



УДК 620.92:621.039.58:621.039.583

DOI <https://doi.org/10.32782/geotech2026.40.06>

**Верховцев В.Г., Деміхов Ю.М., Тищенко Ю.Є., Яценко В.Г.,
Борисова Н.М., Кравчук З.М.**

Верховцев В.Г., доктор геологічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділом, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», ORCID: 0000-0002-1015-6725, Verkhovtsev@ukr.net

Деміхов Ю.М., кандидат геолого-мінералогічних наук, старший науковий співробітник, завідувач лабораторії, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», ORCID: 0000-0002-3576-6570, y_demikhov@ukr.net

Тищенко Ю.Є., кандидат геологічних наук, старший науковий співробітник, завідувач лабораторії, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», ORCID: 0000-0002-0413-241X; IGNS_Tyshchenko@igns.gov.ua

Яценко В.Г., кандидат геолого-мінералогічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», ORCID: 0000-0003-3498-3466, vgyatsenko@gmail.com

Борисова Н.М., провідний інженер, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», ORCID: 0000-0002-7169-1430, IGNS_Borysova@nas.gov.ua

Кравчук З.М., провідний інженер, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», ORCID: 0000-0002-6093-488X, IGNS_Kravchuk@nas.gov.ua

МАЛІ МОДУЛЬНІ РЕАКТОРИ (ММР) У ПОВОЄННІЙ ВІДБУДОВІ УКРАЇНИ

За час війни, яка в Україні триває 13 років, значних ушкоджень зазнали її енергетичні об'єкти. Недостатня енергетична забезпеченість України може стає базовим обмежувачем темпів відбудови, в умовах дефіциту генерації електроенергії, вразливості централізованих об'єктів до військових загроз, тому в повоєнній відбудові однією з першочергових задач буде відновлення та заміщення втрачених енергогенеруючих потужностей. В останні десятиліття у світі прискореними темпами розвиваються технології, спрямовані на створення малих модульних реакторів III та III+ покоління. Ці технології мають ряд суттєвих переваг порівняно з традиційними «великими» енергоблоками. Так, малі модульні реактори вимагають нижчих початкових капіталів вкладень завдяки будівництву основних модульних конструкцій у заводських умовах, скороченням термінами підготовки промислових підприємств та інфраструктури; їх введення в дію шляхом поетапних інвестицій зменшує фінансові ризики; крім того, вони дозволяють досягати меншого впливу на навколишнє середовище на одиницю електроенергії. Всесвітній досвід використання малих модульних реакторів у морському флоті дозволив виділити основні причини аварійних ситуацій з ядерними енергетичними установками на морському флоті, які можуть бути актуальними і при використанні ММР. Основною вимогою до малих модульних реакторів є розробка підвищених функцій безпеки, що забезпечується меншою потужністю реакторів, використанням пасивних систем безпеки та нижчому тиску робочої зони. Пасивні системи використовують такі фізичні явища, як природна циркуляція, конвекція, гравітація та тиск, що дозволяє автоматично відключати критичні системи реактора при загрозі надзвичайної ситуації. Порівняння вартості, окупності та собівартості електроенергії для великої АЕС, відновлюваних джерел енергії, та кількох однакових малих модульних реакторів, показує, що найвигіднішими є останні. При впровадженні малих модульних реакторів Україна отримує зростання економіки та підвищення енергетичної безпеки, вигоду від створення робочих місць з можливостями місцевого розвитку, конкурентні ціни на енергію та самодостатні енергетичні системи, які також ідеально підходять для районів з обмеженими водними ресурсами та у сейсмічно активних територіях. Великі реактори ще доведуть залишатися основою енергетики, а малі реактори можуть бути гнучкою, інноваційною альтернативою швидкої відбудови України та для заміни викопного палива.

Ключові слова: Малі модульні реактори (ММР), висока маневреність, безпека АЕС, сейсмічна стійкість, SMR-160.

Вступ. Агресивна війна РФ в Україні, яка триває вже 12 років, спричинила масштабне руйнування енергетичної інфраструктури, включаючи теплову, та гідрогенерацію, а також розподільчих мереж. Найбільша в Європі Запорізька АЕС знаходиться під контролем ворога і її подальша доля наразі невідома. Внаслідок цих об'єктивних обставин з'явилась нагальна потреба у відновленні енергогенеруючого потенціалу включно

з побудовою нових енергоблоків атомних станцій. Існуюча на сьогодні недостатня енергетична забезпеченість України розглядається як базовий обмежувач темпів відбудови в умовах дефіциту маневрової генерації та вразливості централізованих об'єктів до військових загроз. Повоєнна відбудова України вимагатиме різкого зростання енергоспоживання на фоні руйнування значної частини генеруючих потужностей, фізичного та морального старіння ТЕС і частини енергоблоків АЕС, втрати маневрових потужностей, зростання ролі електрифікації транспорту, промисловості, теплопостачання.



Ця стаття відкритого доступу
за ліцензією CC BY-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Енергетична система України традиційно базується на АЕС, водночас більшість енергоблоків відпрацювали проектні терміни експлуатації, які однак, подовжуються, що хоча й цілком виправдано, але потребує оновлення потужностей. Рациональний підхід полягає у тому, щоб поступово замінювати потужності сучасними реакторними установками, значно досконалішими у порівнянні зі старими радянськими зразками.

Одним з перспективних напрямів є впровадження ММР, які поєднують сучасний дизайн, безпечність, модульність, нижчу вартість та менші терміни інсталяції, можливість розосередження розміщення та значно нижчі параметри впливу на довкілля і населення. ММР – новітня технологія III і III+ покоління ядерних реакторів, створена на основі реакторів третього покоління (у перспективі – четвертого), яка почала привертати до себе посилену увагу в останнє десятиліття і зараз стрімко розвивається.

Проблеми енергосистеми України

З радянських часів основою енергосистеми України є атомна генерація, яка є основним джерелом виробництва електроенергії (зараз її частка складає близько 50-55%). Теплові електростанції (ТЕС/ТЕЦ) забезпечували близько 29-37%, а частка відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), включаючи сонячну, вітрову та гідроенергетику, складала 12-15% (Електроенергетика України, 2026; Розвиток розподіленої генерації, 2026).

Під час війни енергосистема функціонує в умовах високих ризиків, фокусуючись на децентралізації та збільшенні імпорту з ЄС, який у січні 2026 р. досяг 2450 МВт. Щоб енергосистема України була стійкішою в умовах постійних російських атак, Уряд стимулює розбудову розподіленої генерації – системи виробництва і передачі електроенергії, яка налічує багато невеликих локальних енергооб'єктів, розташованих по всій Україні (Розвиток розподіленої генерації, 2026).

У значній кількості енергоблоків українських АЕС наближається закінчення термінів проектною та подовженої експлуатації. Три енергоблоки Південноукраїнської АЕС (ПАЕС) працюватимуть до 2033-2035 років, перший та другий блоки Рівненської АЕС (РАЕС) – до 2030-2031 року, а перший блок Хмельницької АЕС (ХАЕС) – до 2028 року (терміни експлуатації більшості з цих енергоблоків ймовірно будуть подовжені). Всі 6 блоків Запорізької АЕС (ЗАЕС) пройшли або готувалися до продовження експлуатаційних термінів, але зараз знаходяться під окупацією. Три енергоблоки, що залишилися, ввели в експлуатацію після того, як Україна здобула незалежність. У 1995 році – ЗАЕС-6, 2004 році – ХАЕС-2 і РАЕС-4. Їхні проектні терміни експлуатації ще не закінчилися.

Україна планує розпочати будівництво нових атомних енергоблоків на ХАЕС, РАЕС та ПАЕС для заміщення потужностей, які будуть виводитись з експлуатації. Проект передбачає використання сучасних західних технологій AP1000 компанії Westinghouse (Проект Плану діяльності уряду України, 2026).

Агресія РФ створила безпрецедентні виклики для безпеки АЕС в Україні, що потребує їх підвищеного захисту. Зокрема, є необхідність посилення фізичного захисту енергоблоків, кібербезпеки систем керування та впровадження резервних систем керування, а також незалежних джерел енергопостачання, автоматизованих систем контролю та комплексного моніторингу. Фізичний захист ядерних реакторів – це багаторівнева система, головним елементом якої є гермооболонки реакторів, що запобігають викиду радіації у разі внутрішньої аварії, а також у випадку зовнішніх подій, таких як землетруси, цунамі, урагани, смерчі, падіння літаків, вибухи, ракетні удари тощо (Nuclear containments, 2001).

В енергосистемі України відбулось руйнування значної частини генеруючих потужностей теплових (ТЕС/ТЕЦ) та гідроелектростанцій. Компенсація енергогенеруючих потужностей введенням в експлуатацію традиційних реакторних установок на існуючих АЕС фінансово складна, тривала (10-15 років), підвищує концентрацію ризиків.

