

Є. М. Неаронов<sup>1</sup>, Т. Ю. Байбузенко<sup>1</sup>, В. Я. Шендерович<sup>2</sup>, М. І. Власенко<sup>3</sup>,  
О. В. Годун<sup>3</sup>, В. М. Кир'янчук<sup>3</sup>, Г. Р. Семенов<sup>3</sup>, Л. І. Громок<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект»,  
просп. Перемоги, 4, Київ, 0113, Україна

<sup>2</sup> Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки, вул. Василя Стуса, 35–37, Київ, 03142, Україна

<sup>3</sup> Відокремлений підрозділ «Науково-технічний центр» ДП «НАЕК «Енергоатом», вул. Гоголівська, 22–24, Київ, 01054, Україна

## Дослідження вибору реакторної технології для будівництва заміщуючих та нових енергоблоків АЕС в Україні після 2035 р.

### Ключові слова:

KIND,  
INPRO,  
багатокритеріальне оцінювання,  
реакторна технологія.

Побудовано алгоритм вибору типу реакторної технології на основі порівняльного оцінювання існуючих і перспективних реакторів. Проведено формування якісних та кількісних критеріїв. Адаптовано інструментарій KIND-ET проекту Міжнародного агентства з атомної енергії INPRO з багатокритеріального порівняльного оцінювання АЕС для ранжування отриманих результатів. Проведено аналіз чутливості отриманих результатів до зміни чисельних значень та ваги критеріїв оцінювання. Представлено методологію та пропозиції щодо вибору типу реакторної технології для будівництва енергоблоків АЕС в Україні після 2035 р. На підставі виконаного аналізу сформульовано рекомендації щодо вибору пріоритетної реакторної технології для будівництва АЕС в Україні на довгострокову перспективу до 2050 р. заради забезпечення стійкого розвитку ядерної енергетики. Показано, що застосування в Україні реакторів з водою під тиском (PWR), у тому числі модульних реакторів малої потужності (SMR), є найперспективнішим напрямом розвитку атомної енергетики України. Разом з тим для прийняття зваженого рішення щодо типу пріоритетної для умов України реакторної технології необхідним є врахування можливості її застосування для побудови атомної енергетики надалі на рівні сумарної встановленої потужності не нижче наявного. Водночас необхідно провести додаткові дослідження щодо визначення оптимального співвідношення реакторних технологій PWR та SMR в енергетичній системі України з урахуванням перспектив розгортання джерел відновлювальної енергетики.

### Вступ

В Енергетичній стратегії України на період до 2035 р. «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» (далі — Енергетична стратегія) [1], яка визначила стратегічні орієнтири розвитку паливно-енергетичного комплексу України, атомну енергети-

ку визнано одним з найбільш економічно ефективних низьковуглецевих джерел енергії, а подальший розвиток ядерного енергетичного сектора на період до 2035 р. прогнозується з огляду на те, що частка атомної генерації в загальному обсязі виробництва електроенергії зберігатиметься на тому самому рівні. Частка електроенергії АЕС у період 2017–2019 р. ста-

© Є. М. Неаронов, Т. Ю. Байбузенко, В. Я. Шендерович, М. І. Власенко,  
О. В. Годун, В. М. Кир'янчук, Г. Р. Семенов, Л. І. Громок, 2020

новила приблизно 50–55% від загального обсягу виробництва електроенергії.

На сьогодні розглядаються різні варіанти уточнення положень Енергетичної стратегії до 2035 р. [1], зокрема в рамках так званого зеленого переходу [2]. При цьому передбачається, що частка АЕС у загальному енергобалансі ймовірно залишатиметься на значному рівні. Нині встановлена потужність АЕС України становить 13,835 ГВт і включає 15 енергоблоків із водо-водяними енергетичними реакторами (ВВЕР). Зважаючи на те, що практично всі енергоблоки АЕС було введено в експлуатацію в період 1980–1990 рр., ведеться робота з подовження строку їхньої експлуатації.

Водночас у період 2030–2040 р. можна очікувати завершення строку експлуатації деяких енергоблоків АЕС із продовженим строком експлуатації. З урахуванням цього та враховуючи тривалість створення ядерної установки, актуальним є завдання своєчасного вибору типу реакторної технології для будівництва заміщуючих та нових енергоблоків АЕС. Передбачається, що вибір типової реакторної технології дозволить оптимізувати процеси ліцензування, фінансування, будівництва та експлуатації атомних енергоблоків в Україні.

Результати цього дослідження отримано в рамках розробки довгострокової програми розвитку ядерної енергетики України, що є одним із завдань Енергетичної стратегії [1].

### Цілі та формулювання завдання

Основною метою роботи є вибір типової реакторної технології, яку буде застосовано для будівництва заміщуючих та нових енергоблоків АЕС для забезпечення сталого розвитку ядерної енергетики України після 2030 р. При цьому необхідним є врахування національних нормативних вимог із забезпечення безпечної експлуатації АЕС, наявної інфраструктури експлуатації АЕС та поведіння з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП), національного бачення розвитку ядерної енергетики в об'єднаній енергетичній системі України та світових трендів розвитку ядерних технологій та ядерно-паливного циклу (ЯПЦ).

Для досягнення цілей дослідження сформульовано такі завдання:

- 1) формування алгоритму проведення багатокритеріального порівняльного оцінювання реакторних технологій на основі показових представників реакторних установок;
- 2) формування критеріїв порівняльного оцінювання реакторних установок для аналізу;
- 3) проведення порівняльного багатокритеріального оцінювання реакторних установок;
- 4) проведення аналізу чутливості отриманих результатів порівняльного оцінювання реакторних установок до зміни вагових функцій;
- 5) визначення раціонального варіанта реакторної технології.

### Методичні підходи та використані припущення

Проведення порівняльного оцінювання реакторних технологій для вибору типу нових або заміщуючих енергоблоків АЕС потребує детального оцінювання відмінностей в їхніх ключових параметрах. Інформація з бази даних Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) ARIS<sup>1</sup> [3] не дає змоги виконати порівняння технологій за параметрами, що впливають на прийняття рішення щодо типу реакторної технології. Досвід виконання проектів МАГАТЕ зі всебічного аналізу інноваційних реакторів та ЯПЦ у рамках проекту INPRO<sup>2</sup> [4] демонструє покращення результатів оцінювання під час розгляду конкретних техніко-економічних даних. На цьому етапі отримання конкретних даних щодо реакторних технологій у постачальників таких технологій є проблематичним. Таким чином, порівняльне оцінювання типів реакторних технологій доцільно виконати експертним шляхом із використанням методу багатокритеріального аналізу.

