

МАЛІ МОДУЛЬНІ РЕАКТОРИ ЯК ЗАСІБ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОНЕЗАЛЕЖНОСТІ БІЗНЕСУ ТА ІНСТРУМЕНТ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

©2024 БАНЩИКОВ П. Г., ВОСТРЯКОВ О. В., БАРАБАСЬ Д. О., СТЕПУРА Д. Ф.

УДК 338.2:621.039
JEL Classification: L94; O33; P18

Банщиків П. Г., Востряков О. В., Барабась Д. О., Степура Д. Ф.

Малі модульні реактори як засіб забезпечення енергонеалежності бізнесу та інструмент декарбонізації енергетики України

За часів систематичних ударів держави-агресора по енергетичній інфраструктурі України питання забезпечення енергонеалежності вітчизняних бізнес-організацій стають особливо актуальними. Зберігає значущість проблематика зниження викидів парникових газів. Перспективним напрямком розв'язання зазначених проблем виступає використання малих модульних реакторів. Профільні наукові дослідження, присвячені технічному й економічному обґрунтуванню проєктів експлуатації малих модульних реакторів, не узагальнюють найбільш актуальні напрямки їх використання як інструменту забезпечення енергонеалежності бізнесу та декарбонізації економіки в контексті досягнення екологічних цілей України. Бракує їм і всебічного врахування значущих техніко-економічних параметрів проєктів малих модульних реакторів при прогнозуванні їх ефективності та конкурентоспроможності стосовно інших джерел енергії. Метою статті є систематизація переваг і недоліків впровадження малих модульних реакторів як інструменту забезпечення енергонеалежності бізнесу та декарбонізації енергетики України з уточненням економічних аспектів їхньої експлуатації в українських реаліях. У роботі узагальнено очікувані переваги та вади використання малих модульних реакторів. Їх аналіз засвідчив актуальність і нагальність для України розгортання мережі захищених від ракетно-артилерійських обстрілів малих модульних реакторів сучасного рівня. Окреслено проблеми та прогалини у наявному методичному забезпеченні оцінки економічної ефективності проєктів малих модульних реакторів. Зростання енергетичних потреб людства і накопичення екологічних проблем експлуатації традиційних електростанцій примушують дослідницькі колективи багатьох країн розвивати методичний інструментарій оцінювання економічної ефективності та конкурентоспроможності проєктів малих модульних реакторів, впроваджувати і вдосконалювати пілотні проєкти, що дозволять у перспективі забезпечити споживачів енергії доступними та безпечними її джерелами.

Ключові слова: сталий розвиток, енергетична незалежність, малі модульні реактори (ММР), декарбонізація, низьковуглецева економіка, бізнес.

DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2024-4-56-63>

Табл.: 2. Формул.: 1. Бібл.: 21.

Банщиків Петро Гаврилович – кандидат економічних наук, доцент, професор кафедри менеджменту, Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана (просп. Берестейський, 54/1, Київ, 03057, Україна)

E-mail: bpg@kneu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3720-0578>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57210115690&eid=2-s2.0-85069449456>

Востряков Олександр Володимирович – кандидат економічних наук, доцент, декан факультету економіки та управління, Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана (просп. Берестейський, 54/1, Київ, 03057, Україна)

E-mail: oleksandr.vostriakov@kneu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9030-6569>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57196371469>

Барабась Дмитро Олександрович – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри менеджменту, Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана (просп. Берестейський, 54/1, Київ, 03057, Україна)

E-mail: barabas@kneu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8776-6222>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/J-8704-2015>

Степура Денис Федорович – аспірант, кафедра менеджменту, Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана (просп. Берестейський, 54/1, Київ, 03057, Україна)

E-mail: stepuradenis@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8334-6833>

Banshchykov P. H., Vostriakov O. V., Barabas D. O., Stepura D. F. Small Modular Reactors as a Means of Ensuring the Energy Independence of Business and a Tool for Decarbonization of Ukrainian Energy Sector

At the time of the systematic strikes of the aggressor state on the energy infrastructure of Ukraine, the issues of ensuring the energy independence of domestic business organizations become especially relevant. The problematic of reducing greenhouse gas emissions remains important. A promising direction for solving these problems is the use of small modular reactors. Specialized scientific studies devoted to the technical and economic feasibility study of small modular reactor operation projects do not summarize the most relevant areas of their use as a tool for ensuring the energy independence of business and decarbonization of the economy in the context of achieving Ukraine's environmental goals. They also lack comprehensive consideration of significant technical and economic parameters of small modular reactor projects when predicting their efficiency and competitiveness in relation to other energy sources. The article is aimed at systematizing the advantages and disadvantages of the introduction of small modular reactors as a tool for ensuring energy independence of business and decarbonization of the energy sector of Ukraine with closer defining of the economic aspects of their operation in Ukrainian realities. The article summarizes the expected advantages and disadvantages of using small modular reactors. The relevant analysis showed the pertinence and urgency for Ukraine of deploying a network of small modular reactors of a modern level protected from missile attacks and artillery shellings. Problems and gaps in the existing methodological support for assessing the economic efficiency of small modular reactor projects are outlined. The growth of energy needs of mankind and the accumulation of environmental problems in the operation of traditional power plants force research teams in many countries to develop methodological tools for assessing the economic efficiency and competitiveness of small modular reactor projects, to implement and improve pilot projects that will provide consumers with affordable and safe energy sources in the future.