Впровадження ММР може вирішити чи суттєво пом'якшити проблеми зростання попиту на електроенергію, дефіциту маневрових потужностей, фізичного старіння енергоблоків, розосередження енергогенерації, фізичного захисту станцій, пришвидшення та здешевлення нарощування генеруючих потужностей.

ММР як чинник повоєнної реконструкції системи енергогенерації

Крупні АЕС забезпечують високу потужність, стабільну генерацію базового навантаження та екологічність, виробляючи величезну кількість електроенергії з мінімальним вуглецевим слідом. Їхня тривала експлуатація, паливна ефективність та відсутність викидів CO₂ роблять їх надійним джерелом енергії. Традиційні (великі) реактори на 1000+ МВт електричної потужності (3000+ МВт теплової) забезпечують базову генерацію і в досяжній перспективі будуть залишатися основою енергетики у світі та в Україні, попри високу вартість, довготривалість будівництва та складність експлуатації.

Значно дешевші, швидші в будівництві та простіші в експлуатації ММР пропонують вищу безпеку, заводське виробництво, гнучкість у розміщенні і все більше привертають увагу як

перспективна інноваційна альтернатива швидкого розвитку енергетики для заміни викопного палива.

Україна, за деякими даними, планує введення в експлуатацію декількох ММР (Українська енергетика, 2026; Denetek впроваджуватиме приватні малі модульні ядерні реактори, 2023). Загалом, згідно із угодою (Енергоатом та Holtec International домовилися, 2023), в Україні потенційно має з'явитися до 20 реакторів SMR-160. Їх потужність складе 160 МВт, вони працюватимуть на низькозбагаченому урані, і матимуть можливості виробництва технологічного тепла для промислового застосування й виробництва водню.

Згідно з визначенням Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) (Lessons Learned in Regulating Small Modular Reactors, 2022), до малих реакторів належать реактори, які мають потужність ≤ 300 МВт, і складаються з модулів, які перед поставкою та монтажем на майданчику серійно виготовляються на заводі виробника. ММР призначені для виробництва електроенергії, технологічного тепла, опріснення води, генерації водню і розраховані на використання кількох модулів, залежних від однієї інфраструктури. Технології ММР, які розвиваються та вдосконалюються, можуть включати реактори з різними типами охолодження: водяним, високо-температурним газовим, рідкометалевим, розплавленими солями. ММР можуть бути наземними, підземними, підводними, або плавучими атомними електростанціями.

Блоки можуть бути виготовлені, а потім доставлені та встановлені на місці. ММР можуть встановлюватися як кожен окремо, так і у багатомодульному варіанті (при цьому експлуатується певна кількість однакових реакторів на спільному майданчику, які використовують спільну інфраструктуру, систему фізичного захисту, персонал тощо). Крім малих розмірів, порівняно з великими АЕС, що забезпечує гнучкість у виборі місць їх розміщення, ще однією перевагою ММР є їх модульна блочна конструкція. При поетапному введенні в експлуатацію установок на одному промайданчику (наприклад, діючих АЕС) це дозволяє поступово нарощувати потужність станції відповідно до зростання попиту на енергію та фінансових можливостей країни.

Однією з основних вимог до ММР є забезпечення підвищених функцій безпеки завдяки меншій потужності реакторів з використанням пасивних систем безпеки та нижчого тиску робочої (активної) зони. Пасивні системи використовують такі фізичні явища, як природна циркуляція, конвекція, гравітація та тиск, що дозволяє автоматично відключати критичні системи реактора

при загрозі надзвичайної ситуації; це означає, що втручання людини не потрібне, або зведене до розумного мінімуму (Rowinski та ін., 2015).

Порівняння чистої приведеної вартості, терміну окупності та приведеної собівартості електроенергії для трьох проєктів будівництва і експлуатації установок для виробництва електроенергії з метою декарбонізації енергетичного сектору (1 – традиційної АЕС з енергоблоками на легководних реакторах великої потужності, 2 – розгортання кількох ММР на багатьох модулях, 3 – майданчиків сонячних і вітрових електростанцій) (Milivojevic та ін., 2025) показує, що найвигіднішим проєктом є ММР, тоді як інвестиції в сонячні та вітрові електростанції обтяжені необхідними витратами на накопичувачі електроенергії і мають коротший термін експлуатації – 25 років порівняно з довгостроковою експлуатацією атомних електростанцій – 60 років і навіть більше.

Аналіз вартості будівництва та економічних характеристик (вартості виробленої електроенергії) показує паритет великих і малих реакторних установок: для AP1000 Westinhouse та NuScale – \$6000-15000/kWe, для ММР типу AP300 Westinhouse – \$6000-12000/kWe (Економічні питання впровадження малих модульних реакторів, 2024).

Позитивні аспекти впровадження ММР

Заводське серійне виробництво ММР на основі технологій ядерних реакторів III+ покоління забезпечує:

- надійність, ефективне відпрацювання, уніфікацію технологій виготовлення та кращий контроль якості;
- меншу потужність та простішу конструкцію, порівняно з енергоблоками АЕС, а також стандартизацію паливних елементів, що знижує аварійні ризики;
- відсутність чи меншу кількість активних систем безпеки, які потребують зовнішнього електроспоживання, їх автоматизацію та автономність;
- можливість зміни режиму виробництва електроенергії ММР – до повного зупину і повторного запуску при швидкому наборі потужності, що є важливим фактором безпеки. ММР мають високу експлуатаційну гнучкість, що дозволяє швидко регулювати потужність, реагуючи на зміну навантаження, і можуть часто перемикатися між виробництвом електроенергії та виробництвом тепла (Костюх, 2025; Park та ін., 2023; Choudhury, 2025). В Україні це може дозволити вирішити проблему вирівнювання балансу навантаження систем енергогенерації та енергоспоживання;
- можливість підземного/захищеного розміщення, що підвищує фізичний захист і безпеку експлуатації;

– менші витрати і коротші терміни виведення з експлуатації та ремедіації довкілля;

– тривалі терміни експлуатації, заявлені компаніями-виробниками, які коливаються від 20 до 100 років; окремі конструкції ММР створюються для одноразового завантаження палива при запуску (це, зокрема, суттєво полегшує проблему поводження з ВЯП).

Можливість вибору місць для розміщення ММР суттєво розширюється, що забезпечується 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 незрівнянні з потребами для енергоблоку АЕС тієї ж потужності.

Важливо, що більшість типів ММР не потребують витрат водних ресурсів, а потреби у воді ММР з водяним охолодженням порівняно незначні. Існують проєкти підземного розміщення модулів в комплексі зі сховищем відпрацьованого ядерного палива.

Перспективним виглядає застосування ММР в інших, крім виробництва електроенергії, галузях промисловості. Ряд компаній розробляє такі конструкції ММР, які дозволяють їх використання для виробництва тепла, в металургії, хімії, виробництві водню, що суттєво розширює потенційний попит у комунальній сфері та ряді галузей промисловості.

Основні переваги ММР

Крім уже згаданих переваг ММР, існують потенційні резерви розвитку цього класу ядерних реакторів, пов'язані з подальшим вдосконаленням технологій у атомній енергетиці та пошуком гнучких організаційних схем впровадження.

Один з найбільш перспективних напрямів з точки зору безпеки і простоти оперативного управління включає не лише серійне виробництво окремих модулів малих реакторів у заводських умовах, але й завантаження палива, пуско-налагоджувальні роботи і енергопуск на виробничих потужностях компанії-розробника з транспортуванням до країни-замовника, яка здійснює подальшу експлуатацію установки. Після завершення планового терміну експлуатації такий реактор повертається на завод, де виводиться з експлуатації і зупиняється. Після профілактики реактор може бути повторно завантажений паливом і повернутий власнику для подальшої експлуатації. По суті функції власника реактора – експлуатуючої організації – зводяться до дотримання правил безпеки та експлуатаційних регламентів, наданих виробником (Lessons Learned in Regulating Small Modular Reactors, 2022; Report on Manufacturability, Supply Chain Management and

Commissioning of SMRs, 2019). Така схема експлуатації ММР найбільш ефективна і доцільна у вигляді *nuclear ship* (ядерний корабель – плаваючий ММР).

Менші розміри, модульна конструкція, широкі експлуатаційні можливості ММР надають їм переваги з точки зору інтеграції в електро- та тепломережі.

Для вирішення проблеми збалансування споживання і генерації електроенергії застосовуються системи накопичення енергії (*energy storages*) (СНЕ). На сьогодні відомі наступні системи накопичення енергії: гідро- та повітря-акумуляуючі електростанції, хімічні акумулятори, маховики, акумулятори тепла і холоду, гравітаційні накопичувачі енергії, *power-to-gas*, системи зберігання енергії на основі перетворення енергії на газ (водень, біометан, синтез-газ тощо).