Під час визначення типів реакторних технологій для застосування в Україні в цій роботі прийнято до розгляду реакторні технології, що мають у світі найбільше розповсюдження та/або найбільший досвід експлуатації. При цьому розглядаються технології як ті, що експлуатуються, так і ті, що розробляються як еволюційні від найбільш поширених типів реакторних технологій.

З огляду на світовий досвід з розвитку ядерної енергетики, для умов України порівняльне оцінюван-

<sup>1</sup>The Advanced Reactor Information System.

<sup>2</sup>International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles, IAEA (Міжнародний проект з інноваційних ядерних реакторів та паливних циклів, МАГАТЕ).

ня проводиться шляхом розгляду реакторів водно-водяних під тиском — PWR (pressurised water reactor), на киплячій воді — BWR (boiling water reactor) та на важкій воді — HWR (heavy water reactor). У табл. 1 наведено перелік перспективних реакторних технологій, що пропонуються на світовому ринку та можуть розглядатися під час виконання порівняльного оцінювання.

**Таблиця 1. Перелік перспективних реакторів у складі відповідних реакторних технологій**

Тип	Діапазон електричної потужності, МВт		
	<300	300–700	>700
PWR	SMR-160 (Holtec Int., США); NuScale (NuScale Power, LLC, США)	–	AP1000 (Westinghouse, США); APR-1400 (KEPCO, П. Корея); Hualong-1 (HPR1000, Китай); EPR (Франція, Areva); АТМЕА-1 (Areva/MHI, Франція/Японія); ВВЕР-1200 (ФГУП «Гідропрес», РФ)
BWR	–	–	ABWR (GE-HITACHI, США); ESBWR (GE Hitachi Nuclear Energy, США/Японія)
HWR	–	EC-6 (AECL, Канада)	–

Під час порівняльного оцінювання реакторних технологій доцільно враховувати, зокрема, такі аспекти: відповідність реакторної технології міжнародним нормам з безпеки та критеріям WENRA<sup>3</sup>, EUR<sup>4</sup>, МАГАТЕ, а також співставність із вимогами нормативної документації України з ядерної та радіаційної безпеки; економічність, надійність, можливість експлуатації енергоблоків АЕС у різних режимах; залучення енергоблоків АЕС до забезпечення умов надійного функціонування об'єднаної енергетичної системи України; можливість надійного забезпечення ядерним паливом з урахуванням власних запасів урану, дивер-

сифікації постачальників і виробників, можливості локалізації окремих етапів виробництва;

забезпечення режиму нерозповсюдження відповідно до законодавства та міжнародних зобов'язань України;

можливість серійного будівництва та подальшої експлуатаційної підтримки парку енергоблоків, локалізації виробництва їхніх систем та компонентів;

умови та перспективи ЯПЦ, в якому працює наявний в Україні парк енергоблоків.

Формування інформації з експлуатаційних параметрів реакторних установок, на основі яких буде проведено порівняльне оцінювання реакторних технологій, виконано з використанням відкритих джерел інформації: інформаційної база даних МАГАТЕ ARIS, даних NRC<sup>5</sup> [5] та General Nuclear System [6].

### **Визначення основних напрямів і критеріїв оцінювання**

У роботі [7] наведено пропозиції з формування критеріїв вибору проектів нових енергоблоків АЕС для України. Перелік критеріїв враховує необхідність тісної співпраці з можливими постачальниками реакторів для отримання відповідної проектно-інформації, що в контексті визначення стратегічних напрямів розвитку ядерної енергетики здається передчасним. Постає питання щодо використання відкритої інформації з авторитетних видань для проведення всебічного порівняльного оцінювання за напрямками, що передбачають аналіз параметрів безпеки, технічних показників, референтності, загальних критеріїв, впливу на персонал, інфраструктурних показників і параметрів, що характеризують відповідний ЯПЦ, які в сукупності складають так звані області оцінювання. Наведені параметри згруповані за напрямками «Вартість», «Технічні характеристики» та «Прийнятність», які складають цілі порівняльного оцінювання верхнього рівня.

Така градація показників дозволяє застосувати для ранжування результатів порівняльного багатокритеріального оцінювання реакторів інструментарій МАГАТЕ KIND-ET<sup>6</sup>, розроблений у рамках

<sup>3</sup> Western European Nuclear Regulators Association (Асоціація регуляторів Західної Європи/Західноєвропейська асоціація органів регулювання ядерної безпеки).

<sup>4</sup> European Utility Requirements (Вимоги європейських експлуатуючих організацій).

<sup>5</sup> United States Nuclear Regulatory Commission (Комісія з ядерного регулювання США).

<sup>6</sup> Kind-Evaluation Tool. Теорія багатокритеріального оцінювання для проекту INPRO для ключових показників інноваційних систем ядерної енергії.

проекту MAGATE KIND (Key Indicators for Innovative Nuclear Energy Systems) [8, 9]. Оцінювання проводиться з використанням теорії багатокритеріального аналізу (MAVT<sup>7</sup>), реалізованої в середовищі Excel. KIND-ET — розрахунковий інструмент порівняльного оцінювання перспектив і ризиків, пов'язаних із розробкою та реалізацією ядерних технологій і відповідних ЯПЦ. KIND-ET дає змогу оцінити переваги й недоліки порівнюваних ядерних технологій та визначити їхню загальну оцінку з урахуванням технічної та економічної ефективності ЯПЦ.

Для проведення аналізу за цілями верхнього рівня та областями оцінювання сформовано перелік із 26 критеріїв. Більша їх кількість дає змогу виконати всебічний порівняльний аналіз саме реакторних технологій, враховуючи значну кількість техніко-економічних параметрів, що характеризують реактор, а також необхідність врахування додаткових факторів, що характеризують ЯПЦ та вплив на навколишнє середовище та людину. Перелік критеріїв сформовано на основі WENRA, EUR, методології MAGATE INPRO [10] та нормативної документації України. Структурований трирівневий перелік критеріїв для оцінювання енергоблоків наведено в табл. 2.

**E1** — *вартість будівництва, у тому числі основних об'єктів на промайданчику, USD/кВт*

Головним проблемним питанням під час реалізації проекту будівництва АЕС є величина капіталовкладень у розрахунку на 1 кВт установленної потужності. Кращим вважається проект енергоблока, що відповідає найменшому розміру капіталовкладень на 1 кВт установленної електричної потужності. Критерій є кількісним.