Keywords: sustainable development, energy independence, small modular reactors (SMRs), decarbonization, low-carbon economy, business.

Tabl.: 2. **Formulae:** 1. **Bibl.:** 21.

Banshchykov Petro H. – Candidate of Sciences (Economics), Associate Professor, Professor of the Department of Management, Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman (54/1 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine)

E-mail: bpg@kneu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3720-0578>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57210115690&eid=2-s2.0-85069449456>

Vostriakov Oleksandr V. – Candidate of Sciences (Economics), Associate Professor, Dean of the Faculty of Economics and Management, Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman (54/1 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine)

E-mail: oleksandr.vostriakov@kneu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9030-6569>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57196371469>

Barabas Dmytro O. – Candidate of Sciences (Economics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management, Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman (54/1 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine)

E-mail: barabas@kneu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8776-6222>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/I-8704-2015>

Stepura Denys F. – Postgraduate Student, Department of Management, Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman (54/1 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine)

E-mail: stepuradenis@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8334-6833>

Вступ. 3-поміж інших цілей сталого розвитку ООН вагомим значенням для України має забезпечення доступу до недорогих, надійних, стійких і сучасних джерел енергії для всіх. Цьому сприятиме пошук шляхів удосконалення наявних і впровадження нових способів генерації електричної енергії, формування оптимальної структури енергетичної галузі. Світовим трендом і найбільш перспективним варіантом забезпечення досягнення цілей енергонезалежності та зниження вуглецевого сліду на ряду із альтернативною енергетикою вважається впровадження малих модульних реакторів (ММР). Проте на цей момент ММР проходять фазу проектування та ліцензування, запускаються в дію перші пілотні проекти. Ця обставина, з одного боку, поки унеможливає вивчення на основі накопиченої статистики наслідків реального використання малих модульних реакторів, з іншого боку, надає особливої актуальності до-

слідженню різноманітних аспектів і очікуваних наслідків впровадження ММР.

Результати профільних наукових досліджень стосовно техніко-економічного обґрунтування використання малих модульних реакторів представлені в публікаціях [1–7]. У цих працях розглядаються питання оцінки витрат та ефективності ММР різних типів, здійснюється порівняння з іншими варіантами генерації електроенергії, аналізуються чутливість різних показників проектів малих модульних реакторів тощо. Найбільш фундаментальні та всеохоплюючі методики оцінки ефективності ММР розроблені МА-GATE на основі методології INPRO (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles) [8], економічної оцінки ядерної енергетичної системи NEST (Nuclear Energy System Economics Support Tool), які базуються на розрахунках нормованої вартості електроенергії (LCOE) [9].

Вищезгадані дослідження не узагальнюють найбільш актуальні напрямки використання малих модульних реакторів як інструменту забезпечення енергонезалежності бізнесу та декарбонізації економіки в контексті досягнення екологічних цілей України. Бракує їм і всебічного врахування значущих техніко-економічних параметрів проєктів ММР при прогнозуванні їх ефективності та конкурентоспроможності стосовно інших джерел енергії.

Метою статті є систематизація переваг і недоліків впровадження малих модульних реакторів як інструменту забезпечення енергонезалежності бізнесу та декарбонізації енергетики України з уточненням економічних аспектів їхньої експлуатації в українських реаліях.

Викладення основних результатів дослідження.

Розвиток енергетики на основі використання атомних реакторів проходив декілька етапів. Для їхнього виокремлення слід розглядати різні технологічні особливості, які пов'язані з різними фізичними та технічними принципами управління ланцюговою реакцією в активній зоні реакторів. Перші атомні станції з'явилися у 50-х роках, мали невелику потужність (від 5 до 210 МВт) і використовували воду або газ як охолоджувач. У 60–70-ті роки спостерігалось значне зростання атомних станцій на основі водяного охолодження із суттєвим нарощуванням одиничної потужності – до 1000 МВт. Найбільшу чисельність таких атомних блоків було збудовано у США та Франції (разом понад 200 од.). Будівництво та експлуатація такої кількості станцій вже призводили до удосконалення виробничих процесів на основі стандартизації, ефекту масштабів виробництва. Протягом 70–80 років трапилися найбільші аварії на АЕС Три-Майл-Айленд (1979), Чорнобильській АЕС (1986) і АЕС Фукусіма-Даїчі (2011). Такі трагічні події викликали певний скепсис щодо можливостей подальшого використання атомних реакторів та кардинальне переосмислення концепції безпеки. З одного боку, це підсилювало прагнення взагалі відмовитися від атомних блоків, з іншого, – спричинило стрімкий розвиток систем безпеки, в тому числі й за рахунок використання нових принципів роботи реакторів. Таким чином, під час обговорення між країн G7 на конференції ООН із питань клімату COP29, більшість учасників підтвердили наміри активно розвивати атомну енергетику та визнають її роль у досягненні кліматичних

цілей із скорочення викидів парникових газів та забезпечення енергетичної безпеки [10].

