

**Лазуренко Олександр Павлович**, канд. техн. наук, завідувач кафедри електричних станцій НТУ «ХПІ», Харків, Україна. Тел. 0509380348; E-mail: [alexlazurenko58@gmail.com](mailto:alexlazurenko58@gmail.com)  
**Чалий Олексій Олексійович**, магістрант кафедри електричних станцій НТУ «ХПІ», Харків, Україна, Тел: +491726255214; E-mail: [Lexa2905@gmail.com](mailto:Lexa2905@gmail.com)  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61000

## СТРАТЕГІЯ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ ТА МІСЦЕ В НІЙ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ

**Анотація.** В роботі приведена характеристика малих модульних реакторів (SMR), їх відмінностей від існуючих АЕС і особливостей застосування в сучасних гібридних електроенергетичних системах в комбінації з відновлюваними джерелами енергії та накопичувачами електроенергії Nuclear Renewable Hybrid Energy System (NRHES), їх переваги та проблеми використання в майбутній енергосистемі України. Розглянуті перспективи співробітництва в цій сфері з компаніями Сполучених Штатів Америки. Мали модульні реактори SMR підходять для електричних систем різних потужностей, їх модульна система дає гнучкість і швидкість у побудові, зменшують потреби в капіталовкладеннях і полегшують вимоги до фінансування. Менший розмір і різноманітність реакторів також може означати, що їх можна будувати в місцях, традиційно не придатних для великих АЕС, і, що важливо, поблизу енергоємних виробництв або віддалених населених пунктів, тобто як елементи розподіленої генерації. Вони можуть забезпечити надійне постачання не тільки електроенергії, а й і тепла. SMR також можуть бути розгорнуті на вугільних ТЕС, що виходять з експлуатації. Використання переваг існуючої інфраструктури, включаючи електророзподільні установки та турбіни вугільних електростанцій, могло б зменшити витрати на будівництво SMR та уникнути необхідності додавання нових ліній електропередачі з цих об'єктів. Розкрито проблеми з впровадженням таких мереж. Звернуто увагу на підвищену складність системи в зв'язку з застосуванням різних джерел генерації та процесів розподілення та споживання електроенергії. Наведено основні технічні характеристики, особливостей конструкції реактора, будівлі станції, систем безпеки та систем керування. За результатами дослідження зроблено висновок, що SMR мають значні переваги для використання в сучасних мережах, завдяки своїй модульній конструкції та модульному розгортанню, щоб задовольнити різноманітні вимоги до зміни та масштабування потужності.

**Ключові слова:** малий модульний реактор (SMR), гібридна енергетична система, відновлювальні джерела енергії, теплоносій реактора, реактор з водою під тиском, модульний реактор NuScale

**Lazurenko Olexsandr Pavlovich**, Ph.D. technical of Sciences, Head of the Department of Power Stations of KhPI National Technical University, Kharkiv, Ukraine. Tel. 0509380348; E-mail: [alexlazurenko58@gmail.com](mailto:alexlazurenko58@gmail.com)  
**Chaly Olexsiy Olexsiyovych**, Master's student of the Department of Power Stations of KhPI National Technical University, Kharkiv, Ukraine, Phone: +491726255214; E-mail: [Lexa2905@gmail.com](mailto:Lexa2905@gmail.com)  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova Str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61000

## THE DEVELOPMENT STRATEGY OF UKRAINE'S ENERGY SYSTEM AND THE PLACE OF SMALL MODULAR REACTORS IN IT

**Abstract.** The paper describes the characteristics of small modular reactors (SMR), their differences from existing nuclear power plants and the features of their use in modern hybrid electric power systems in combination with renewable energy sources and Nuclear Renewable Hybrid Energy System (NRHES) electricity storage, their advantages and problems of use in the future power system of Ukraine. Prospects for cooperation in this area with companies from the United States of America were considered. Small modular SMR reactors are suitable for electrical systems of various capacities, their modular system allows flexibility and speed of construction, reduces capital investment needs and eases financing requirements. The smaller size and variety of reactors can also mean that they can be built in locations not traditionally suitable for large nuclear power plants and, importantly, near energy-intensive industries or remote communities, i.e. as elements of distributed generation. They can ensure a reliable supply of not only electricity, but also heat. SMRs can also be deployed at decommissioned coal-fired power plants. Taking advantage of existing infrastructure, including switchgear and coal-fired turbines, could reduce SMR construction costs and avoid the need to add new transmission lines from these facilities. Problems with the implementation of such networks are revealed. Attention was drawn to the increased complexity of the system in connection with the use of various sources of generation and processes of distribution and consumption of electricity. The main technical characteristics, features of the reactor design, the station building, safety systems

and control systems are given. The study concludes that SMRs have significant advantages for use in modern networks, due to their modular design and modular deployment, to meet a variety of power switching and scaling requirements.