**E2** — *можливість розміщення заміщуючих потужностей на майданчиках діючих АЕС*

Критично важливою для скорочення строків та вартості будівництва є наявність готової промислової інфраструктури на майданчиках діючих АЕС. Критерій є якісним. Оцінювання на відповідність критерію виконувалося на основі експертного судження за шкалою 1–2, де оцінка 2 означає таку можливість, тоді як 1 — відсутність такої можливості.

**E3** — *приведена тривалість будівництва на майданчику, міс/МВт*

Важливим критерієм для зниження вартості та ризиків реалізації проекту будівництва АЕС є скорочення тривалості й оптимізація графіка будівни-

цтва за рахунок, у тому числі, удосконалених методів будівництва та монтажу. За цим критерієм виконувалося кількісне оцінювання шляхом порівняння тривалості будівництва, віднесеного до встановленої потужності енергоблока. Критерій є кількісним. Кращий варіант відповідає меншому значенню критерію.

**E4** — *використання принципу стандартизації будівництва*

Критерій впливає на загальні капітальні витрати на будівництво АЕС. За деякими оцінками економія капітальних витрат від застосування принципу стандартизації та серійного будівництва, залежно від країни та кількості однотипних блоків у серії, може сягати від 15 до 40 %, тоді як економія від застосування методів модульного будівництва оцінюється в розмірі 1,4–4,0 %. Очевидно, що економія досягається також за рахунок будівництва декількох енергоблоків на одному майданчику.

Критерій E4 якісно оцінюється за трибальною шкалою 1–3, причому кращому з варіантів відповідає оцінка 3, гіршому — 1.

**E5** — *використання принципу модульного будівництва*

Вплив цього критерію на оцінювання реакторних установок подібний до впливу критерію E4. Таким чином, критерій впливає на загальні капітальні витрати на будівництво АЕС. Разом з тим використання принципу модульності дозволяє зменшити загальний час будівництва енергоблока, що, у свою чергу, веде до економії загальних витрат на будівництво енергоблоків. Критерій дає змогу врахувати можливість будівництва АЕС великої потужності з окремих модулів, які є блоками малої потужності.

Критерій E5 якісно оцінюється за трибальною шкалою 1–3, де кращому з варіантів відповідає оцінка 3, гіршому — 1.

**E6** — *об'єм участі національної промисловості та національних організацій, %*

Цей кількісний критерій суттєво впливає на остаточну вартість будівництва АЕС. Об'єм участі національних організацій оцінений на основі експертних суджень. Кращий варіант відповідає більшому значенню критерію.

**E7** — *питоме споживання природного урану, кг/кВт·доба*

Цей критерій характеризує ефективність використання ресурсів природного урану в розрахунку на 1 кВт·доба виробленої електроенергії. Менше значення

<sup>7</sup> A multi-attribute value theory (теорія багатозначних атрибутів).

Таблиця 2. Структурований тривірневий перелік критеріїв для оцінювання енергоблоків

Ціль верхнього рівня	Напрямок оцінювання	Назва критерію	Позначення критерію	
Вартість	Економіка	Вартість будівництва, у тому числі основних об'єктів на проммайданчику, USD/кВт	E1	
		Можливість розміщення заміщуючих потужностей на майданчиках діючих АЕС	E2	
		Приведена тривалість будівництва на майданчику, міс/МВт	E3	
		Використання принципу стандартизації будівництва	E4	
		Використання принципу модульного будівництва	E5	
		Об'єм участі національної промисловості та національних організацій, %	E6	
		Питоме споживання природного урану, кг/кВт·доба	E7	
Технічні характеристики	Безпека	Частота пошкодження активної зони (CDF), 1/реактор·рік	S1	
		Частота великого викиду радіоактивності (LRF), 1/реактор·рік	S2	
		Філософія безпеки, включно з поєднанням активних і пасивних систем із пріоритетом пасивних систем безпеки	S3	
		Наявність спецзаходів із запобігання важких аварій та обмеження їхніх наслідків	S4	
		Період відтермінування до втручання оператора, год	S5	
		Сейсмостійкість, у частках g	S6	
	Технічні показники		ККД енергоблока брутто, %	P1
			Коефіцієнт готовності, %	P2
			Маневрені характеристики (глибина розвантаження), %	P3
			Проектний термін експлуатації енергоблока, років	P4
	Референтність		Кількість побудованих та таких, що перебувають в експлуатації	R1
			Кількість енергоблоків, що будуються, та тих, що заплановані до будівництва	R2
			Співставність реакторної технології з тією, що використовується нині в Україні в частині власне АЕС	R3
Прийнятність	Загальний критерій	Співставність з вимогами ядерної та радіаційної безпеки України	G1	
	Вплив на персонал	Величина дозового навантаження на експлуатаційний персонал, люд.-Зв/реактор·рік	EN1	
	Інфраструктура	Логістика в частині транспортування важких вантажів (можливість доставки різними видами транспорту)	I1	
		Необхідність створення спеціальної інфраструктури відповідно до вимог реакторних технологій	I2	
	Взаємозв'язок з ЯПЦ	Можливість використання наявної інфраструктури «переднього краю» з урахуванням дій, що плануються на сьогодні	N1	
		Можливість використання наявної (створюваної) інфраструктури з поводження з ВЯП	N2	

критерію відповідає більшій ефективності реакторної технології. Значення цього кількісного критерію визначається на основі розрахунків з використанням вихідних даних щодо збагачення й темпу вигорання палива, коефіцієнта використання встановленої потужності енергоблока та його коефіцієнта корисної дії (ККД).

**S1** — оцінене значення частоти важкого пошкодження активної зони,  $1/\text{реактор} \cdot \text{рік}$

Один із головних критеріїв безпеки. Значення критерію приймалося за даними постачальників реакторних технологій, наявних у відкритому доступі. Кращий варіант відповідає меншому значенню критерію.

**S2** — значення частоти граничного аварійного викиду радіоактивності,  $1/\text{реактор} \cdot \text{рік}$

Один із головних критеріїв безпеки. Значення критерію приймалося за даними постачальників реакторних технологій, наявних у відкритому доступі. Кращий варіант відповідає меншому значенню критерію.

**S3** — філософія безпеки, включно з поєднанням активних і пасивних систем із пріоритетом пасивних систем безпеки

Для якісного оцінювання варіантів застосовувалася шкала 1–3, вищий бал відповідає кращому варіанту.

**S4** — наявність спецаходів із запобігання важких аварій та обмеження їхніх наслідків

Для якісного оцінювання варіантів застосовувалася трибальна шкала 1–3, вищий бал відповідає кращому варіанту. Це якісний критерій, що базується на експертних судженнях, сформованих з огляду на дані постачальника реакторної технології.