ММР також мають здатність працювати на змінних рівнях потужності (Josephs та ін., 2025) для вирівнювання пікових навантажень на енергосистему, які посилюватимуться внаслідок зростання долі генерації на відновлюваних джерелах енергії. Маневрування потужністю надійніше вирішується при об'єднанні реакторів у парк ММР. В такому випадку вихідна потужність і динамічна поведінка станції регулюється за рахунок компенсації величини потужності всіма блоками парку ММР (Лазуренко, Чалий, 2022). Маневреність парку з ММР – одна з найважливіших переваг, яка в Україні може дозволити вирішити проблему вирівнювання балансу навантаження систем енергогенерації та енергоспоживання.

Аналіз факторів впливу ММР на безпеку

На сьогодні неможливо враховувати ризики впливу ММР на безпеку довкілля у зв'язку з відсутністю значного досвіду у світі їх використання. ММР на суші поза військового використання тільки починають вводити в експлуатацію, або ще розробляють.

На морському флоті ММР використовують починаючи з 1954 р., коли було спущено на воду перший атомний підводний човен (АПЧ) «Наутилус». Сьогодні шість країн експлуатують ті чи інші види атомних стратегічних підводних човнів: Сполучені Штати, Велика Британія, Франція, РФ, Китай та Індія. Крім атомних підводних човнів ММР використовуються на надводних кораблях (Nuclear submarine, 2026; Нилсен та ін., 1996).

Для запобігання можливих негативних наслідків використання ММР був вивчений всесвітній досвід їх експлуатації у морському флоті. В результаті було виділено основні причини аварійних ситуацій з ядерними енергетичними установками (ЯЕУ) на морському флоті, які можуть бути актуальними і при використанні ММР. Кожна

аварія (катастрофа) має свої конкретні причини та винуватців. Однак можна виділити основні фактори, що визначають рівень аварійності: якість проектування, будівництва та експлуатації протягом терміну їхньої служби, а також професійний вишкіл експлуатаційників.

Загалом за весь час експлуатації ЯЕУ на морському флоті відбулось 16 аварій саме ядерних реакторів. Причому у США ніколи не було аварій з ЯЕУ – відбулось лише декілька подій з витоком низькорadioактивної рідини, під час яких люди отримували невеликі дози радіації (Нилсен та ін., 1996). В той час як всі катастрофічні аварії сталися на морському флоті СРСР/росії.

За весь час експлуатації атомних підводних човнів СРСР/росії сталося 10 ядерних аварій, з них:

- одна – при будівництві АПЧ в м. Нижній Новгород в 1970 році (К-320 класу Чарлі-І);
- дві – при перезарядках ядерного реактора (К-11 та К-431);
- одна – при ремонті атомної установки на заводі (К-140);
- одна – при виконанні модернізаційних робіт (К-222);
- чотири аварії – при роботі ЯЕУ на потужності під час знаходження АПЧ у морі;
- одна – при виведенні ЯЕУ з дії (розхождення) (К-314) (Нилсен та ін., 1996).

А загальна кількість подій з ЯЕУ на АПЧ СРСР/росії на період до 2000 р. склала 39. В доповіді (Нилсен та ін., 1996) виділено основні причини аварійних ситуацій з ЯЕУ на морському флоті СРСР/росії, які можуть бути актуальними і при використанні ММР:

1. Погана професійна підготовка персоналу.
2. Розмежування експлуатаційних, адміністративних та контролюючих організацій.
3. Розробка, виробництво та передача ЯЕУ до експлуатації повинні регламентуватися законом.

Саме невиконання цих умов призводило до аварійності на російських АПЧ (Нилсен та ін., 1996).

Кожна аварія (катастрофа) має свої конкретні причини та винуватців. Однак можна виділити три основні фактори, що визначають рівень аварійності ЯЕУ кораблів:

1. Якість проектування та будівництва.
2. Якість експлуатації протягом терміну їхньої служби.
3. Професійний вишкіл екіпажів та організація служби на кораблях.

Саме дотримання згаданих правил та вимог забезпечило високу безаварійність експлуатації ЯЕУ на морському флоті США та Великої

Британії (Nuclear submarine, 2026; Нилсен та ін., 1996).

Таким чином, використання ММР може супроводжуватись наступними проблемами:

- невирішеність проблеми ВЯП та відсутність остаточних технологічних рішень для довгострокового зберігання;
- проблеми з утилізацією (яскравий приклад — історична проблема дезактивації та утилізації ЯЕУ утилізованих морських суден);
- економічні прорахунки (часто на етапі проектування не враховуються у повній мірі витрати на довгостроковий фізичний захист під час експлуатації ММР);
- вразливість для терактів та зовнішніх військових загроз;
- можлива привабливість для терористів, які бажають отримати матеріал для ядерної зброї або «брудної» бомби, особливо за умови використання в окремих типах реакторів ядерного палива підвищеного чи високого збагачення.

Потенційні аварійні ситуації на ММР різних конструкцій

Аналіз можливих аварійних ситуацій є критично важливим для оцінки безпеки ММР. На відміну від великих АЕС, різноманітність конструкцій ММР зумовлює відмінні аварійні сценарії, залежні від типу теплоносія, потужності та системи безпеки (IAEA. Safety of Nuclear Power Plants, 2016; IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2022). Розглянемо основні типи ММР та притаманні їм аварійні ризики.

Найбільш поширений клас ММР – інтегральні реактори з водою під тиском (iPWR), до якого належить SMR-160 (Holtec), NuScale, AP300 (Westinghouse). До основних аварійних сценаріїв для iPWR належать:

1. Аварія з втратою теплоносія (LOCA – Loss of Coolant Accident) – виникає при розриві першого контуру. Однак в інтегральній конструкції всі компоненти першого контуру розміщені в єдиному корпусі реактора, що суттєво зменшує ймовірність великого LOCA порівняно з традиційними АЕС (OECD/NEA, 2021; IEA, 2022).

2. Аварія при знеструмленні (SBO – Station Blackout) – повне припинення зовнішнього і резервного електропостачання. Для iPWR цей сценарій є найменш критичним завдяки пасивним системам аварійного охолодження на основі природної циркуляції (OECD/NEA, 2021; Lucid Strategy Group, 2016).

3. Аварії з реактивністю – неконтрольоване підвищення потужності реактора. Ці ризики мінімізовані завдяки природній циркуляції та

відсутності циркуляційних насосів першого контуру (Yi, Liu, 2020).

4. Аварії при перевантаженні та зберіганні ВЯП – підземне сухе сховище ВЯП SMR-160 з терміном служби 120 років суттєво знижує ці ризики (Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2022; NuScale Power, 2020).

До реакторів на газовому охолодженні (HTGR) належать, зокрема, китайський HTR-PM (введений в комерційну експлуатацію у 2023 р.) та канадський USNC Micro-Modular Reactor. Ключова особливість їхньої безпеки – паливо у вигляді тривально-стійких керамічних кульок TRISO, здатних витримувати температуру до 1620°C, що забезпечує так звану «пасивну безпеку» без будь-якого активного охолодження (Ingersoll, Carelli, 2021). Аварійні сценарії HTGR включають:

1. Аварія з надходженням повітря або води до активної зони – виникає ризик окислення графітового сповільнювача з можливим загоранням. Попередження аварії забезпечується герметичними бар'єрами та інертною атмосферою.

2. Нагрів активної зони при відключенні охолодження – завдяки дуже малій потужності та великій теплоємності графіту максимальна температура не перевищує меж цілісності TRISO-палива навіть у разі повної відмови системи охолодження (Ingersoll, Carelli, 2021).

3. Вивільнення пилу активної зони – специфічна проблема газоохолоджуваних реакторів із гальковим паливом.

Реактори на розплавлених солях (MSR) – наприклад, канадський Terrestrial Energy IMSR або американський Kairos Power KP-FHR. Ключова особливість безпеки – рідке паливо не потребує перевантаження в звичайному розумінні, а аварійна система «заморожуючої пробки» автоматично дренує розплав солі в пасивно охолоджуване сховище при будь-якій аварії (Simpson, Magruder, 2022). Аварійні сценарії MSR включають:

1. Витік розплавленої солі – висока точка плавлення (близько 450°C) означає, що при витоку сіль швидко застигає, запобігаючи подальшому поширенню радіонуклідів.

2. Хімічна реакція теплоносія з водою чи повітрям – вимагає ретельного проектування вторинного контуру та системи вентиляції.

3. Корозійна активність солі – потребує застосування спеціальних нікелевих сплавів і регулярного моніторингу конструкцій (Liu та ін., 2021).

Реактори на рідких металах (LMFR) – такі як натрієвоохолоджувані швидкі реактори (SFR). Аварійні сценарії при використанні рідкого натрію як теплоносія:

1. Пожежа натрію – натрій хімічно активно реагує з водою і повітрям, що є головним аварійним ризиком. Проблема усувається створенням інертної атмосфери аргону та ретельним проектуванням подвійних стінок парогенераторів (Boarin та ін., 2012).

2. Аварія з реактивністю при закипанні теплоносія – виникає при перевищенні температури кипіння натрію. У сучасних конструкціях цей ризик мінімізується або повністю усувається завдяки забезпеченню від'ємного парового (пустотного) коефіцієнта реактивності (Boarin та ін., 2012).