**Keywords:** Small Modular Reactor (SMR), Hybrid Power System, Renewable Energy, Reactor Coolant, Pressurized Water Reactor, NuScale Modular Reactor

**Лазуренко Александр Павлович**, канд. техн. наук, заведуючий кафедрой электрических станций НТУ «ХПИ», Харьков, Украина. Тел.0509380348; E-mail: alexlazurenko58@gmail.com

**Чальый Алексей Алексеевич**, магистрант кафедры электрических станций НТУ «ХПИ», Харьков, Украина, Тел: +491726255214; E-mail: Lexa2905@gmail.com

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Курпичева, 2, Харьков, 61000, Украина

## СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ УКРАИНЫ И МЕСТО В НЕЙ МАЛЫХ МОДУЛЬНЫХ РЕАКТОРОВ

**Аннотация.** В работе приведена характеристика малых модульных реакторов (SMR), их отличий от существующих АЭС и особенностей применения в современных гибридных электроэнергетических системах в комбинации с возобновляемыми источниками энергии и накопителями электроэнергии Nuclear Renewable Hybrid Energy System (NRHES), их преимуществами и проблемами использования в будущем энерго. Украины. Рассмотрены перспективы сотрудничества в этой области с компаниями Соединенных Штатов Америки. Малые модульные реакторы SMR подходят для электрических систем разных мощностей, их модульная система дает гибкость и быстроту в построении, уменьшают потребности в капиталовложениях и облегчают требования к финансированию. Меньший размер и разнообразие реакторов также может означать, что их можно строить в местах, традиционно не пригодных для крупных АЭС, и, что немаловажно, вблизи энергоемких производств или отдаленных населенных пунктов, то есть как элементы распределенной генерации. Они могут обеспечить надежную поставку не только электроэнергии, но и тепла. SMR также могут быть развернуты на угольных ТЭС, выходящих из эксплуатации. Использование преимуществ существующей инфраструктуры, включая электрораспределительные установки и турбины угольных электростанций, могло бы снизить затраты на строительство SMR и избежать необходимости добавления новых линий электропередачи с этих объектов. Раскрыты проблемы с внедрением таких сетей. Обратите внимание на повышенную сложность системы в связи с применением различных источников генерации и процессов распределения и потребления электроэнергии. Приведены основные технические характеристики, особенности конструкции реактора, здания станции, систем безопасности и систем управления. По результатам исследования сделан вывод, что SMR имеют значительные преимущества для использования в современных сетях благодаря своей модульной конструкции и модульному развертыванию, чтобы удовлетворить разнообразные требования к изменению и масштабированию мощности.

**Ключевые слова:** малый модульный реактор (SMR), гибридная энергетическая система, возобновляемые источники энергии, теплоноситель реактора, реактор с водой под давлением, модульный реактор NuScale

**Актуальність теми.** Аналіз стану енергосистеми свідчить про те, що в найближчому майбутньому в Україні потребують заміни потужності, що вичерпали свій ресурс, перш за все теплові електричні станції (ТЕС). При цьому необхідно враховувати зобов'язання країни згідно міжнародних кліматичних угод. У ході військових дій на території України було пошкоджено велику кількість енергогенеруючих об'єктів України, які немає сенсу відбудовувати після війни на старій технологічній базі. В період з 2030 по 2040 р.р. закінчується продовжений термін експлуатації 12 атомних енергоблоків в Україні. Їх необхідно замінити новими атомними енергоблоками з можливістю роботи в маневровому режимі. Але цього збільшення майже неможливо досягти, якщо йти традиційним шляхом розвитку великих атомних електричних станцій (АЕС), бо середній період їх проектування, побудови та введення в експлуатацію може варіювати від 10

