступ до інформації, щодо участі громадськості в процесі прийняття рішень та доступі до правосуддя з питань, що стосуються довкілля (Орхуська конвенція) [2, 34-42].

Розрахунки проводили беручи за основу викиди CO<sub>2</sub> від теплової генерації. За базовим сценарієм при 8,4 ГВт і CF≈90% уникнені викиди в 2050 р. становлять понад 30 млн тCO<sub>2</sub>/рік у разі заміщення вугілля. Паралельно зменшуються ло-

Таблиця 1

## Базовий сценарій розгортання малих модульних станцій по роках

Рік	Сукупна потужність, ГВт	Річне введення, ГВт	Еквівалент модулів (300 МВт)
2030	0.3	0.3	1
2035	2.2	0.6	7
2040	5.6	1.0	19
2045	7.6	0.6	25
2050	8.4	0.2	28

Таблиця 2

Розрахунок уникнення викидів CO<sub>2</sub> за роками

Рік	Генерація, ТВт•год	Уникнені викиди, млн т CO <sub>2</sub> /рік
2030	10.4	9155.3
2035	28.5	25086.2
2040	49.9	43941.4
2045	61.3	53938.6
2050	64.9	57144.7

кальні забрудники (SO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub>/пил), водний слід і земельне навантаження завдяки компактності майданчиків.

Фазування розгортання враховує «ефект першого блока»: перший модуль найдорожчий і найдовший, наступні – швидше й дешевше через навчання та стандартизацію. Після виходу на серійність основним обмеженням стають мережеві вузли і резерви персоналу. Рисунки 1–2 демонструють S-динаміку розгортання; визначальні умови прискорення: гармонізація регуляторики, пільгові кредити/ЕКА та надійний ланцюг постачання.

«Кліматичний дивіденд» формується як добуток згенерованої низьковуглецевої енергії на різницю LCA-факторів між заміщеною та новою генерацією. Для вугілля (800–1100 кг CO<sub>2</sub>-екв/

МВт•год) і SMR (5–20) отримаємо 30+ млн т/рік уникнених викидів у 2050-му при 8,4 ГВт і CF≈90%. Паралельно зменшуються локальні забрудники (SO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub>/пил) і водний слід.

## Висновок

Малі модульні реактори визначено перспективною опорною технологією української енергетичної безпеки, які можуть замінити вугільні теплоелектростанції, здатні знизити системні витрати резервування відновлювальних джерел енергії, забезпечити комунальне та промислове тепло, а також гнучкість для електронасичених регіонів.

Серед екологічних переваг виділяють зменшення вуглецевого сліду, викидів CO<sub>2</sub> порівняно з тепловою генерацією, досягнення кліматичної

нейтральності економіки України. Водночас, залишаються дискусійними багато питань пов'язаних з визначенням локацій для розташування ММР, розрахунком зони впливу, управління радіоактивними відходами, оцінкою впливу на біологічне різноманіття та природні екологічні системи.

Екологічні переваги підтверджено в межах LCA: 5–20 кг CO<sub>2</sub>-екв/МВт·год, мінімальні локальні забрудники, компактний земельний і водний слід. Водночас необхідно завчасно планувати управління РАВ/ВЯП і фонди виведення з експлуатації з прозорими програмами моніторингу та участю громад.

Регуляторний блок має бути гармонізований із рекомендаціями МАГАТЕ (SSR-2/1, SSG-2, SSG-30) і практиками NRC/CSA/ONR, включно з ризик-інформованими підходами, взаємовизнанням серійних компонентів і інтеграцією ОВД (EIA).

#### Список використаних джерел

1. Малогулко Ю., Бандура І., Сліденко М. Дослідження використання малих модульних реакторів в Україні. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2023 № 329 (6). С. 394-399. DOI : [10.31891/2307-5732-2023-329-6-394-399](https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-329-6-394-399).
2. Барбашев С.В. Про впровадження технології малих модульних реакторів в Україні: проблеми, у т.ч. екологічні, та шляхи їх вирішення // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей XIX Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 14-15 вересня 2023 р.). Харків: УКРНДІЕП., 2023. С. 34-42.
3. Energoatom. Annual Report 2025. Kyiv: NNEGC Energoatom, 2024. <https://energoatom.com.ua/en/publicna-zvitnist>.
4. IEA. Power System Flexibility for the Energy Transition. Paris: IEA, 2025. <https://www.cdautomation.com/>
5. Soto G.N., Martinez-Cobas X. Nuclear energy generation's impact on the CO<sub>2</sub> emissions and ecological footprint among European Union countries. Science of The Total Environment 2024 Vol. 945. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173844>
6. IAEA. Status of Small Modular Reactors and Microreactors. Vienna: IAEA, 2023 <https://www.iaea.org/search/google?keys=> .
7. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» Верховна Рада України, 23.05.2017 № 2059-VIII URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2059-19>
8. Vinoya C. L., Ubando A. T., Culaba A. B. Life cycle analysis of a network of small modular reactors International Conference on Sustainable Energy and Green Technology. 2023 Sci. 1372. DOI : 10.1088/1755-1315/1372/1/012059
9. Забулонов Ю.Л. Перспективи впровадження малих модульних реакторів в Україні Вісн. НАН України, 2023, № 6. – С. 35-46. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2023.06.034>