Найбільш готовими до використання є проєкти компаній NuScale та Holtec International. Саме в Україні планується будівництво ММР з реактором ММР-160 компанії Holtec International. Декларується можливість широкого використання цього реактора, крім виробництва електроенергії, також для теплопостачання, виробництва водню, живлення дата-центрів, опріснення води та інші потреби та комбінація із альтернативними джерелами енергетики у зв'язку із маневреністю та можливістю їх використання під час пікових навантажень, що під силу зазвичай лише тепловим станціям, які спалюють викопне паливо [11; 12].

Перспективи та типологія ММР. Водночас із розвитком «великої» атомної енергетики відбувалося становлення будівництва реакторів з малою потужністю. Історично так склалося, що перші установки використовувалися як силові для морських кораблів різних класів і призначень (від криголамів до підводних човнів) [7]. Їхня тривала експлуатація сприяла поступовому підвищенню якості та рівня безпеки, забезпечувала оптимізацію процесу виробництва.

Мали модульні реактори (ММР) одночасно можна вважати кроком, що спрямований на підвищення ступеня безпеки, і відповіддю на сучасні світові виклики. Міжнародне агентство з атомної енергії описує ММР як нове покоління «ядерних реакторів, призначених для виробництва електроенергії потужністю до 300 МВт, компоненти та системи яких можуть бути виготовлені в цехах, а потім транспортуватися у вигляді модулів до місць експлуатації для встановлення в міру виникнення попиту» [13]. Хоча із цього визначення є певні винятки, наприклад, британський ММР від Rolls-Royce потужністю 440 МВт та інші.

З цього визначення випливають дві суттєві особливості малих реакторів. По-перше, виготовлення реактора в цілому відбувається на виробничих майданчиках спеціалізованих підприємств. По-друге, конструктивно-технологічні особливості передбачають їхнє модульне використання. Ці особливості ММР можуть нівелювати такий їхній недолік як значно меншу вихідну потужність у розрахунку на 1 годину роботи. У табл. 1 узагальнено очікувані переваги та вади ММР.

Таблиця 1

Очікувані переваги та вади малих модульних реакторів

Переваги ММР	Вади ММР
1	2
<i>Безпека:</i> ММР зазвичай спроектовані так, щоб мати пасивні системи безпеки, які не потребують активних дій оператора або зовнішнього живлення для зупинки реактора в разі аварії. Це знижує ймовірність людських помилок або технічних збоїв. Завдяки компактності та використанню природного охолодження ММР мають менший ризик серйозних аварій порівняно з великими атомними реакторами	<i>Невизначеність регулювання:</i> Ядерна енергетика є суворо регульованою галуззю, і нові типи реакторів, включаючи ММР, можуть зіткнутися з труднощами в отриманні дозволів на будівництво та експлуатацію, оскільки регулятори часто не мають достатнього досвіду чи стандартів для оцінки новітніх технологій
<i>Гнучкість у розташуванні:</i> ММР можуть бути встановлені в різних географічних умовах, включаючи віддалені або важкодоступні райони, де великі атомні станції можуть бути економічно або технічно нецікавими. Малі модульні реактори також можна встановлювати в місцях з обмеженим доступом до інфраструктури	<i>Необхідність спеціалізованих технологій:</i> ММР потребують новітніх інженерних та ядерних технологій, які ще не завжди виведені на рівень масового виробництва. Це може обмежити їх доступність і здатність до швидкого впровадження в різних країнах