Киплячі реактори підвищеної безпеки (BWRX-300) від GE Hitachi використовують воду як теплоносію та сповільнювач, але у спрощеній конструкції з пасивними системами безпеки. Основна вразливість таких систем – генерація водню при взаємодії перегрітої пари з цирконієвими оболонками ТВЕЛів у разі закипання або осушення активної зони (аналог аварії на АЕС Фукусіма-1). У BWRX-300 ця проблема вирішена інтеграцією пасивних автокаталітичних рекомбінаторів водню та значно меншим загальним об'ємом активної зони (Sabharwall та ін., 2011; Westinghouse Electric Company, 2011).

Загальний висновок з порівняльного аналізу аварійних сценаріїв: ММР типу iPWR на сьогодні мають найбільш розвинену доказову базу безпеки, підтверджену тривалими регуляторними процедурами у США та ЄС. Усі розглянуті сучасні проекти ММР значно перевершують реакторні установки попередніх поколінь за рівнем пасивної безпеки та зменшенням необхідних зон аварійного планування (ЗАП), що відкриває можливість для їх розміщення поблизу безпосередніх споживачів енергії (IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2022; Huang, 2021; Rowinski та ін., 2015).

Окрему увагу під час розгортання таких об'єктів слід приділити кіберзахисту систем управління ММР, адже глибока цифровізація та автоматизація систем контролю суттєво підвищують ефективність роботи, але водночас створюють додаткові ризики цілеспрямованих кіберінцидентів (Ukrvodnyi Kadastr, 2022).

Реактори SMR-160, як приклад сучасного ММР

Як відзначалось вище, на даний час укладено угоду про будівництво в Україні 20 ядерних реакторів SMR-160 компанії Holtec International (Енергоатом та Holtec International домовилися, 2023). SMR-160 – це ММР з легкою водою під тиском, який генерує 160 MWe (525 MWth). Тривалість паливного циклу становить до 24 місяців. В реакторі використовується низькозбагачений уран.

SMR-160 працює на природній циркуляції теплоносія, що усуває необхідність використання насосів теплоносія під час нормальної роботи реактора (Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2022).

Однією із переваг у компанії Holtec вважають рівень безпеки «*Walk away safe*» – це означає, що в разі аварії, яка виникла з будь-яких причин (в тому числі внаслідок диверсії або теракту), реактор швидко скине потужність і перейде в безпечний стан без втручання людини (Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2022).

На відміну від сучасних діючих установок, SMR-160 спроектований таким чином, що вся охолоджуюча вода, необхідна для безпечного відключення станції навіть за найсерйозніших сценаріїв аварії, є невід'ємною частиною установки та надійно розташована для запобігання перегріванню реактора. Системи безпеки станції, які отримують доступ до запасу охолоджуючої води SMR-160, є пасивними, тобто вони працюють під дією сили тяжіння, щоб забезпечити відвід відпрацьованого тепла, що утворюється внаслідок роботи реактора. Коротше кажучи, безпека SMR-160 є пасивною та є невід'ємною частиною його дизайну. Вважається, що проєкт SMR-160 входить до числа найбільш безпечних у світі, тому що для своєї експлуатації він не покладається ні на насоси, ні на двигуни.

Згідно із проєктом, розміщення реактора підземне, на позначці -14 метрів. Також нижче рівня землі розташовується сухе сховище ВЯП з терміном служби до 120 років. Проєктний термін експлуатації такого реактора становить 80-100 років, а терміни будівництва – 2-3 роки.

Вказані особливості SMR-160 (природна циркуляція теплоносія, безпечність та підземне розміщення) роблять даний тип ММР одним з найбільш перспективних для впровадження в Україні.

Просторове розміщення ММР

Згідно з розробками Інституту стратегічних досліджень, за довоєнними даними Україну можна умовно поділити на регіони: з суттєвим енергозабезпеченням; з меншим енергозабезпеченням; з незначним енергозабезпеченням (Статистичний щорічник України за 2018 рік, 2019; Турбіна, 2019). Військова агресія РФ внесла свої жорсткі корективи: значна кількість електростанцій зазнала пошкоджень або повного руйнування. Тому наразі доцільно вважати всю територію України регіоном із незначним рівнем енергозабезпечення (Верховцев та ін., 2024). Логічним видається розміщення ММР, в першу чергу, в регіонах із розвинутою промисловістю для найшвидшого відновлення економіки.

Можливість вибору місць для розгортання ММР суттєво розширюється. Це забезпечується як вищою надійністю та безпечністю модульних установок, так і тим, що потреби у землевідведенні для одного модуля є мінімальними. При розміщенні «куща» реакторів ці потреби зростають, проте вони залишаються неспівмірними з відведенням територій під традиційні енергоблоки великої потужності.

Використання води є проблемою, яка лише посилюватиметься у майбутньому. Атомні станції мають високі вимоги до забору води, і базові виклики з водозабезпечення є однаковими як для ММР з водяним охолодженням, так і для енергоблоків традиційних АЕС. Проте, згідно з даними розробників, один ММР потребує значно менше води при експлуатації порівняно з великими АЕС, тому вибір майданчиків для них є суттєво ширшим.

Тим не менш, один реактор потужністю 300 МВт, що працює з 90-відсотковим коефіцієнтом потужності, щодня забирає від 605 до 1476 мільйонів літрів води, нагріваючи її перед скиданням. Зменшення цієї потреби можливе за рахунок впровадження повітряного охолодження шляхом будівництва сухих градирень та/або бризкальних басейнів (Макхіджані, Рамана, 2026).

Важливо відзначити, що МАГАТЕ розробило спеціальну методологію оцінки водних ресурсів для розміщення ядерних установок (Верховцев та ін., 2023), яка враховує не лише поточну доступність, а й прогнози зміни клімату та сезонні коливання водності. Для України, зважаючи на тенденцію до зниження стоку річок у посушливих регіонах Півдня і Сходу, застосування ММР із повітряним або гібридним охолодженням може стати пріоритетним рішенням (World Nuclear Association, 2026; Vujic та ін., 2012).

При виборі типів ММР та площ, придатних для їх розміщення на території України, необхідно виходити з таких ключових критеріїв:

- економічна обґрунтованість та доцільність розгортання ММР на конкретних локаціях;
- гарантований доступ до водних ресурсів, зручне логістичне розташування та безпосередня близькість до магістральних електричних мереж;
- наявність кваліфікованих трудових ресурсів;
- потреба у створенні нових робочих місць та розвитку соціальної сфери району;
- сейсмічна активність території;
- забезпечення першочергових потреб енергетичного постачання комунальної сфери та відновлюваної промисловості в умовах повоєнної відбудови.

За часів СРСР розглядалося будівництво Чигиринської АЕС, Харківської АТЕЦ, Одеської АТЕЦ

та Кримської АЕС (Недобудовані радянські АЕС, 2026). Оскільки зведення об'єктів у цих регіонах свого часу мало під собою ґрунтовні розрахунки, доцільно розглянути згадані площі як потенційні майданчики для ММР. Також перспективними є райони вздовж басейнів річок Дніпро, Дністер, Південний Буг, Десна, Псел, Сіверський Донець та їхніх приток, а також території на узбережжі морів.

Розміщення ММР було б дуже доцільним в енергодефіцитних західних областях України замість будівництва каскаду Верхньодністровських гідроелектростанцій, схваленого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 13.07.2016 №552-р (Програма розвитку гідроенергетики на період до 2026 року, 2016). Оскільки західний регіон характеризується підвищеною сейсмічною активністю, зведення більш сейсмостійких ММР є раціональною альтернативою ГЕС.

Зокрема, блоки ММР NuScale Power (США) завдяки своїм конструкційним особливостям спроєктовані з високим запасом стійкості до сейсмічних навантажень. Дослідники погоджуються, що ММР суттєво знижують загрозу ядерних інцидентів під час землетрусів. Підземна захисна оболонка ефективно захищає блоки від стихійних лих. Прискіпливе дослідження сейсмічної оцінки малих реакторів NuScale Power для руйнівного землетрусу магнітудою 8,8 у Чилі (Markou, Genco, 2018) підтвердило, що конструкція здатна без ушкоджень витримувати екстремальні сейсмічні коливання завдяки специфіці архітектури та заглибленню ММР на 25 метрів.

З огляду на те, що загроза тероризму та військових ударів по критичній інфраструктурі зберігається, підземне розташування, потужна верхня бетонна плита перекриття та антисейсмічна конструкція ММР стають надійним захистом від прямих влучань, вибухових хвиль або авіакатастроф.

Екологічність ММР

Потенційно широке впровадження ММР дає реальну можливість вирішити низку екологічних проблем та суттєво знизити споживання природних ресурсів як у межах кожної окремо взятої країни, так і у планетарному масштабі.