**S5** — період відтермінування на втручання оператора, год

Проекти мають бути виконані таким чином, щоб усі необхідні дії в межах цього часу від початку аварії були автоматизовані.

Для кількісного оцінювання варіантів застосовувалися натуральні величини тривалості заборони в годинах. Кращий варіант відповідає більш довгій затримці на дію оператора енергоблока. Це критерій кількісного типу та базується на даних постачальника реакторної технології.

**S6** — сейсмостійкість, у частках  $g$

Кількісний критерій, що визначає величину пікового прискорення на поверхні ґрунту, при досягненні якого не перевищуються межі безпечної експлуатації. Значення критерію приймалося за даними постачальників реакторних технологій, наявних у відкритому доступі. Кращий варіант відповідає більшому значенню критерію.

**P1** — ККД енергоблока бруто, %

ККД енергоблока є одним з основних кількісних показників досконалості та економічної ефективності термодинамічного циклу енергоблока й безпосередньо впливає на витрату ядерного палива. Більше значення ККД відповідає кращому варіанту. Це критерій кількісного типу, що базується на даних постачальника реакторної технології.

**P2** — коефіцієнт готовності, %

Є одним з основних факторів готовності енергоблока до несення навантаження під час його експлуатації протягом календарного року. Чим більший цей коефіцієнт, тим кращі експлуатаційні характеристики має енергоблок. Це критерій кількісного типу, що базується на проектних даних постачальника реакторної технології.

**P3** — маневрені характеристики (глибина розвантаження), %

Маневрені характеристики сучасного енергоблока, що працює в розгалуженій енергосистемі, яка складається з джерел генерації різних типів, у тому числі з відновлюваних джерел енергії, характеризуються глибиною та швидкістю розвантаження та навантаження. Енергоблок, технічні характеристики якого дають змогу проводити навантаження/розвантаження з потрібною швидкістю в часи нічних провалів енергоспоживання в системі, має переваги перед енергоблоками, що стабільно працюють у базовому режимі. Чим більший процент розвантаження дозволяє енергоблок, тим краще він відповідає цьому критерію.

**P4** — проектний термін експлуатації енергоблока, роки

Енергоблоки, розраховані на довгострокові терміни експлуатації, більш ефективні економічно. Тому чим більший термін експлуатації має енергоблок, тим краще він задовольняє вимогам цього критерію. Це критерій кількісного типу, що базується на даних постачальника реакторної технології.

**R1** — кількість побудованих енергоблоків та тих, що перебувають в експлуатації

У рамках напряму оцінювання «референтність» критерій R1 є показником того, наскільки перевіреним з точки зору експлуатаційних характеристик, надійності та зрілості проекту є енергоблок такого типу. Чим більше у світі побудовано таких енергоблоків, тим краще він відповідає критерію. Це критерій кількісного типу, що базується на статистичних даних.

**R2** — кількість енергоблоків, що будуються, та тих, що заплановані до будівництва

Ще одним критерієм у складі цього напрямку в сукупності з R1 є критерій R2, що відображає думку користувачів реакторних технологій щодо позитивних перспектив використання енергоблока. Чим більше користувачів у світі пов'язують розвиток атомної енергетики своїх країн з енергоблоками цього типу, тобто будують чи планують будувати такі енергоблоки, тим більшим є рівень їхньої впевненості в його надійності, високих експлуатаційних якостях і тим меншими є сумніви щодо ймовірності виникнення проблем. Це критерій кількісного типу, що базується на статистичних даних.

**R3** — співставність реакторної технології з тою, що використовується в Україні

Легкість в освоєнні нової реакторної технології залежить від ступеня її співставності з тією, щодо якої вже накопичений позитивний досвід використання. У складі цього дослідження альтернативні технології експертно оцінювалися на їхню співставність із технологією ВВЕР за трибальною шкалою 1-3.

**G1** — співставність із регуляторними вимогами України

Успішне ліцензування нової реакторної технології в Україні, яку уособлює конкретна модель енергоблока, що належить до цієї технології, залежить від ступеня співставності його проекту з регуляторними вимогами. У складі цього дослідження альтернативні технології експертно оцінювалися на їхню співставність із вимогами ядерної та радіаційної безпеки України за трибальною шкалою 1-3.

**EN1** — величина дозового навантаження на експлуатаційний персонал, люд.-Зв/реактор · рік

Це кількісний критерій, оцінювання якого виконувалося на базі вихідних даних, наданих постачальником реакторної технології. Краща оцінка відповідає меншому значенню цієї величини, тобто меншому дозовому навантаженню на персонал АЕС.

**П** — логістика в частині транспортування важких вантажів (можливість доставки різними видами транспорту)

Це якісний критерій, оцінювання якого за шкалою 1-3 базується на експертному судженні щодо співставності транспортних габаритів основних елементів і частин реактора й турбіни з розмірами залізничних та автомобільних платформ.

**I2** — необхідність створення спеціальної інфраструктури з огляду на вимоги реакторної технології

Це критерій якісного типу, який експертно оцінюється за шкалою 1-3. Вищу оцінку має технологія, для якої немає потреби у створенні спеціальної до-

даткової інфраструктури, а можна з різним ступенем пристосованості користуватися вже наявною.

**N1** — можливість використання наявної інфраструктури «переднього краю» з урахуванням дій, що плануються на сьогодні

Це критерій якісного типу, якій експертно оцінювався за шкалою 1-3. Вищу оцінку має технологія, для якої є можливість використання наявної інфраструктури «переднього краю» з урахуванням запланованих дій, у тому числі з будівництва заводу для виробництва ядерного палива.

**N2** — можливість використання наявної (створюваної) інфраструктури з поводження з ВЯП

Це критерій якісного типу, який експертно оцінювався за шкалою 1-3. Вищу оцінку має технологія, яка надає можливість використання наявної інфраструктури «переднього краю» ЯПЦ з урахуванням, зокрема, і будівництва централізованого сховища ВЯП тощо.

Грунтуючись на національних пріоритетах із забезпечення розвитку ядерної енергетики, беручи до уваги необхідність безумовного забезпечення безпечної експлуатації енергоблоків АЕС та мінімізацію впливу на навколишнє середовище та людину, сформовано значення вагових коефіцієнтів для цілей верхнього рівня, областей оцінювання та критеріїв (табл. 3).

Багатокритеріальний аналіз виконано шляхом бального оцінювання кількісних та якісних показників реакторної технології згідно з рекомендаціями KIND [8, 9].