1	2
<i>Економічність:</i> Будівництво та запуск ММР можуть бути значно дешевшими порівняно з великими атомними станціями завдяки меншому масштабу та спрощеній інфраструктурі. Вартість капітальних вкладень і час на будівництво таких станцій є суттєво меншими	<i>Проблеми з фінансуванням і інвестиціями:</i> Хоча ММР можуть бути дешевшими у будівництві порівняно з великими атомними станціями, їх вартість на одиницю енергії може бути вищою через обмежену потужність, невизначеність умов експлуатації, потреби великих капіталовкладень на етапі розробки та тестування
<i>Мобільність і масштабованість:</i> ММР мають модульну конструкцію, що дозволяє будувати реактори один за одним, таким чином збільшуючи потужність станції поступово без необхідності зупиняти роботу всієї установки. Це дозволяє адаптувати потужність залежно від змінних потреб в електроенергії або інших ресурсах	<i>Питання щодо технічного обслуговування:</i> Хоча ММР проєктуються з урахуванням мінімізації потреби в технічному обслуговуванні, воно все одно вимагає спеціалізованих знань і кваліфікації. Це може бути проблемою для віддалених регіонів, де може не вистачати потрібних ресурсів для проведення обслуговування або ремонту
<i>Менше виробництво відходів:</i> Очікується, що завдяки більш ефективному використанню палива ММР зможуть генерувати менше ядерних відходів порівняно з великими атомними реакторами. Це сприятиме зменшенню екологічного навантаження	<i>Проблеми з паливом та відходами:</i> Навіть якщо ММР зможуть генерувати менше відходів, вони все одно їх продукуватимуть, що потребує особливої уваги щодо їх утилізації та захоронення. Якщо ММР широко використовуватимуться, зросте потреба в інфраструктурі для довгострокового зберігання відходів
<i>Інтеграція з іншими енергетичними системами:</i> ММР можна використовувати не лише для виробництва електроенергії, але й для тепlopостачання, опріснення води, або як джерела тепла для промислових процесів, що підвищує їх гнучкість та ефективність	<i>Невелика потужність:</i> Хоча ММР мають переваги у вигляді компактності, вони мають меншу потужність порівняно з великими атомними реакторами. Це означає, що вони можуть бути менш ефективними в забезпеченні великих міських чи промислових потреб у енергії
<i>Швидкість будівництва:</i> Завдяки модульному підходу ММР можуть бути побудовані швидше порівняно з великими реакторами. Це дозволяє швидше реагувати на зростання попиту на енергію та забезпечувати енергетичну безпеку	<i>Високі витрати на демонстрацію та сертифікацію:</i> Для того щоб ММР стали комерційно життєздатними, необхідно пройти процес сертифікації та демонстрації на практиці. Це може бути дорогим і часозатратним процесом, який заважає швидкому масштабуванню цієї технології
<i>Зменшення територіальної зайнятості та екологічних наслідків генерування енергії:</i> Малі модульні реактори займають менше простору, що дозволяє зменшити земельні потреби та вплив на навколишнє середовище. Їх використання сприятиме скороченню викидів парникових газів	<i>Обмежений ринок:</i> У країнах або регіонах, де зростає підтримка відновлювальних джерел енергії (сонце, вітер), попит на ядерну енергію може бути обмеженим. Технології ММР можуть бути менш привабливими для цих ринків порівняно з більш дешевими або екологічно чистими альтернативами

Джерело: узагальнено за [7; 11; 14–17]

З табл. 1 видно, що однією із значних переваг ММР є можливість маневрування, що для досягнення цілей енергонезалежності та декарбонізації є першочерговим. Альтернативні джерела енергії та атомна генерація великих блоків разом з гідроенергетикою не можуть забезпечити електроенергією споживачів під час пікового споживання, що наразі компенсує традиційна тепла енергетика. Тому світовою спільнотою підтримується проєктування гібридних електричних станцій, поєднання ММР із сонячними та вітровими станціями, заміщення котельної частини теплової станції ММР з урахуванням використання турбінної та мережевої інфраструктури, ММР для заряджання акумуляторних батарейних систем, виробництва водню, плавлучі ММР тощо. Особливу актуальність для України за умов військової агресії набуває розгортання мережі захищених від ракетно-артилерійських обстрілів малих модульних реакторів сучасного рівня.

Специфіка виробництва та експлуатації ММР певною мірою залежить від їхнього типу. За даними міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) у 2022 р. у світі було відомо про 83 концепції ММР, які розроблялися у 18 краї-

нах [18]. Розподіл за концепціями ММР ґрунтується на таких характеристиках, як тип охолодження активної зони, використання різних видів палива тощо. Найбільш відомі ММР представлені у табл. 2. Ця інформація дозволяє побачити найбільш розповсюджені типи малих модульних реакторів та визначити перспективні розробки.

З табл. 2 бачимо, що на ринку розробок ММР спостерігається інтенсивна конкуренція, незважаючи на відсутність промислової експлуатації таких реакторів. Вищезазнані та інші особливості ММР мають бути враховані під час оцінювання економічної ефективності та конкурентоспроможності відповідних проєктів. Деякі з вказаних аспектів вже стали об'єктами досліджень, інші поки ще не знайшли відображення у спеціалізованій літературі, в тому числі через відсутність достатнього обсягу фактичних даних.

Економічні аспекти оцінювання проєктів побудови та експлуатації малих модульних реакторів. Базові положення оцінки енергетичних проєктів містяться у звіті Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСД) «Прогнозні витрати на виробництво електроенер-

Таблиця 2

Основні типи малих модульних реакторів (ММР)