Дослідження показали, що ММР можуть досягти меншого впливу на навколишнє середовище на одиницю виробленої електроенергії порівняно з традиційними великими реакторами завдяки кільком конкретним механізмам. У роботі (Carless та ін., 2016) продемонстрована ця перевага шляхом аналізу кількох факторів:

- підвищена ефективність використання ресурсів завдяки оптимізованим виробничим процесам у заводських умовах;

- зниження потреб у будівельних матеріалах на МВт потужності завдяки модульній конструкції та стандартизації;

- покращені коефіцієнти використання потужності завдяки коротшим перервам на перезарядку палива (або її повній відсутності в окремих типах реакторів) та поетапним графікам технічного обслуговування в багатомодульних установках.

Вдосконалені конструкції ММР покоління III+ включають функції, які можуть зменшити утворення ядерних відходів на кВт-год, зокрема ВЯП із високим залишком радіоактивності та підвищеною нейтронною ефективністю (Josephs та ін., 2025). Наприклад, деякі конструкції ММР досягають швидкості вигорання до 60-70 ГВт-д/MTU порівняно з 45-50 ГВт-д/MTU у традиційних великих реакторах, що призводить до більш ефективного використання палива та меншої кількості високоактивних відходів на одиницю виробленої енергії (Josephs та ін., 2025).

Проте екологічні профілі можуть різнитися залежно від конструктивних особливостей конкретного проєкту, таких як тип теплоносія, рівень збагачення палива та специфічні для обраного майданчика фактори довкілля.

Правові аспекти застосування ММР

Забезпечення країни електроенергією є одним із найважливіших завдань на початку мирної відбудови України. ММР невеликої потужності будуть спроможні ефективно вирішити потреби як в електроенергії, так і в теплі.

Перешкодою для широкого впровадження ММР в Україні на даний час залишається певна недосконалість законодавчої та нормативної бази, а також невизначена суспільна позиція, насторожене ставлення «зеленої» громадськості і потенційна негативна реакція з боку місцевих громад. На сьогоднішній день це важлива проблема, яка може бути поступово вирішена шляхом аналізу та урахування досвіду реалізації пілотних проєктів, які виконують провідні світові компанії-розробники ММР. Підготовка та імплементація відповідної національної нормативно-правової бази є ключовою умовою впровадження ММР в Україні.

Для прискорення вирішення існуючих правових проблем, які можуть загальмувати цей процес, необхідне прийняття Кабінетом Міністрів та Верховною Радою відповідних законодавчих актів, які б чітко регламентували умови впровадження, розміщення та використання ММР. В цілому, розміщення ММР поблизу міст для задоволення комунальних і виробничих потреб є перспективним напрямом діяльності, який потребує детального правового унормування.

Впровадження ММР в Україні доцільно розпочинати шляхом прийняття політичного рішення щодо поетапної імплементації кількох пілотних проєктів, що дозволить отримати необхідний практичний досвід для підготовки наступних масштабних рішень.

Деякі великі компанії оголосили про свою зацікавленість у впровадженні ММР у виробничі процеси ще до початку активної фази війни. Очевидно, великий бізнес добре розуміє переваги і вигоди цієї технології, яка спроможна забезпечити фактичну енергонезалежність великих підприємств-енергоспоживачів.

Так, Енергетичний холдинг ДТЕК розглядає використання технології ММР як стратегічний напрямок розвитку компанії. Компанія ретельно досліджує технологію ММР, створює робочі групи з її вивчення та проводить переговори з ключовими розробниками, зокрема з *Holtec International*. Крім того, у Верховній Раді зареєстрований законопроект, який відкриває юридичні можливості приватним компаніям здійснювати експлуатацію ММР в Україні (Законопроект про діяльність у сфері використання ядерної енергії, 2026).

ММР можуть бути високоефективними в галузях, які потребують значних витрат електроенергії та/або високотемпературного тепла: металургії; хімічній промисловості, установках з декарбонізації та промислового виробництва водню. комплексів з опріснення морської води.

У питанні використання ММР для обслуговування безпосередніх потреб промислових підприємств ініціатива належить державному чи приватному інвестору. Роль держави, таким чином, повинна знаходитись виключно у площині суворого нормування, ліцензування та правового регулювання, яке має бути забезпечене аналогічним чином, як і для комунальних підприємств.

Висновки. Аналіз позитивних аспектів та особливостей впровадження ММР в Україні на етапі повоєнної відбудови народного господарства і комунальної сфери, які вже зараз потребують різкого нарощування обсягів енергогенерації, показує, що в досяжній перспективі не існує раціональних альтернатив ядерній енергетиці. Сценарії розвитку її потужностей передбачають будівництво великих енергоблоків нового покоління, або більш швидке впровадження сучасних ММР.

Оскільки ММР потребує менших стартових капіталовкладень і менших термінів будівництва, а також мають інші переваги, описані у даній статті, вони можуть стати важливим інструментом пришвидшеного відновлення енергетичної інфраструктури України.

В подальшому великі АЕС, при цьому, залишатимуться основою базової енергогенерації, тоді як ММР буде доцільно використовувати як інструмент розподіленої, маневрової та регіональної генерації.

Ключові переваги ММР – безпека, модульність, децентралізація, масштабованість, менші потреби в природних ресурсах (воді) – можуть бути розкриті шляхом поетапного впровадження через пілотні проєкти з паралельним доповненням вітчизняної нормативної бази, що дозволить знизити ймовірність помилкових рішень у подальшому.

Таким чином ММР повинні стати стратегічним доповненням нової архітектури енергетичної безпеки України.

Література

1. Електроенергетика України // Wikipedia : вебсайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Електроенергетика_України (дата звернення: 15.04.2026).
2. Розвиток розподіленої генерації // Міністерство енергетики України : вебсайт. URL: <https://mev.gov.ua/reforma/rozvytok-rozpodilenoji-heneratsiyi> (дата звернення: 15.04.2026).
3. Проєкт Плану діяльності уряду України. URL: https://priorities.gov.ua/wp-content/uploads/2025/08/pro%D1%94kt_programi_dij_uryadu_strategichni_inicijativi.pdf (дата звернення: 15.04.2026).
4. Nuclear containments: state-of-art report. September 2001. 130 p. DOI: <https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0013>. URL: <https://shop.fib-international.org/publications/fib-bulletins/157-nuclear-containments-pdf> (date of access: 15.04.2026).
5. Українська енергетика. Енергоатом і Holtec домовилися про виробництво в Україні компонентів ММР. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/enerhoatom-i-holtec-domovylysia-pro-vyrobnystvo-v-ukraini-komponentiv-mmr> (дата звернення: 15.04.2026).
6. Denetek впроваджуватиме приватні малі модульні ядерні реактори в Україні на ТЕС ДТЕКа // Інфоатом. URL: <https://infoatom.news/2023/10/06/061020231123> (дата звернення: 15.04.2026).
7. Енергоатом та Holtec International домовилися про будівництво в Україні до 20-ти атомних енергоблоків з реакторами SMR-160 // Національна комісія з радіаційного захисту населення України. URL: <https://nkrzu.gov.ua/dial/nov/1800-enerhoatom-ta-holtec-international-domovylysia-pro-budivnytstvo-v-ukraini-do-20-ty-atomnykh-enerhoblokov-z-reaktoramy-smr-160> (дата звернення: 15.04.2026).
8. Lessons Learned in Regulating Small Modular Reactors: Challenges, Resolutions and Insights. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022. 508 p. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-2003web.pdf> (date of access: 15.04.2026).
9. Small and Medium Sized Reactors (SMR): A Review of Technology // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 44. P. 643–656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.006>.
10. Milivojevic S., Petrovic M. M., Stevanovic V. D., Riznic J., Lazarevic M. Techno-Economic Comparison of a Large-Scale Nuclear Power Plant, Small Modular Reactors, and Wind and Solar Power Plant Deployment // Energies. 2025. Vol. 18, № 9. P. 2355. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092355>.
11. Економічні питання впровадження малих модульних реакторів в Україні як конкурентної технології щодо сонячної енергетики // Економіка і управління. 2024. № 3. С. 76–82. DOI: <https://doi.org/10.36919/2312-7872.3.2024.76>.