Для параметрів, що не мають чисельного значення або для яких немає достовірної інформації, застосовувалось оцінювання в діапазоні 1-3 бали. Найвищу оцінку давали за наявності достатньої достовірної інформації щодо відповідності до регуляторних національних вимог, рекомендацій WENRA, EUR тощо, оцінка 2 відповідала судженню на основі аналогів, оцінка 1 була дана в разі відсутності інформації за конкретним параметром.

Для порівняльного аналізу кількісні та якісні оцінки нормувались у діапазоні 0-1.

Результати порівняльного оцінювання реакторів з урахуванням вагових коефіцієнтів, наведених у табл. 3, розраховано за допомогою інструментарію KIND-ET і представлено на рис. 2.

Порівняльне оцінювання реакторів за цілями верхнього рівня наведено на рис. 3, за областями оцінювання — на рис. 4.

Слід відзначити, що модульні реактори малої потужності (SMR, small modular reactor) отримали

Таблиця 3. Вагові коефіцієнти

Ціль високого рівня	Ваговий коефіцієнт цілей високого рівня	Область/ напрям оцінювання	Ваговий коефіцієнт областей оцінювання	Позначення критерію	Ваговий коефіцієнт критеріїв	Остаточний ваговий коефіцієнт
Вартість	0,3	Економіка	1	E1	0,2	0,060
				E2	0,2	0,060
				E3	0,2	0,060
				E4	0,1	0,030
				E5	0,1	0,030
				E6	0,1	0,030
				E7	0,1	0,030
Технічні характеристики	0,5	Безпека	0,5	S1	0,2	0,050
				S2	0,2	0,050
				S3	0,1	0,025
				S4	0,2	0,050
				S5	0,2	0,050
				S6	0,1	0,025
		Технічні показники	0,3	P1	0,3	0,045
				P2	0,2	0,030
				P3	0,3	0,045
				P4	0,2	0,030
		Референтність	0,2	R1	0,2	0,020
				R2	0,3	0,030
				R3	0,5	0,050
Прийнятність	0,2	Загальний критерій	0,35	G1	1	0,070
				EN1	1	0,030
		Вплив на персонал	0,15	I1	0,3	0,018
				I2	0,7	0,042
		Інфраструктура	0,3	N1	0,5	0,020
				N2	0,5	0,020
Зв'язок з ЯПЦ	0,2					

високі інтегральні оцінки в першу чергу завдяки їхнім високим оцінкам за цілями верхнього рівня «Технічні характеристики» і «Прийнятність». За «Вартістю» (напрямок «Економіка») вони з оцінками 0,228 (NuScale) і 0,204 (SMR-160) упритул наближаються до найкращого за цим параметром представника технології PWR — Hualong-1 (0,234), тоді як за напрямками «Безпека», «Технічні показники», що входять до цілі «Технічні характеристики», вони з однаковою оцінкою 0,340 суттєво випереджають більшість реакторних технологій. Кращі представники технології PWR

(EPR-1650 та AP1000) за цією ціллю отримали 0,317 і 0,306 відповідно. За ціллю «Прийнятність» найкращу оцінку має реактор ВВЕР-1200-0,189, за яким ідуть реактори технології SMR з оцінками 0,151 (SMR-160) і 0,156 (NuScale). Діапазон коливання рейтингових інтегральних оцінок реакторів технології BWR становить від 0,388 (ABWR) до 0,461 (ESBWR).

Реактори технології BWR «поступилися» реакторам PWR головним чином за рахунок нижчих оцінок, отриманих у рамках цілей верхнього рівня «Прийнятність» (значно нижче решти реакторних технологій),



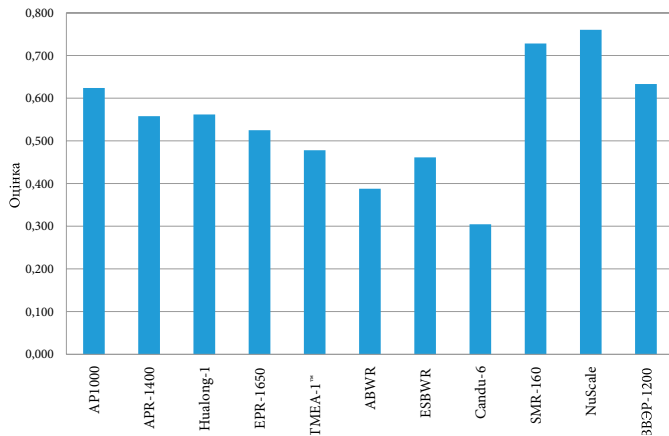


Рис. 2. Результати ранжування

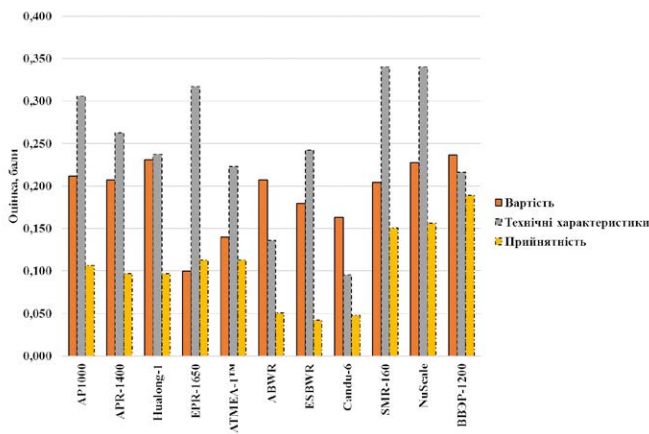


Рис. 3. Результати ранжування реакторних технологій за цілями верхнього рівня

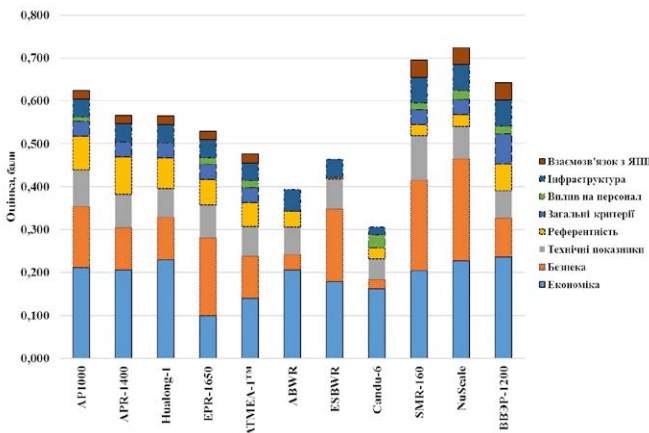


Рис. 4. Результати ранжування реакторних технологій за областями оцінювання (Ranking results of reactors by Evaluation Areas)

«Технічні характеристики» (нижче більшості реакторних технологій) і «Вартість» (теж нижче більшості реакторних технологій). У свою чергу низькі оцінки

технології BWR за цілями «Прийнятність» і «Технічні характеристики» зумовлені впливом низьких оцінок за напрямками «Взаємозв'язок з ЯПЦ» і «Загальні критерії», які входять до цілі верхнього рівня «Прийнятність», а також за напрямком «Референтність» (входить до цілі верхнього рівня «Технічні характеристики»).