Назва проєкту, виробник, країна походження	Потужність, Мвт	Паливо	Примітка
<i>Реактори з водяним охолодженням</i>			
ACPR 50S , CGNPC (Китай)	50/200	оксид урану	
BWRX-300 General Electrics і Hitachi (США, Японія)	300	оксид урану	
CAREM , CNEA (Аргентина)	30/100	оксид урану	
NuScale , NuScale Inc. (США)	77/160	оксид урану	
Rolls-Royce 470 , Rolls-Royce, (Велика Британія)	470	оксид урану	
SMART , CARE (Корея)	107/365	оксид урану	
MMP-160* , Holtec International (Канада, США)	160/525	оксид урану	
<i>Високотемпературні реактори з гелієвим охолодженням на швидких нейтронах</i>			
EM , General Atomics (США)	265/500	карбід урану	
HTR-PM , INET (Китай)	210/250	оксид урану	діє з 2022 р
PBMR-400 , Eskom (ЮАР)	165	оксид урану	
<i>Реактори з натрієвим охолодженням</i>			
ARC-100 , ARC (Канада)	100/286	урановий сплав	
CEFR , CNEIC (Китай)	20 (1000)	МОХ-паливо	діє з 2021 р
<i>Реактори на розплавлених солях</i>			
IMSR (300) , Terrestrial Energy Inc. (Канада)	195	уран-фторид-сіль	
SSR-W300 , Moltex (Канада)	300/750	уран-плутонієва фторидна сіль	

* Ця модель планується до будівництва в Україні [19].

Джерело: розроблено авторами на основі [7]

гії на 2020 рік» [20]. У цій фундаментальній праці представлена методика розрахунку нормованої вартості електроенергії LCOE (Levelized Cost of Electricity) як відношення

$$LCOE = \frac{(\text{Sum of costs over lif etime})}{(\text{Sum of electricity produced over lif etime}) \times (1+r)^{-t}}, \quad (1)$$

де $(1+r)^{-t}$ – реальна процентна ставка, що відповідає вартості капіталу.

Подальші кроки, що пов'язані із визначення складу загальних витрат, методичних підходів до їхнього обрахування, а також оцінки вартості виробленої електроенергії протягом всього терміну експлуатації енергетичного об'єкта, як раз і будуть сутністю економічного обґрунтування. Важливо зазначити, що це є лише базовим підходом, який не враховує такі важливі аспекти, як маневрені характеристики енергоблоку, вартість проектування, ліцензування, землевідведення, водні ресурси, матеріаломісткість, КВВМ (коефіцієнт використання встановленої потужності), витрати на оперативну експлуатацію, ремонт, на адміністративний апарат, фізичний захист об'єкта, витрати на поводження зі свіжим та відпрацьованим паливом, витрати на зняття з експлуатації та рекультивацию промислового майданчика. Зрозуміло, що все це обраховується для конкретного типу ММР і для визначеного місця його розміщення й експлуатації.

Окремою проблемою у методичному забезпечення оцінки економічної ефективності представляє коректне застосування теорії дисконтування для довгострокових про-

загальних витрат на здійснення будь-якого енергетичного проєкту до обсягу виробленої електроенергії за весь період експлуатації енергетичного проєкту (див. формулу 1).

ектів. Якщо йдеться про невеликі проміжки часу, від 1 до 5 років, процедура дисконтування дійсно дає можливість коректно порівнювати витрати (або надходження) на початок та кінець періоду. Однак термін експлуатації атомних блоків та їх виводу із експлуатації сягає 50–70 років. Чи можна гарантувати, що ані умови кредитування, ані інші суттєві параметри економічного оточення будуть залишатися незмінними протягом такого періоду часу експлуатації атомного реактора. Таке питання виглядає як риторичне. Тому, коли розглядаються значення показника чистої приведеної вартості (NPV) для атомних реакторів, то вони свідчать про збитковість всіх цих проєктів. За розрахунками [1] для ММР-160 було отримано таку величину NPV: (-6660,9 \$/ кВт), для AP1000, який відноситься класу «великих» реакторів, цей показник дорівнює (-6672,5 \$ кВт). Така майже однакова величина NPV для принципово різних енергетичних об'єктів лише підтверджує справедливості нашого сумніву щодо коректності застосування теорії дисконтування грошових потоків для довготривалих проєктів. І наостанок, як реактори попередньої генерації

такого ж типу (з водяним охолодженням) діють сьогодні у США на комерційній основі в кількості 94 од. [21] за умов від'ємного значення NPV?

Велике значення для оцінки витрат і результатів має фактор пілотного (First-of-a-kind – FOAK) або непілотного проекту (Nth-of-a-kind – NOAK). З точки зору малих модульних реакторів частіше за все слід розглядати сценарій FOAK, оскільки лише 3 проекти в світі вже реалізовані (див. табл. 2). Сценарій NOAK може бути застосований для економічного обґрунтування лише за умов тиражування вже діючих реакторів. Оскільки в Україні планується встановлення реакторів типу MMP-160, який не має референтного блоку, то всі економічні розрахунки мають спиратися на сценарій пілотного проекту FOAK. На практиці це означає, що потрібно на експертному рівні встановлювати можливе збільшення всіх капітальних та експлуатаційних витрат щодо того рівня, що був заявлений виробником.