12. Костюх А. Презентація «Проекту Закону України про внесення змін до деяких законів України щодо засад впровадження малих модульних реакторів в Україні» від 09.10.2025. URL: <https://kompek.rada.gov.ua/uploads/documents/31396.pdf> (дата звернення: 15.04.2026).
13. Park K., Park T., Zee S. K., Koo B. S. Control rod driven long-term load-follow operation in small modular reactor // *Annals of Nuclear Energy*. 2023. Vol. 182. Art. 109620. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109620>.
14. Choudhury S. Harnessing the Flexibility of Small Modular Reactors (SMRs): Physics-Informed Approach. Seminar, 2025. URL: <https://mae.ucsd.edu/seminar/2025/harnessing-flexibility-small-modular-reactors-smrs-physics-informed-approach> (date of access: 15.04.2026).
15. Перший у світі HTR-PM розпочинає комерційну експлуатацію. URL: https://en.cnn.com.cn/ru/2023-12/07/c_1023364.htm (дата звернення: 15.04.2026).
16. Плавуча АЕС «Академік Ломоносов» // Wikipedia : вебсайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Плавуча_АЕС_«Академік_Ломоносов» (дата звернення: 15.04.2026).
17. Nuclear submarine // Wikipedia : website. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_submarine#United_States_Navy (date of access: 15.04.2026).
18. Нилсен Т., Кудрик И., Никитин А. Северный флот. Потенциальный риск радиоактивного загрязнения региона. Доклад Международного экологического объединения «Беллона». 1996. № 2. 223 с. URL: <https://network.bellona.org/content/uploads/sites/4/2015/07/sevflot.pdf> (дата звернення: 15.04.2026).
19. Josephs R. E., Yap T., Alamooti M., Omojiba T., Benarbia A., Tomomewo O., Ouadi H. Regulation of Small Modular Reactors (SMRs): Innovative Strategies and Economic Insights // *Eng. 2025*. Vol. 6, № 4. P. 61. DOI: <https://doi.org/10.3390/eng6040061>.
20. Small modular reactor // Wikipedia : website. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Small_modular_reactor (date of access: 15.04.2026).
21. Report on Manufacturability, Supply Chain Management and Commissioning of SMRs. SMR RF – MCO Working Group. 15 December 2019. 32 p. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/19/12/smr_rf_mco_interim_report.pdf (date of access: 15.04.2026).
22. International Conference on Small Modular Reactors and Their Applications 2024 // International Atomic Energy Agency : website. URL: <https://www.iaea.org/events/smr2024> (date of access: 04.08.2024).
23. Лазуренко О. П., Чалий О. О. Стратегія розвитку енергосистеми України та місце в ній малих модульних реакторів // *Енергозбереження, енергетика, энергоаудит*. 2022. № 9–10(175–176). DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.09.01>.
24. Погодинні обсяги споживання електричної енергії побутовими споживачами за грудень 2021 року у Києві. URL: https://static.yasno.ua/assets/assets/KEP_Faktichni_obsyagi_prodazhu_elektrichnoyi_energiyi_pobutovim_spozhyvacham_za_gruden_2021_roku_8176084f62.pdf (дата звернення: 15.04.2026).
25. Пікові потреби // Wikipedia : вебсайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Пікові_потреби (дата звернення: 15.04.2026).
26. Boarin S., Mancini M., Ricotti M., Locatelli G. Economics and Financing of Small Modular Reactors (SMRs) // *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors* / ed. by D. T. Ingersoll, M. D. Carelli. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2021. P. 241–278.
27. Sam R., Sainati T., Hanson B., Kay R. Licensing Small Modular Reactors: A State-of-the-Art Review of the Challenges and Barriers // *Progress in Nuclear Energy*. 2023. Vol. 164. Art. 104859.
28. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. Part One: Water-Cooled SMR. IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2022. 144 p. URL: http://ascentrust.com/SMR/pdf/1-SMR_IAEA-Part-One.pdf (date of access: 15.04.2026).
29. Макхиджани А., Рамана М. В. Чому малі модульні ядерні реактори не допоможуть протистояти кліматичній кризі. URL: <https://atom.org.ua/?p=3236> (дата звернення: 15.04.2026).
30. Недобудовані радянські АЕС // Wikipedia : вебсайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Недобудовані_радянські_АЕС (дата звернення: 15.04.2026).
31. Програма розвитку гідроенергетики на період до 2026 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України № 552-р від 13.07.2016. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/552-2016-%D1%80/print> (дата звернення: 15.04.2026).
32. Ухвала суду № 127309328 від 13.05.2025, Тячівський районний суд Закарпатської області. URL: <https://youcontrol.com.ua/catalog/court-document/127309328/> (дата звернення: 15.04.2026).
33. Markou G., Genco F. Seismic Assessment of Small Modular Reactors: NuScale Case Study for the 8.8 Mw Earthquake in Chile // *Nuclear Engineering and Design*. 2018. Vol. 342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.12.002>.
34. Статистичний щорічник України за 2018 рік. URL: https://ukrstat.org/uk/druk/publicat/kat_u/2019/zb/11/zb_yearbook_2018.pdf (дата звернення: 15.04.2026).
35. Турбіна О. І. Актуальні проблеми економіки. 2019. № 10(220). С. 32–40. DOI: <https://doi.org/10.32752/1993-6788-2019-1-220-32-40>. URL: https://economicscience.net/archive/2019/APE-10-2019/10.19_topic_Turbina%20O.I.pdf (дата звернення: 15.04.2026).
36. Верховцев В., Деміхов Ю., Забулонов Ю., Тищенко Ю. Розробка критеріїв та рекомендацій щодо вибору площ, потенційно придатних для розміщення малих модульних ядерних реакторів на території України // *Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища : матеріали IX Міжнародної конференції INUDECО 24, 24–26 квітня 2024 р. С. 25–36. URL: https://inudeco.pro/wp-content/uploads/2024/09/inudeco-2024-electronic_collection.pdf* (дата звернення: 15.04.2026).
37. У Комітеті з питань енергетики та житлово-комунальних послуг опрацьовується законопроект про малі модульні реактори // Прес-служба Апарату Верховної Ради України. URL: <https://www.rada.gov.ua/print/267644.html> (дата звернення: 15.04.2026).
38. Carless T. S., Griffin W. M., Fischbeck P. S. The Environmental Competitiveness of Small Modular Reactors: A Life Cycle Study // *Energy*. 2016. Vol. 114. P. 84–99.
39. Верховцев В., Деміхов Ю., Забулонов Ю., Тищенко Ю. Концептуальні засади впровадження малих модульних реакторів в Україні // *Збірник матеріалів Восьмої Міжнародної конференції «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища» (INUDECО 23). 27–28 квітня 2023, м. Славутич. С. 22–33. Чернівці: НУ «Чернігівська політехніка», 2023. ISBN 978-617-7932-51-1*
40. IAEA. Safety of Nuclear Power Plants: Design. Specific Safety Requirements No. SSR-2/1 (Rev.1). Vienna: IAEA, 2016. 72 p. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1679_web.pdf (дата звернення: 15.04.2026).
41. IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. 2022 Edition. Vienna: IAEA, 2022. https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2022.pdf (дата звернення: 15.04.2026).
42. OECD/NEA. Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities. OECD Publishing, Paris, 2021. NEA No. 7560. https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_57979 (дата звернення: 15.04.2026).
43. IEA. Nuclear Power and Secure Energy Transitions. Paris: IEA, 2022. <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-and-secure-energy-transitions> (дата звернення: 15.04.2026).
44. Lucid Strategy Group. SMR Techno-Economic Assessment: Project 3 – SMRs Compared to Other Low Carbon Generation. UK Dept of Energy & Climate Change, 2016. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a80b38de5274a2e87dc2bd1/TEA_SMR_C3_Final_0.pdf (дата звернення: 15.04.2026).