Реактор CANDU-EC6 за набором критеріїв, установлених з урахуванням умов України, отримав найнижчу інтегральну оцінку — 0,305. При цьому він виявився гіршим за цілями верхнього рівня «Прийнятність» — 0,048 і «Технічні характеристики» — 0,095, що зумовлено критично низькими оцінками, отриманими реактором за напрямками «Взаємозв'язок з ЯПЦ» — 0, «Безпека» — 0,021, «Інфраструктура» — 0,018 (див. ранжування на рис. 3 та 4).

Порядок розташування реакторних технологій за результатами інтегрального оцінювання (від вищих до нижчих) у рамках базового сценарію виявився таким: SMR → PWR → BWR → CANDU-EC6.

### Аналіз чутливості

Аналіз чутливості в рамках дослідження проведено для двох сценаріїв.

Аналіз чутливості 1 — проаналізовано вплив на результати оцінювання зміни одночасно двох критеріїв — E1 «Вартість будівництва» (USD/кВт) та E3 «Приведена тривалість будівництва» (міс/МВт) (модифікований сценарій 1). Як свідчить світова практика, саме ці критерії у своїй сукупності та взаємозв'язку найбільше впливають на життєздатність і успішність реалізації проекту будівництва АЕС. При цьому був проаналізований вплив на результати оцінювання одночасної зміни значень цих критеріїв у менший бік. Слушно припустити, що вартість будівництва енергоблоків в умовах України буде нижчою, ніж за кордоном, вона залежить від об'єму національної участі/локалізації, який потрібно визначати окремо для кожного з енергоблоків, що виходить за межі цього дослідження. Зміну критеріїв E1 та E3 для базового сценарію та модифікованого сценарію 1 наведено в табл. 5.

Аналіз чутливості 2 — виконано зміну значень вагових коефіцієнтів для цілей верхнього рівня (HLO) відповідно до табл. 6 (модифікований сценарій 2).

Результати аналізу чутливості 1 щодо відмінності базового та модифікованого сценаріїв наведено на рис. 5.

На рис. 6 наведено результати аналізу чутливості 2 у порівнянні з базовим сценарієм.

Таблиця 5. Параметри модифікованого сценарію 1 для аналізу чутливості 1

Найменування критерію	Позначення критерію	MIN	MAX	AP1000	APR-1400	ABWR	Candu-E6	SMR-160	NuScale	Hualong-1	EPR-1650	ESBWR	ATMEA-1	BBEP-1200
Вартість будівництва, у тому числі основних об'єктів на майданчику, USD/кВт	E1	3 500	8 760	6 475	4 370	4 500	4 500	4 000	4 385	3 500	5 800	8 200	8 760	4 700
Модифікований сценарій 1		3 000	7 800	3 500	3 800	4 100	3 900	3 700	3 800	3 000	5 000	7 800	6 800	4 600
Тривалість, міс Приведена тривалість будівництва, міс/МВт	E3	<u>48</u> 0,031	36 0,225	<u>72</u> 0,060	<u>72</u> 0,051	<u>48</u> 0,035	<u>57</u> 0,077	<u>17,33</u> 0,108	<u>48</u> 0,067	<u>48</u> 0,041	<u>108</u> 0,065	<u>48</u> 0,031	<u>48</u> 0,044	<u>54</u> 0,046
Модифікований сценарій 1		<u>42</u> 0,031	<u>32</u> 0,100	<u>66</u> 0,055	<u>66</u> 0,047	<u>42</u> 0,031	<u>52</u> 0,070	<u>16</u> 0,100	<u>32</u> 0,044	<u>42</u> 0,036	<u>72</u> 0,044	<u>42</u> 0,027	<u>42</u> 0,038	<u>48</u> 0,041

Таблиця 6. Параметри модифікованого сценарію 2 для аналізу чутливості 2

Ваговий коефіцієнт для цілей верхнього рівня	Вартість,%	Технічні характеристики	Прийнятність,%
Базовий сценарій	30	50	20
Модифікований сценарій 2	50	30	20

У рамках проведеного аналізу чутливості 1 найвищий рейтинг серед енергоблоків, що належать до технології PWR, має реактор AP1000-0,628, за яким іде BBEP-1200 з оцінкою 0,614, за ним ATMEA-1™ — 0,611. Загальний діапазон коливання інтегральних оцінок реакторів технології PWR — від 0,400 (EPR-1650) до 0,628 (AP1000). Реактор APR-1400 отримав оцінку 0,547, Hualong-1 — 0,454. Реактор CANDU-EC6 має рейтинг 0,505. Реактори технології BWR отримали оцінки: ABWR — 0,462, тоді як ESBWR — 0,382.

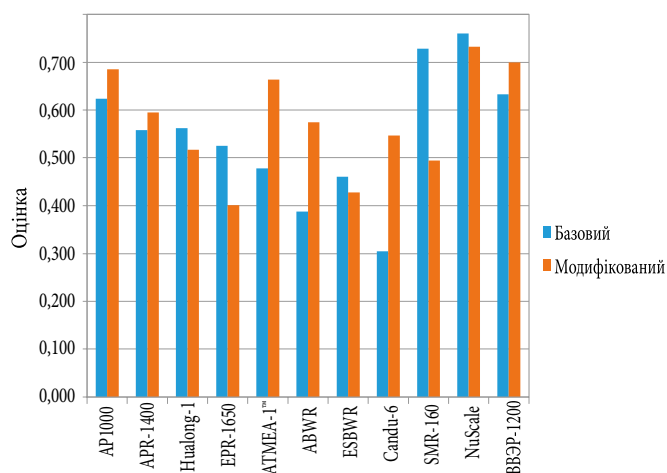


Рис. 5. Співставлення результатів оцінювання за базовим і модифікованим сценарієм 1 (аналіз чутливості 1)