до 20 років. Сюди потрібно додати великі початкові капітальні витрати. Менша, простіша та гнучка версія атомних станцій на основі технології малих модульних реакторів (ММР) або ([SMR](#)) здатна прискорити розгортання потужностей. Технологія [SMR](#) є багатообіцяючою, хоча привабливість економіки та безпеки для такого рішення сьогодні є дискусійною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У наукових публікаціях як предмет дослідження представлено певні методологічні аспекти формування державної енергетичної політики.[1-8] Погляди вчених і практиків переважно концентруються на вже прийнятих положеннях, викладених у тому чи іншому офіційному документі. Більшою мірою дослідження спрямовані на вирішення окремих положень енергетичної безпеки [9-12 ], енергоефективності [13-14] та екологічних проблем [15]. Деякі публікації присвячені новим реакторним технологіям та ММР [16-20]. У цих публікаціях описуються схеми таких реакторів та наводяться їх загальні характеристики. Так, з'явилася публікація у пресі, що "Енергоатом" підписав меморандум з американською компанією NuScale про можливість будівництва в Україні малих ядерних реакторів.[21] Можливо, в майбутньому вони прийдуть на заміну сучасним великим енергоблокам. НАЕК "Енергоатом" досить активно шукає шляхи оновлення потужностей, про що свідчать повідомлення в пресі щодо регулярних переговорів з провідними виробниками енергетичного обладнання. Компанія підписала меморандум з фірмою Westinghouse, який передбачає будівництво в Україні п'яти 1000-мегаватних енергоблоків. Підписано також меморандум з компанією NuScale Power. Він передбачає допомогу Україні у підготовці нормативної бази і проєктів будівництва малих модульних ядерних реакторів, спроектованих цією компанією.

**Метою статті** є аналіз особливостей та технічних характеристик малих модульних реакторів на прикладі NuScale [SMR](#) та перспектив застосування їх в майбутній енергетичній системі України поряд з традиційними потужними АЕС.

**Викладення основного матеріалу.** Малі модульні реактори [SMR](#) підходять для електричних систем різних потужностей, їх модульна система дає гнучкість і швидкість у побудові, зменшують потреби в капіталовкладеннях і полегшують вимоги до фінансування [16]. Ефективним виглядає використання комбінації [SMR](#) з відновлювальними джерелами в сучасних гібридних енергосистемах. Поєднання різних джерел енергії, кількох навантажень та накопичувачів енергії дозволяють інтегрувати їх в автономну мікромережу, яка може працювати як з допомогою великомасштабної енергосистеми, так і без неї. Звідси й з'явився термін Nuclear Renewable Hybrid Energy System (NRHES)– це гібридна енергосистема, де передбачається тісний зв'язок між атомною електростанцією та станціями на відновлювальних джерелах енергії (рис.1) [17].



Рис. 1. Гібридна мережа з [SMR](#), відновлювальними джерелами енергії та системами накопичення енергії (NRHES).

Менший розмір і різноманітність реакторів також може означати, що їх можна будувати в місцях, традиційно не придатних для великих АЕС, і, що важливо, поблизу енергоємних виробництв або віддалених населених пунктів, тобто як елементи розподіленої генерації. Вони можуть забезпечити надійне постачання не тільки електроенергії, а й і тепла. [SMR](#) також можуть бути розгорнуті на вугільних ТЕС, що виходять з експлуатації. Використання переваг існуючої інфраструктури, включаючи електророзподільні установки та турбіни вугільних електростанцій, могло б зменшити витрати на будівництво [SMR](#) та уникнути необхідності додавання нових ліній електропередачі з цих об'єктів.

Основними перевагами NRHES є: - оптимізація системи для мінімізації витрат для NRHES та одночасне збільшення технічної та економічної стійкості; -декарбонізація як вироблення електричної енергії, так і промислових процесів; -підвищення загальної гнучкості та надійності мережі.

При об'єднанні поновлювальних джерел енергії та SMR в мікромережу, системи управління для SMR повинні бути скоординовані з іншими системами управління в мікромережі. Основною задачею управління являється можливість різних джерел енергії вносити свою частку в споживане навантаження в необхідних пропорціях та зберігати при цьому нормативні показники по напрузі та частоті. Конфігурація такої мікромережі показана на рис. 2[17].