45. Yi S.J., Liu X.J. Accident Analysis of the Molten Salt Reactor Under Multiple Failure Scenarios. *Energy Conversion and Management* 2020, 217, 113017. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113017 (дата звернення: 15.04.2026).
46. NuScale Power. NuScale Power Module Safety. Technical Bulletin TB-0905-16694. 2020. <https://www.nuscalepower.com/en/technology/nuclear-power-plant-design/safety> (дата звернення: 15.04.2026).
47. Ingersoll D.T., Carelli M.D. (Eds.) Handbook of Small Modular Nuclear Reactors. 2nd ed. Woodhead Publishing, 2021. 640 p. ISBN 978-0-12-823916-3 (дата звернення: 15.04.2026).
48. Simpson J.C., Magruder C.H. Defense in Depth Application in Small Modular Reactors: Sufficiency and Scalability. *Trans. Am. Nucl. Soc.* 2022, 127, 251-253. <https://www.ans.org> (дата звернення: 15.04.2026).
49. Liu S. et al. Seismic fragility analysis of nuclear power plant structures using the support vector machine. *Nuclear Engineering and Technology* 2021, 53(11), 3722-3731. DOI: 10.1016/j.net.2021.05.037 (дата звернення: 15.04.2026).
50. Boarin S., Locatelli G., Mancini M., Ricotti M. Financial case studies on small- and medium-size modular reactors. *Nuclear Technology* 2012, 178(2), 218-232. DOI: 10.13182/NT12-11 (дата звернення: 15.04.2026).
51. Sabharwall P. et al. Process Heat Exchanger Options for Fluoride Salt-Cooled High Temperature Reactor. Idaho National Laboratory. INL/EXT-11-21584. 2011. <https://indigitalibrary.inl.gov/sites/sti/sti/5116361.pdf> (дата звернення: 15.04.2026).
52. Westinghouse Electric Company. AP1000 Design Control Document. Rev.19. NRC Docket No. 52-006. 2011. <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/large-lwr/ap1000.html> (дата звернення: 15.04.2026).
53. Huang T.H. Safety Analysis of Loss-of-Coolant Accident for Small Modular Reactor With Passive Safety System. *Annals of Nuclear Energy* 2021, 150, 107821. DOI: 10.1016/j.anucene.2020.107821 (дата звернення: 15.04.2026).
54. Rowinski M.K., White T.J., Zhao J. Small and Medium sized Reactors (SMR): A review of technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015, 44, 643-656. DOI: 10.1016/j.rser.2015.01.006 (дата звернення: 15.04.2026).
55. Ukrvodnyi Kadastro. Natsionalna dopovid pro stan vodopostachannia, vodovidvedennia ta ochistky stichnykh vod v Ukraini. Derzhavne ahentstvo vodnykh resursiv Ukrainy. 2022. <https://www.davr.gov.ua> (дата звернення: 15.04.2026).
56. World Nuclear Association (WNA). Nuclear Power and Water. Information Library. <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-and-water.aspx> (дата звернення: 15.04.2026).
57. Vujic J., Bergmann R.M., Skoda R., Miletic M. Small modular reactors: Simpler, safer, cheaper? *Energy* 2012, 45(1), 288-295. DOI: 10.1016/j.energy.2012.01.078 (дата звернення: 15.04.2026).
6. Denetek vprovadzhuvatyme pryvatni mali modulni yaderni reaktory v Ukraini na TES DTEKa // Infoatom. URL: <https://infoatom.news/2023/10/06/061020231123> (date of access: 15.04.2026).
7. Enerhoatom ta Holtec International domovylysia pro budivnytstvo v Ukraini do 20-ty atomnykh enerhobloktiv z reaktoramy SMR-160 // Natsionalna komisiia z radiatsiinoho zakhystu naselennia Ukrainy. URL: <https://nkrzu.gov.ua/dial/nov/1800-enerhoatom-ta-holtec-international-domovylysia-pro-budivnytstvo-v-ukraini-do-20-ty-atomykh-enerhobloktiv-z-reaktoramy-smr-160> (date of access: 15.04.2026).
8. Lessons Learned in Regulating Small Modular Reactors: Challenges, Resolutions and Insights. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022. 508 p. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-2003web.pdf> (date of access: 15.04.2026).
9. Small and Medium Sized Reactors (SMR): A Review of Technology // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 44. P. 643–656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.006>.
10. Milivojevic S., Petrovic M. M., Stevanovic V. D., Riznic J., Lazarevic M. Techno-Economic Comparison of a Large-Scale Nuclear Power Plant, Small Modular Reactors, and Wind and Solar Power Plant Deployment // *Energies*. 2025. Vol. 18, № 9. P. 2355. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092355>.
11. Ekonomichni pytannia vprovadzhennia malykh modulnykh reaktoriv v Ukraini yak konkurentnoi tekhnologii shchodo soniachnoi enerhetyky // *Ekonomika i upravlinnia*. 2024. № 3. S. 76–82. DOI: <https://doi.org/10.36919/2312-7872.3.2024.76>.
12. Kostiukh A. Prezentatsiia «Proektu Zakonu Ukrainy pro vnesennia zmin do deiaknykh zakoniv Ukrainy shchodo zasad vprovadzhennia malykh modulnykh reaktoriv v Ukraini» vid 09.10.2025. URL: <https://kompek.rada.gov.ua/uploads/documents/31396.pdf> (date of access: 15.04.2026).
13. Park K., Park T., Zee S. K., Koo B. S. Control rod driven long-term load-follow operation in small modular reactor // *Annals of Nuclear Energy*. 2023. Vol. 182. Art. 109620. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109620>.
14. Choudhury S. Harnessing the Flexibility of Small Modular Reactors (SMRs): Physics-Informed Approach. Seminar, 2025. URL: <https://mae.ucsd.edu/seminar/2025/harnessing-flexibility-small-modular-reactors-smrs-physics-informed-approach> (date of access: 15.04.2026).
15. Pershyi u sviti HTR-PM rozpochynaie komertsiiu ekspluatatsiiu. URL: https://en.cnn.com.cn/ru/2023-12/07/c_1023364.htm (date of access: 15.04.2026).
16. Plavucha AES «Akademik Lomonosov» // Wikipedia: vebсайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Плавуча_AEC_«Академік_Ломоносов» (date of access: 15.04.2026).
17. Nuclear submarine // Wikipedia: website. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_submarine#United_States_Navy (date of access: 15.04.2026).
18. Nilsen T., Kudrik I., Nikitin A. Severnyi flot. Potentsialnyi risk radioaktivnogo zagriznennia regiona. Doklad Mezhdunarodnogo ekologicheskogo obiedinenia «Bellona». 1996. № 2. 223 s. URL: <https://network.bellona.org/content/uploads/sites/4/2015/07/sevflot.pdf> (date of access: 15.04.2026).
19. Josephs R. E., Yap T., Alamootti M., Omojiba T., Benarbia A., Tomomewo O., Ouadi H. Regulation of Small Modular Reactors (SMRs): Innovative Strategies and Economic Insights // *Eng.* 2025. Vol. 6, № 4. P. 61. DOI: <https://doi.org/10.3390/eng6040061>.
20. Small modular reactor // Wikipedia: website. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Small_modular_reactor (date of access: 15.04.2026).
21. Report on Manufacturability, Supply Chain Management and Commissioning of SMRs. SMR RF – MCO Working Group. 15 December 2019. 32 p. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/19/12/smr_rf_mco_interim_report.pdf (date of access: 15.04.2026).
22. International Conference on Small Modular Reactors and Their Applications 2024 // International Atomic Energy Agency: website. URL: <https://www.iaea.org/events/smr2024> (date of access: 04.08.2024).
23. Lazurenko O. P., Chalyi O. O. Stratehiia rozvytku enerhosystemy Ukrainy ta mistse v nii malykh modulnykh

reaktoriv // Enerhozberezhennia, enerhetyka, enerhoaudyt. 2022. № 9–10(175–176). DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.09.01>.

24. Pohodynny obsiahy spozhyvannia elektrychnoi enerhii pobutovymy spozhyvachamy za hruden 2021 roku u Kyievi. URL: https://static.yasno.ua/assets/assets/KEP_Faktichni_obsyagi_prodzhu_elektrichnoyi_energiyi_pobutovim_spozhyvacham_za_gruden_2021_roku_8176084f62.pdf (date of access: 15.04.2026).

25. Pikovi potreby // Wikipedia : vebсайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Пікові_потреби (data zvernennia: 15.04.2026).

26. Boarin S., Mancini M., Ricotti M., Locatelli G. Economics and Financing of Small Modular Reactors (SMRs) // Handbook of Small Modular Nuclear Reactors / ed. by D. T. Ingersoll, M. D. Carelli. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2021. P. 241–278.

27. Sam R., Sainati T., Hanson B., Kay R. Licensing Small Modular Reactors: A State-of-the-Art Review of the Challenges and Barriers // Progress in Nuclear Energy. 2023. Vol. 164. Art. 104859.

28. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. Part One: Water-Cooled SMR. IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2022. 144 p. URL: http://ascenrtrust.com/SMR/pdf/1-SMR_IAEA-Part-One.pdf (date of access: 15.04.2026).

29. Makhidzhani A., Ramana M. V. Chomu mali modulni yaderni reaktory ne dopomozhut protystoiaty klimatychnii kryzi. URL: <https://atom.org.ua/?p=3236> (date of access: 15.04.2026).

30. Nedobudovani radianski AES // Wikipedia : vebсайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Недобудовані_радянські_АЕС (date of access: 15.04.2026).

31. Prohrama rozvytku hidroenerhetyky na period do 2026 roku : Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy № 552-r vid 13.07.2016. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/552-2016-%D1%80/print> (data zvernennia: 15.05.2026).

32. Ukhvala sudu № 127309328 vid 13.05.2025, Tiachivskiy raionnyi sud Zakarpatskoi oblasti. URL: <https://youcontrol.com.ua/catalog/court-document/127309328/> (date of access: 15.04.2026).

33. Markou G., Genco F. Seismic Assessment of Small Modular Reactors: NuScale Case Study for the 8.8 Mw Earthquake in Chile // Nuclear Engineering and Design. 2018. Vol. 342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.12.002>.

34. Statystychnyi shchorichnyk Ukrainy za 2018 rik. URL: https://ukrstat.org/uk/druk/publicat/kat_u/2019/zb/11/zb_yearbook_2018.pdf (date of access: 15.04.2026).

35. Turbina O. I. Aktualni problemy ekonomiky. 2019. № 10(2020). S. 32–40. DOI: <https://doi.org/10.32752/1993-6788-2019-1-220-32-40>. URL: https://eco-science.net/archive/2019/APE-10-2019/10.19_topic_Turbina%20O.I..pdf (date of access: 15.04.2026).