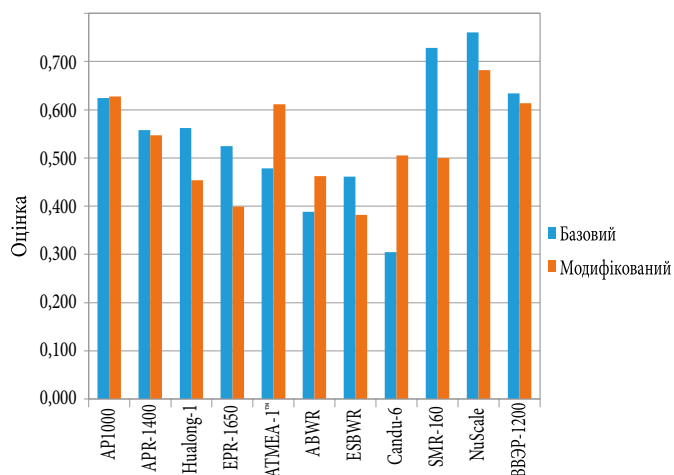


Рис. 6. Співставлення результатів оцінювання за базовим та модифікованим сценарієм 2 (аналіз чутливості 2)

Діапазон коливання інтегральних оцінок двох реакторів технології SMR — від 0,499 для SMR-160 (краще, ніж Hualong-1 і EPR-1650) до 0,682 для NuScale, що навіть вище найкращого з реакторів технології PWR (AP1000 — 0,628). Таким чином, зменшення значень капітальних витрат і приведених строків будівництва (критерії E1 і E3) за модифікованим сценарієм 1 не привело до суттєвих змін у раніше визначеному в рамках базового сценарію порядку розташування реакторних технологій (від кращих до гірших): SMR → PWR → BWR → CANDU-EC6, що продемонструвало — реактори технології MMR мають достатній запас стійкості, який дозволив одному з них (NuScale) зберегти лідерство в порівнянні з реакторами технології PWR.

У рамках аналізу чутливості 2 найвищий рейтинг серед усіх реакторів отримав NuScale — 0,731, за яким іде SMR-160 — 0,695. Найвищу серед реакторів PWR рейтингову позицію отримав ВВЕР-1200 — 0,685 завдяки значно кращим початковим показникам вартості, які ще більше зросли після надання їм вищого пріоритету (0,5 > 0,3). Діапазон коливання оцінок — від 0,440 (EPR-1650) до 0,685 (ВВЕР-1200). Hualong-1 має рейтинг 0,618, AP1000 — 0,612, а APR-1400 — 0,578. Реактор CANDU-E6 — 0,327.

Найвищу оцінку серед двох представників технології BWR отримав реактор ESBWR — 0,448, тоді як ABWR — 0,433.

Таким чином, зміна в значеннях вагових коефіцієнтів за двома цілями верхнього рівня («Вартість» ↔ «Технічні характеристики») не привела до змін у раніше визначеному порядку розташування реакторних технологій (від кращих до гірших): SMR → PWR → BWR → HWR (CANDU-EC6).

## Висновки

У рамках дослідження представлено підхід до вибору реакторних технологій для будівництва заміщувачів та нових енергоблоків АЕС в Україні. Сформовано перелік критеріїв порівняльного оцінювання реакторних технологій. Під час формування критеріїв враховано вимоги WENRA, EUR, рекомендації МАГАТЕ та нормативні вимоги України з ядерної та радіаційної безпеки.

На цьому етапі дослідження до переліку критеріїв не включено показники собівартості виробництва електроенергії.

Критерії дозволяють проводити порівняльне оцінювання реакторів та реакторних технологій за

напрямами безпеки, технічних показників, референтності, загальних критеріїв, впливу на персонал, інфраструктурних показників і дають змогу врахувати зв'язок з ЯПЦ.

Сформовано перелік вхідних техніко-економічних даних перспективних реакторних технологій PWR, BWR, HWR (CANDU-EC6), що є найбільш поширеними технологіями у світі, для порівняльного оцінювання реакторних технологій.

Як перспективні розглянуто реактори SMR, які на цей час не є референтними через відсутність досвіду будівництва й експлуатації. Разом з тим цей тип реакторів активно розглядається у світі як одне з прийнятних рішень щодо забезпечення новітніх вимог з безпеки та економічної привабливості будівництва нових АЕС.

З використанням інструментарію МАГАТЕ KIND-ET проведено ранжування результатів багатокритеріального порівняльного оцінювання реакторних технологій шляхом співставлення техніко-економічних параметрів, що характеризують відповідні реакторні установки.

На підставі виконаного аналізу сформульовано рекомендації щодо пріоритетної реакторної технології для будівництва енергоблоків в Україні на довгострокову перспективу до 2050 р. для забезпечення стійкого розвитку ядерної енергетики. Показано, що застосування в Україні реакторних технологій PWR великої потужності та SMR є найперспективнішим напрямом розвитку атомної енергетики України.

Базуючись на результатах виконаних аналізів з урахуванням факторів невизначеності та чутливості щодо значень вихідних даних і можливих ризиків, можна стверджувати, що спостерігається тенденція щодо переваг реакторів технології SMR, які загалом за результатами інтегрального оцінювання мають більш рейтингові позиції в порівнянні з реакторами технологій PWR, BWR і HWR.

Водночас під час прийняття надалі обґрунтованого врівноваженого рішення щодо типу пріоритетної для умов України реакторної технології необхідно врахувати можливість її застосування для побудови ефективної енергетичної системи з досягненням рівня сумарної встановленої потужності атомної енергетики не нижче досягнутого. При цьому необхідно провести окреме дослідження щодо визначення оптимального співвідношення реакторних технологій PWR та SMR в енергетичній системі України з урахуванням перспектив розгортання джерел відновлювальної енергетики.

Беручи до уваги, що реактори SMR-160 (Holtec Int., США) та NuScale (NuScale Power, LLC, США) представляють нову, не апробовану технологію, для подальшого їхнього впровадження доцільним є проведення консультацій із розробниками цих реакторів для отримання їхніх технічних та економічних параметрів.