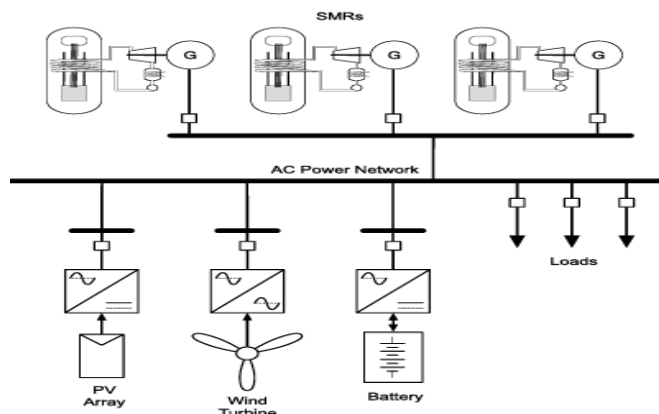


Рис. 2. Конфігурація гібридної мережі.

Але існують й певні проблеми з впровадженням таких мереж, а саме підвищена складність системи в зв'язку з застосуванням різних джерел генерації та процесів розподілення та споживання електроенергії. При вводити [SMR](#) в мережу постачання, мета [SMR](#) полягає в регулюванні системою керування потужності [SMR](#), щоб вона приблизно відповідала піковим вимогам при роботі в режимі “турбіна слідує за реактором”. Через переривчастий характер поновлювальних джерел, [SMR](#) та джерела накопичення енергії повинні вирівнювати та пом'якшувати коливання напруги та частоти, системи управління повинні бути розроблені з урахуванням таких сценаріїв. Також необхідно враховувати координацію декількох модулів [SMR](#) та гнучкі теплові навантаження. Маневреність [SMR](#) обмежена обмеженнями безпеки та фізичними обмеженнями і залежить від точності прогнозування рівня навантаження. [SMR](#) не може точно відповідати різниці генерації та споживання, особливо це стосується сценаріїв при надмірному виробництві сонячної енергії та знижені нижньої межі потужності реактора. Саме для вирішення таких проблем застосовуються системи накопичення енергії. Вони використовуються для компенсації будь-яких небалансів потужності, що залишилися. Батарея заряджається щоразу, коли є надлишкова фотоелектрична потужність, і розряджається, якщо об'єднані поновлювані джерела та вихідні потужності [SMR](#) не в змозі задовольнити загальну потребу в навантаженні. Раптові несподівані зміни балансу потужності обробляються батареєю, яка може швидко реагувати, поки вона працює на проміжному рівні заряду, де вона може як подавати, так і поглинати енергію в міру необхідності. Потужність батареї буде дорівнювати:

$$batt = load - (P_{solar} + wind + SMR) \quad (1)$$

Наша держава має багаторічні традиції роботи з ядерними технологіями. Якість персоналу та безпеку наших станцій високо оцінюють експерти [МАГАТЕ](#). У червні 2019 року компанія Holtec International (США) підписала угоду про партнерство з НАЕК «Енергоатом» та національним ядерним консультантом України, Державним науково-технічним центром ядерної та радіаційної безпеки (ДНТЦ-ЯРБ), про створення консорціуму для вивчення екологічної та технічної доцільності «загальної» системи [SMR-160](#), яка може бути створена та експлуатована на будь-якому об'єкті в країні [18]. У вересні 2021 року Україна підписала з компанією NuScale (США) меморандум про співпрацю. NuScale оголосила, що Міністерство охорони здоров'я у 2022 році профінансує Державний науково-технічний центр України з ядерної та радіаційної безпеки. [19] У грудні 2021 року NuScale оголосила, що компанія надасть технічну допомогу для аналізу прогалин у ліцензуванні [SMR](#) в Україні в рамках гранту, наданого Науково-

технологічному центру в Україні Агентством з торгівлі та розвитку США. Грант сприятиме ліцензуванню та розгортанню технології SMR в Україні.

NuScale Power Module™ ([NPM](#)) — це невеликий реактор з водою під тиском ([PWR](#)) з легководяним охолодженням. Основні технічні параметри наведені в табл.1.