36. Verkhovtsev V., Demikhov Yu., Zabulonov Yu., Tyshchenko Yu. Rozrobka kryteriiv ta rekomendatsii shchodo vyboru ploshch, potentsiino prydatnykh dlia rozmishchennia malykh modulnykh yadernykh reaktoriv na terytorii Ukrainy // Problemy zniattia z ekspluatatsii ob'iektiv yadernoi enerhetyky ta vidnovlennia navkolyshnoho seredovyshcha : materialy IX Mizhnarodnoi konferentsii INUDECО 24, 24–26 kvitnia 2024 r. S. 25–36. URL: https://inudeco.pro/wp-content/uploads/2024/09/inudeco-2024-electronic_collection.pdf (date of access: 15.04.2026).

37. U Komiteti z pytan enerhetyky ta zhytlovo-komunalnykh posluh opratsovuetsia zakonoproiekt pro mali modulni reaktory // Pres-sluzhba Aparatu Verkhovnoi Rady Ukrainy. URL: <https://www.rada.gov.ua/print/267644.html> (date of access: 15.04.2026).

38. Carless T. S., Griffin W. M., Fischbeck P. S. The Environmental Competitiveness of Small Modular Reactors: A Life Cycle Study // Energy. 2016. Vol. 114. P. 84–99.

39. Verkhovtsev V., Demikhov Yu., Zabulonov Yu., Tyshchenko Yu. Conceptual principles of the implementation of small modular reactors in Ukraine // Proceedings of the Eighth International Conference “Problems of decommissioning of nuclear power facilities and environmental restoration” (INUDECО 23). April 27–28, 2023, Slavutych. P. 22–33. Chernihiv: National University “Chernihiv Polytechnic”, 2023. ISBN 978-617-7932-51-1

40. IAEA. Safety of Nuclear Power Plants: Design. Specific Safety Requirements No. SSR-2/1 (Rev.1). Vienna: IAEA, 2016. 72 p. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1679_web.pdf (date of access: 15.04.2026).

41. IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. 2022 Edition. Vienna: IAEA, 2022. https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2022.pdf (date of access: 15.04.2026).

42. OECD/NEA. Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities. OECD Publishing, Paris, 2021. NEA No. 7560. https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_57979 (date of access: 15.04.2026).

43. IEA. Nuclear Power and Secure Energy Transitions. Paris: IEA, 2022. <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-and-secure-energy-transitions> (date of access: 15.04.2026).

44. Lucid Strategy Group. SMR Techno-Economic Assessment: Project 3 – SMRs Compared to Other Low Carbon Generation. UK Dept of Energy & Climate Change, 2016. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a80b38de5274a2e87dc2bd1/TEA_SMR_C3_Final_0.pdf (date of access: 15.04.2026).

45. Yi S.J., Liu X.J. Accident Analysis of the Molten Salt Reactor Under Multiple Failure Scenarios. Energy Conversion and Management 2020, 217, 113017. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113017 (date of access: 15.04.2026).

46. NuScale Power. NuScale Power Module Safety. Technical Bulletin TB-0905-16694. 2020. <https://www.nuscalepower.com/en/technology/nuclear-power-plant-design/safety> (date of access: 15.04.2026).

47. Ingersoll D.T., Carelli M.D. (Eds.) Handbook of Small Modular Nuclear Reactors. 2nd ed. Woodhead Publishing, 2021. 640 p. ISBN 978-0-12-823916-3 (date of access: 15.04.2026).

48. Simpson J.C., Magruder C.H. Defense in Depth Application in Small Modular Reactors: Sufficiency and Scalability. Trans. Am. Nucl. Soc. 2022, 127, 251–253. <https://www.ans.org> (date of access: 15.04.2026).

49. Liu S. et al. Seismic fragility analysis of nuclear power plant structures using the support vector machine. Nuclear Engineering and Technology 2021, 53(11), 3722–3731. DOI: 10.1016/j.net.2021.05.037 (date of access: 15.04.2026).

50. Boarin S., Locatelli G., Mancini M., Ricotti M. Financial case studies on small- and medium-size modular reactors. Nuclear Technology 2012, 178(2), 218–232. DOI: 10.13182/NT12-11 (date of access: 15.04.2026).

51. Sabharwall P. et al. Process Heat Exchanger Options for Fluoride Salt-Cooled High Temperature Reactor. Idaho National Laboratory. INL/EXT-11-21584. 2011. <https://inldigitalibrary.inl.gov/sites/sti/sti/5116361.pdf> (date of access: 15.04.2026).

52. Westinghouse Electric Company. AP1000 Design Control Document. Rev.19. NRC Docket No. 52-006. 2011. <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/large-lwr/ap1000.html> (date of access: 15.04.2026).

53. Huang T.H. Safety Analysis of Loss-of-Coolant Accident for Small Modular Reactor With Passive Safety System. Annals of Nuclear Energy 2021, 150, 107821. DOI: 10.1016/j.anucene.2020.107821 (date of access: 15.04.2026).

54. Rowinski M.K., White T.J., Zhao J. Small and Medium sized Reactors (SMR): A review of technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015, 44, 643–656. DOI: 10.1016/j.rser.2015.01.006 (date of access: 15.04.2026).

55. Ukrvodnyi Kadastr. Natsionalna dopovid pro stan vodopostachannia, vodovidvedennia ta ochistky stichnykh vod v Ukraini. Derzhavne ahentstvo vodnykh resursiv Ukrainy. 2022. <https://www.davr.gov.ua> (date of access: 15.04.2026).

56. World Nuclear Association (WNA). Nuclear Power and Water. Information Library. <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-and-water.aspx> (date of access: 15.04.2026).

57. Vujic J., Bergmann R.M., Skoda R., Miletic M. Small modular reactors: Simpler, safer, cheaper? Energy 2012, 45(1), 288–295. DOI: 10.1016/j.energy.2012.01.078 (date of access: 15.04.2026).

SMALL MODULAR REACTORS (SMR) IN THE POST-WAR RECONSTRUCTION OF UKRAINE

Verkhovtsev V.G., Demikhov Yu.M., Tyshchenko Yu.Ye., Yatsenko V.G., Borisova N.M., Kravchuk Z.M.

Verkhovtsev V.G., D.Sc. (Geology), Senior Research Fellow, Head of department, State Institution «Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0002-1015-6725, Verkhovtsev@ukr.net

Demikhov Yu.M., PhD (Geology, Mineralogy), Senior Research Fellow, Head of laboratory, State Institution «Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine»; ORCID: 0000-0002-3576-6570, y_demikhov@ukr.net

Tyshchenko Yu. Ye., PhD (Geology), Senior Researcher, State Institution «Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0002-0413-241X, IGNS_Tyshchenko@igns.gov.ua

Yatsenko V.G., PhD (Geology, Mineralogy), Senior Researcher Fellow, State Institution «Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0003-3498-3466, vgyatsenko@gmail.com

Borisova N.M. Lead Engineer, State Institution «Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0002-7169-1430, IGNS_Borysova@nas.gov.ua

Kravchuk Z.M., Lead Engineer, State Institution «Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0002-6093-488X, IGNS_Kravchuk@igns.gov.ua

During the war, which has been going on in Ukraine for 13 years, its energy facilities have suffered significant damage. Ukraine's insufficient energy security may become a basic limiter of the pace of reconstruction, in conditions of a deficit in electricity generation and the vulnerability of centralized facilities to military threats, therefore, in post-war reconstruction, one of the priority tasks will be the restoration and replacement of lost energy generating capacities. In recent decades, technologies aimed at creating small modular reactors of the III and III+ generations have been developing at an accelerated pace in the world. These technologies have a number of significant advantages compared to traditional «large» power units. Thus, small modular reactors require lower initial capital investments due to the construction of basic modular structures in factory conditions, reduced terms of preparation of industrial sites and infrastructure; their commissioning through phased investments reduces financial risks; in addition, they allow to achieve a lower environmental impact per unit of electricity. The global experience of using small modular reactors in the naval fleet has allowed us to identify the main causes of emergencies with nuclear power plants in the naval fleet, which may also be relevant when using Small Modular Reactors. The main requirement for small modular reactors is the development of increased safety features, which is ensured lower reactor power, the use of passive safety systems and lower operating zone pressure. Passive systems use such physical phenomena as natural circulation, convection, gravity and pressure, which allows for automatic shutdown of critical reactor systems in the event of an emergency. A comparison of the cost, payback and cost of electricity for a large nuclear power plant, renewable energy sources and several identical small modular reactors shows that the latter are the most profitable. When introducing small modular reactors, Ukraine receives economic growth and increased energy security, benefits from job creation with local development opportunities, competitive energy prices and self-sufficient energy systems, which are ideal for areas with limited water resources and in seismically active areas. Large reactors will remain the mainstay of energy for a long time, while small reactors can be a flexible, innovative alternative for the rapid reconstruction of Ukraine and for replacing fossil fuels.

Key words: Small Modular Reactors (SMR), high maneuverability, nuclear power plant safety, seismic resistance, SMR 160.

Дата першого надходження статті до видання: 16.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026