### Список використаної літератури

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України № 605-р від 18.08.2017 р.]. — 66 с.
2. Концепція «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року / Міністерство енергетики та захисту довкілля України. — 2020. — Режим доступу: <https://menr.gov.ua/news/34424.html>.
3. Advanced Reactor Information System // IAEA: official website. — Available at: <https://aris.iaea.org>.
4. Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО) // МАГАТЭ: официальный веб-сайт. — Режим доступа: <https://www.iaea.org/ru/uslugi/mezhdunarodnyu-proekt-po-innovacionnym-yadernym-reaktoram-i-toplivnym-ciklam-inpro>.
5. Nuclear Reactors // NRC : official website. — Available at: <https://www.nrc.gov/reactors.html>.
6. Generic Design Assessment (GDA) of new nuclear power stations // ONR : official website. — Available at: <http://www.onr.gov.uk/new-reactors/assessment.htm>.
7. Власенко Н. И. Предложения по формированию критериев выбора проектов новых энергоблоков АЭС Украины / Н. И. Власенко, О. В. Годун, В. Я. Шендерович // Ядерна та радіаційна безпека. — 2017. — № 1. — С. 10–15.
8. Application of multi-criteria decision analysis methods to comparative evaluation of nuclear energy system options: Final report of the INPRO collaborative project KIND. No. NG-T-3.20. — Vienna : IAEA, 2019. — 229 p. (IAEA Nuclear Energy Series). — Available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1853\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1853_web.pdf)
9. Application of multi-criteria decision analysis methods to comparative evaluation of nuclear energy system options: INPRO Collaborative Project “Key Indicators for Innovative Nuclear Energy Systems”. KIND executive summary. — Vienna: IAEA. — 24 p. — Available at: <https://www.iaea.org/sites/default/files/20/02/inpro-kind.pdf>.
10. Guidance for the application of an assessment methodology for innovative nuclear energy systems.

IAEA-TECDOC-1575 Rev. 1. — Vienna : IAEA, 2008. — 147 p. — Available at: [https://wwwpub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE\\_1575\\_CD/PDF/TE\\_1575\\_vol8\\_2008.pdf](https://wwwpub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE_1575_CD/PDF/TE_1575_vol8_2008.pdf).

**Y. M. Niearonov<sup>1</sup>, T. Y. Baybuzenko<sup>1</sup>,  
V. Y. Shenderovych<sup>2</sup>, M. I. Vlasenko<sup>3</sup>,  
O. V. Godun<sup>3</sup>, V. M. Kyrianchuk<sup>3</sup>, G. R. Semenov<sup>3</sup>,  
L. I. Gromok<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> JSC “Kyiv Research and Design Institute ‘Energoprojekt’”,  
4, Peremogy ave., Kyiv, 01135, Ukraine

<sup>2</sup> SE “State Scientific and Technical Center for Nuclear and  
Radiation Safety”, 35–37, V. Stusa st., Kyiv, 03142, Ukraine

<sup>3</sup> Separate Subdivision “Scientific and Technical Center”,  
SE “NNEGC ‘Energoatom’”, 22–24, Hoholivska st., Kyiv,  
01054, Ukraine

### Reactor Technology Rationale for Construction of Substitution and New Power Units in Ukraine after 2035

An algorithm of selecting the reactor technology type were constructed. The algorithm is based on a comparative assessment of the respective nuclear power plants. The formation of qualitative and quantitative criteria is performed for the estimation algorithm. Tools of the International Atomic Energy Agency (IAEA) INPRO-KIND project on multi-criteria comparative assessment of nuclear power plants for ranking the obtained results were adapted. The sensitivity analysis of the obtained results to change of numerical values and weight of criteria is carried out. The choice of the type of reactor technology for construction in Ukraine after 2035 is substantiated. It is shown that PWR and SMR reactor technologies in Ukraine are the most promising direction in the development of nuclear energy in Ukraine.

Taking into account the factors of uncertainty and sensitivity to the values of the original data and possible risks, results of the analysis shows that there is a trend of advantages of SMR reactors, which generally have higher ratings compared to PWR, BWR and HWR. At the same time, the level of multi-criteria ratings of PWR reactors is close to SMR reactors.

Making a further decision on the type of reactor technology for the conditions of Ukraine, it is necessary to take into account the possibility of its maximal total installed capacity deployment. It is necessary to conduct a separate study to determine the optimal ratio of reac-

tor technologies PWR and SMR in the power system of Ukraine, taking into account the prospects for the deployment of renewable energy sources.

*Keywords:* KIND, INPRO, multi-criteria assessment, reactor technology.

### References

1. *Energy strategy of Ukraine for the period up to 2035 "Security, energy efficiency, competitiveness"*. Approved by the Order of the Cabinet of Ministers dated 18.08.2017 no. 605-p, 66 p. (in Ukr.)
2. Ministry of energy and environment protection of Ukraine (2020). *Ukraine 2050. Green energy transition concept*. Available at: <https://menr.gov.ua/news/34424.html>. (in Ukr.)
3. *Advanced Reactor Information System*. IAEA: official website. Available at: <https://aris.iaea.org>.
4. *International project on innovative nuclear reactors and fuel cycles (INPRO)*. IAEA: official website. Available at: <https://www.iaea.org/services/key-programmes/international-project-on-innovative-nuclear-reactors-and-fuel-cycles-inpro>.
5. *Nuclear Reactors*. NRC: official website. Available at: <https://www.nrc.gov/reactors.html>.
6. *Generic Design Assessment (GDA) of new nuclear power stations*. ONR: official website. Available at: <http://www.onr.org.uk/new-reactors/assessment.htm>.
7. Vlasenko M. S., Hodun O. V., Shenderovych V. Y. (2017). *Predlozhenyja po formyrovanyju kryteriyev vybora proektov novykh energhoblokov AES Ukrainy* [Proposals on forming criteria to select designs for new NPP units in Ukraine]. *Nuclear and Radiation Safety*, vol. 73, no. 1, pp. 10–15 (in Russ.). DOI: 10.32918/nrs.2017.1(73).02.
8. IAEA (2019). *Application of multi-criteria decision analysis methods to comparative evaluation of nuclear energy system options*: Final report of the INPRO collaborative project KIND. No. NG-T-3.20. IAEA Nuclear Energy Series. Vienna: IAEA, 229 p. Available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1853\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1853_web.pdf).
9. IAEA (2019). *Application of multi-criteria decision analysis methods to comparative evaluation of nuclear energy system options*: NPRO Collaborative Project "Key Indicators for Innovative Nuclear Energy Systems". KIND executive summary. Vienna: IAEA, 24 p. Available at: <https://www.iaea.org/sites/default/files/20/02/inpro-kind.pdf>.
10. IAEA (2018). *Guidance for the application of an assessment methodology for innovative nuclear energy systems*. IAEA-TECDOC-1575 Rev. 1. Vienna: IAEA, 147 p. Available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE\\_1575\\_CD/PDF/TE\\_1575\\_vol8\\_2008.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE_1575_CD/PDF/TE_1575_vol8_2008.pdf).

Надійшла 17.06.2020

Received 17.06.2020