Таблиця 1 - Основні технічні параметри NuScale [SMR](#)

Параметр	Значення
Розробник технології, країна походження	NuScale Power, LLC, United States of America
Тип реактора	Вбудований <a href="#">PWR</a>
Охолоджувач/модератор	Легка вода/легка вода
Теплова/електрична потужність, МВт(т)/МВт(е)	250 / 77
Первинна циркуляція	Природна циркуляція
Робочий тиск (первинний/вторинний), МПа	13,8 / 4,3
Температура охолоджуючої рідини на вході/виході (°C)	265 / 321
Тип палива/вузловий масив	гранули $UO_2$ /квадратний 17x17
Кількість паливних збірок в активній зоні	37
Збагачення палива (%)	<4,95
Вигорання активної зони (ГВт/тонна)	>30
Цикл дозаправки (місяці)	24
Механізм контролю реактивності	Керуючі стрижні, бор
Підхід до систем безпеки	Повністю пасивна
Проектний термін служби (роки)	60
Площа станції (м <sup>2</sup> )	140 000
Висота/діаметр <a href="#">RPV</a> (м)	17.7 / 2.7
Вага <a href="#">RPV</a> (метрична тонна)	295 (з паливом і внутрішніми пристроями)
Сейсмічний проект (SSE)	0,5g горизонтальне та 0,4g вертикальне пікове прискорення землі
Вимоги до паливного циклу / Підхід	Триступенева схема заправки
Відмінні характеристики	Необмежений час роботи для охолодження активної зони без живлення змінного або постійного струму, додавання води або дій оператора

Електрична станція на основі NuScale є легко масштабованою і може бути побудована для розміщення різної кількості [NPM](#) для задоволення різної потреби в енергії. [NPM](#) потужністю 77 МВт(е) забезпечує потужність з ступенями, які можна масштабувати до 924 МВт(е) в одній установці з дванадцятьма модулями. Конфігурація з дванадцяти модулів є еталонною потужністю станції для проектування та ліцензування.

Кожен [NPM](#) є автономним модулем, який працює незалежно від інших модулів у багатомодульній конфігурації. Усі модулі керуються з єдиної диспетчерської платформи. Важливі конструктивні особливості установки включають: компактний модуль, виготовлений на заводі, потік теплоносія з природною циркуляцією для всіх робочих станів, ємність високого проектного тиску, використання встановленої технології легководного реактора та розробку конструкції на основі випробувань. Зовнішній вигляд реактора NuScale SMR та схема силової установки приведені на рис. 3 і 4 [20].

**Основні особливості дизайну.** Конструкція установки NuScale використовує спрощену конструкцію, перевірену технологію легководного реактора, модульну систему постачання ядерної пари. Виготовлені на заводі силові модулі та системи пасивної безпеки дозволяють необмежений час подолання проектної аварії без живлення власних потреб, дій оператора або підживлення водою. [NPM](#) розроблений для ефективної роботи в умовах повної потужності, використовуючи природну циркуляцію як засіб забезпечення потоку теплоносія в активній зоні, усуваючи потребу в насосах теплоносія реактора [19].

**Система постачання ядерної пари** складається з активної зони реактора, парогенераторів із гвинтовими змійовиками та герметика в корпусі реактора під тиском ([RPV](#)). [NSSS](#) укладено в приблизно циліндричну ємність ([CNV](#)), яка знаходиться в структурі басейну реактора. Кожен силовий модуль під'єднаний до окремої турбогенераторної установки та системи балансу.