Ще один аспект, який потребує уточнення під час оцінки поточних витрат для MMP, – це визначення витрат на збагачення палива. Розглянемо проект MMP-160 від компанії Holtec International. Українські дослідники здійснили ґрунтовні розрахунки відносно оцінки його економічної ефективності в суворій відповідності до вимог МАГАТЕ [1]. Серед іншого йдеться про підготовку пального для певного типу реактора; в термінах, прийнятих у системі INPRO (NEST), йдеться про вартість збагачення урану (SC3). Цей показник (SWU Separative work units) розраховується у доларах США на одиницю роботи розділення. Назва цього показника пов'язана з технологією збагачення ядерного палива. Уранова руда містить в собі різні ізотопи (U^{238} та U^{235}), які потрібні відділити один від одного. Оскільки первинна сировина може містити різний вміст U^{235} , то буде зручно користуватися умовною одиницею роботи, яку потрібно виконати для відокремлення одного ізотопу урану від іншого. Для паливних збірок стандартного дизайну потрібно використовувати сировину із вмістом збагачення U^{235} на рівні 5 %. Оскільки більшість сучасних реакторів із водяним охолодженням використовують паливо саме із таким вмістом U^{235} , то обсяг необхідних робіт може бути легко встановлений за сценарієм NOAK (непілотний проект), тобто за аналогію. Очевидно, колектив авторів на чолі з Дибачем О. М. саме так і зробив, встановивши значення показника витрат на збагачення палива SC3 на рівні 120 \$/ од. роботи з розділення [1]. Про це свідчить той факт, що автори розглядають значення цих витрат незмінними для всіх типів реакторів, які вони досліджували: від великого реактора AP1000 до малих модульних реакторів (MMP-160, VOYGR, UK-MMP). Звичайно, збагачення урану – це лише одна з операцій, адже процес загалом включає: збагачення; регазифікацію; виробництво діоксиду урану; виготовлення паливних таблеток, оболонок тепло-виділяючих елементів і хвостовиків; збирання.

За відсутності реалізованого NOAK, для визначення витрат на збагачення палива слід виходити із принципу FOAK (пілотного проекту). Для обґрунтування цього сценарію можна спиратися на такі міркування. Стандартні збірки ядерного палива, які працюють у великих реакторах типу AP1000 (з потужністю 1100 МВт), мають ступінь збагачення за ізотопом U^{235} на рівні 5 %. Це дозволяє такому

паливу перебувати довготривалий час в активній зоні реактора (приблизно 5 років). Для малого модульного реактора MMP-160 (з потужністю 160/550 МВт) паливна збірка не може бути однаковою за розміром з великим реактором AP1000. Її розміри мають визначитися конструктивними особливостями конкретної моделі малого реактора. За проектом AP1000 обсяг активної зони складає приблизно 100 м^3 , а в MMP-160 – 47 м^3 .

Якщо вони мають однаковий ступінь збагачення на рівні 5 %, то це буде означати, що менша за обсягом паливна збірка буде швидше «вигоряти»; у нашому прикладі термін перебування паливних збірок у малому реакторі буде в 2 рази коротшим. Звідси випливає, що складну і відповідальну операцію перезавантаження малого реактора слід здійснювати кожні 2,5 роки, а не 1 раз на 5 років. Ця процедура дуже трудомістка та передбачає припинення процесу генерації електричної енергії.

Якщо рівень збагачення та відповідних витрат (SC3) залишається незмінним для всіх типів реакторів, тоді слід суттєво корегувати витрати на перезавантаження палива в активній зоні реактора. Але практичний досвід експлуатації MMP підказує (див. табл. 2), що таким шляхом в світі ніхто не йде і частоту заміни палива ніхто не збільшує (є навіть приклади намагання залишати паливо в активній зоні реактора протягом 30 років). Вирішення цієї проблеми можливо лише за рахунок збільшення часу перебування паливних збірок в активній зоні шляхом підвищення рівня їхнього збагачення.

Висновки. Розглянуті в роботі переваги і вади MMP, а також перспективи їх використання з метою забезпечення енергонезалежності та декарбонізації економіки України носять поки оціночний характер. Конкретні техніко-економічні показники експлуатації цього типу реакторів будуть отримані тільки після запуску серійних проектів. Але зростання енергетичних потреб людства з однієї сторони і накопичення екологічних проблем експлуатації традиційних електростанцій примушують дослідницькі колективи багатьох країн розвивати методичний інструментарій оцінювання економічної ефективності та конкурентоспроможності проектів MMP, впроваджувати і вдосконалювати пілотні проекти, що дозволять у перспективі забезпечити споживачів енергії доступними й безпечними її джерелами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дибач О. М. та ін. Оцінка економічних показників реакторних установок, перспективних для будівництва в Україні, та їх співставлення з відновлювальними джерелами енергії із застосуванням інструментарію МАГАТЕ. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2023. № 3 (99). С. 16–30.

DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3\(99\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3(99).02)

2. Boarin S., Ricotti M. E. An Evaluation of MMP Economic Attractiveness. *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2014. 05 August.

DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/803698>

3. Bryan H. C. et al. Remote nuclear microreactors: a preliminary economic evaluation of digital twins and centralized offsite control. *Reactor System Design and Analysis, Systems Science*

- & Engineering. 2023. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/nuclear-engineering/articles/10.3389/fnuen.2023.1293908/full>
4. Ekinici F. et al. The Future of Microreactors: Technological Advantages, Economic Challenges, and Innovative Licensing Solutions with Blockchain. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14 (15). DOI: <https://doi.org/10.3390/app14156673>
 5. Hee N. V., Peremans H., Nimmegeers P. Economic potential and barriers of small modular reactors in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114743>
 6. Mignacca B., Locatelli G. Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109519>
 7. Steigerwald B., Weibezahn J., Slowik M., Hirschhausen C. Uncertainties in estimating production costs of future nuclear technologies: A model-based analysis of small modular reactors. *Energy*. 2023. Vol. 281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128204>
 8. Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems (the INPRO Methodology) // International Atomic Energy Agency. URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/Pages/methodology.aspx>
 9. Economic assessment of the long-term operation of nuclear power plants: approaches and experience. IAEA Nuclear Energy series No. NP-T-3.25. International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA, 2018. 126 p.
 10. Амбарцумян А. Україна та ще 30 країн підтвердили курс на розвиток атомної енергетики: підсумки COP29 // Comments.ua. 2024. 1 грудня. URL: <https://society.comments.ua/ua/news/developments/ukraina-ta-sche-30-krain-pidtvrdili-kurs-na-rozvitok-atomnoi-energetiki-pidsumki-sor29-750672.html>
 11. Тейзе Є. Малі ядерні реактори: прорив чи зомбі-технологія? // DW. 2023. 28 квітня. URL: <https://www.dw.com/uk/mali-aderni-reaktori-dla-ukraini-tehnologijnij-proriv-ci-zombitehnologia/a-65464842?maca=ukr-rss-ukr-all-1496-rdf>
 12. Юліна Ю. Україна планує збудувати десять малих модульних реакторів // Еспресо, 9 грудня, 2024. URL: <https://espreso.tv/energetyka-ukraina-planue-zbuduvati-desyat-malikh-modulnih-reaktoriv>
 13. Liou J. What are Small Modular Reactors (MMPs)? // IAEA. 2021. November 4. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-MMPs>
 14. Малі модульні реактори: новий ринок який треба заблокувати для росії // ДІКІ ГРУП. 2024. 19 грудня. 18 с. URL: <https://dixigroup.org/analytic/mali-modulni-reaktory-novyj-rynok-yakij-treba-zablokovaty-dlya-rosiji>
 15. Малогулко Ю. В., Сліденко М. О. Перспективи впровадження технологій використання малих модульних реакторів // Матеріали ІІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ. Вінниця, 20–22 берез. 2024 р. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feem/all-feem-2024/paper/view/19751>
 16. Stevanka K., Chvala O. Deployment of small modular reactors in the European Union. *NST Open Research*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.12688/nuclscitechnolopenres.17510.1>
 17. Vakarelska R. Europe / Ahead Of Brussels Summit, Experts Outline Key Challenges For Small Modular Reactor Commercialisation, 14 March 2024. URL: <https://www.nucnet.org/news/ahead-of-brussels-summit-experts-outline-key-challenges-for-small-modular-reactor-commercialisation-3-4-2024>
 18. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). International Atomic Energy Agency. 2022. 415 p. URL: https://aris.iaea.org/Publications/MMP_booklet_2022.pdf
 19. Тарасовський Ю. «Енергоатом» та американська Holtec підписали угоду про виробництво компонентів малих модульних реакторів // Forbes. 2024. 17 квітня. URL: <https://forbes.ua/news/energoatom-ta-amerikanska-holtec-pidpisali-ugodu-pro-virobnitstvo-komponentiv-malikh-modulnih-reaktoriv-17042024-20599>
 20. Projected Costs of Generating Electricity 2020. NEA/IEA. Paris: OECD Publishing, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1787/a6002f3b-en>
 21. Operating Reactors. United States Nuclear Regulatory Commission. URL: <https://www.nrc.gov/reactors/operating.html>

REFERENCES

"Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)", International Atomic Energy Agency. 2022. https://aris.iaea.org/Publications/MMP_booklet_2022.pdf

"Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems (the INPRO Methodology)". International Atomic Energy Agency. <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/Pages/methodology.aspx>

Ambartsumian, A. "Ukraina ta shche 30 krain pidtvrdyli kurs na rozvytok atomnoi enerhetyky: pidsumky SOR29" [Ukraine and 30 Other Countries Have Confirmed the Course for the Development of Nuclear Energy: The Results of SOR29]. Comments.ua. December 1, 2024. <https://society.comments.ua/ua/news/developments/ukraina-ta-sche-30-krain-pidtvrdili-kurs-na-rozvitok-atomnoi-energetiki-pidsumki-sor29-750672.html>

Boarin, S., and Ricotti, M. E. "An Evaluation of MMR Economic Attractiveness". *Science and Technology of Nuclear Installations*, August 05 (2014).

DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/803698>

Bryan, H. C. et al. "Remote nuclear microreactors: a preliminary economic evaluation of digital twins and centralized offsite control". *Reactor System Design and Analysis, Systems Science & Engineering*. 2023. <https://www.frontiersin.org/journals/nuclear-engineering/articles/10.3389/fnuen.2023.1293908/full>

Dybach, O. M. et al. "Otsinka ekonomichnykh pokaznykiv reaktornykh ustanovok, perspektivnykh dlia budivnytstva v Ukraini, ta yikh spivstavlennia z vidnovliuvalnymy dzhherelamy enerhii iz zastosuvanniam instrumentarii MAHATE" [Evaluation of the Economic Indicators of Reactor Facilities Promising for Construction in Ukraine and Their Comparison with Renewable Energy Sources Using the IAEA Toolkit]. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, no. 3(99) (2023): 16-30.

DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3\(99\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3(99).02)

Economic assessment of the long-term operation of nuclear power plants: approaches and experience. IAEA Nuclear Energy series No. NP-T-3.25. International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA, 2018.

Ekinici, F. et al. "The Future of Microreactors: Technological Advantages, Economic Challenges, and Innovative Licensing Solutions with Blockchain". *Applied Sciences*, vol. 14 (15) (2024).

DOI: <https://doi.org/10.3390/app14156673>

Hee, N. V., Peremans, H., and Nimmegeers, P. "Economic potential and barriers of small modular reactors in Europe". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 203 (2024).

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114743>

Liou, J. "What are Small Modular Reactors (MMRs)?" IAEA. November 4, 2021. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-MMPs>

"Mali modulni reaktory: novyi rynek yakyy treba zablokovaty dlia rosii" [Small Modular Reactors: a New Market That Must Be Blocked for Russia]. DIKSI HRUP. December 19, 2024. <https://dixigroup.org/analytic/mali-modulni-reaktory-novyy-rynok-yakyy- treba-zablokovaty-dlya-rosiyi>

Malohulko, Yu. V., and Slidenko, M. O. "Perspektyvy vprovadzhennia tekhnolohii vykorystannia malykh modulnykh reaktoriv" [Prospects for the Introduction of Technologies for the Use of Small Modular Reactors]. Materialy LIII naukovo-tekhnicnoi konferentsii pidrozdiliv VNTU. Vinnytsia. March 20-22, 2024. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2024/paper/view/19751>

Mignacca, B., and Locatelli, G. "Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 118 (2020).

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109519>

"Operating Reactors". United States Nuclear Regulatory Commission. <https://www.nrc.gov/reactors/operating.html>

Projected Costs of Generating Electricity 2020. NEA/IEA. Paris: OECD Publishing, 2020.

DOI: <https://doi.org/10.1787/a6002f3b-en>

Steigerwald, B. et al. "Uncertainties in estimating production costs of future nuclear technologies: A model-based analysis of small modular reactors". *Energy*, vol. 281 (2023).

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128204>

Stevanka, K., and Chvala, O. "Deployment of small modular reactors in the European Union". *NST Open Research* (2024).

DOI: <https://doi.org/10.12688/nuclscitechnolopenres.17510.1>

Tarasovsky, Yu. "«Enerhoatom» ta amerykanska Holtec pidpysaly uhodu pro vyrobnytstvo komponentiv malykh modulnykh reaktoriv" ["Energoatom" and the American Holtec Signed an Agreement on the Production of Components for Small Modular Reactors]. *Forbes*. April 17, 2024. <https://forbes.ua/news/energoatom-ta-amerikanska-holtec-pidpysali-ugodu-pro-virobnitstvo-komponentiv-malikh-modulnikh-reaktoriv-17042024-20599>

Teize, Ye. "Mali yaderni reaktory: proryv chy zombi-tekhnolohiia?" [Small Nuclear Reactors: Breakthrough or Zombie Technology?]. *DW*. April 28, 2023. <https://www.dw.com/uk/mali-aderni-reaktori-dla-ukraini-tehnologicnij-proryv-ci-zombitehnologia/a-65464842?maca=ukr-rss-ukr-all-1496-rdf>

Vakarelska, R. "Europe". Ahead Of Brussels Summit, Experts Outline Key Challenges for Small Modular Reactor Commercialisation. March 14, 2024. <https://www.nucnet.org/news/ahead-of-brussels-summit-experts-outline-key-challenges-for-small-modular-reactor-commercialisation-3-4-2024>.

Yulina, Yu. "Ukraina planue zbuduvaty desiat malykh modulnykh reaktoriv" [Ukraine Plans to Build Ten Small Modular Reactors]. *Espreso*. December 9, 2024. <https://espreso.tv/energetyka-ukraina-planue-zbuduvati-desyat-malikh-modulnikh-reaktoriv>

Стаття надійшла до редакції 03.12.2024 р.
Статтю прийнято до публікації 23.12.2024 р.