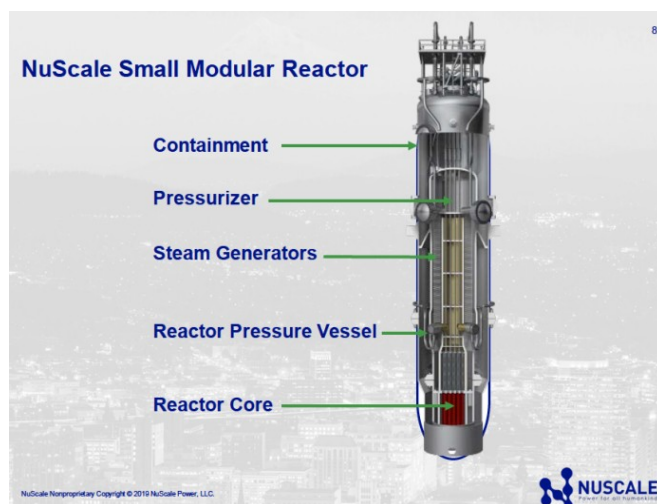


Рис. 3. Зовнішній вигляд установки NuScale SMR

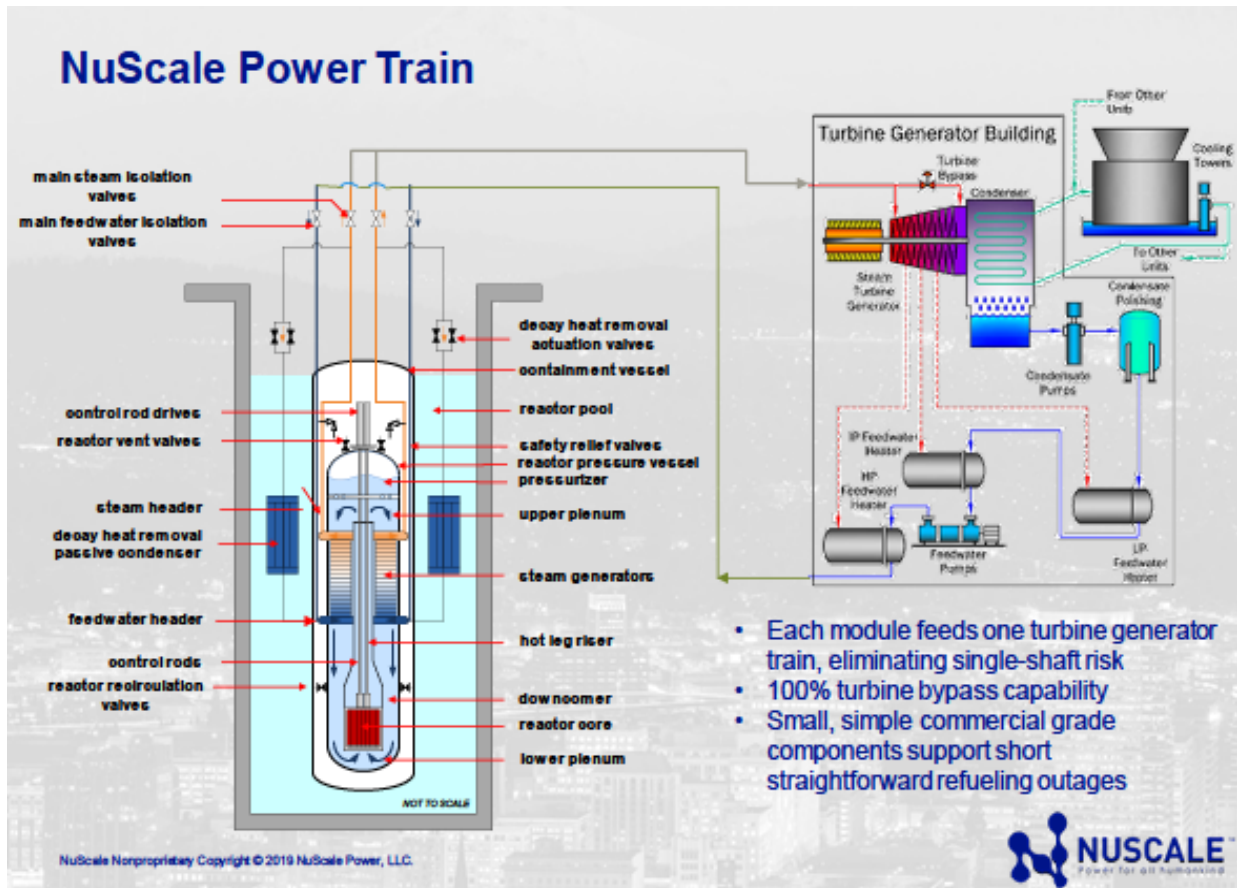


Рис. 4. Силова установка NuScale

**Активна зона реактора.** Основна конфігурація для [NPM](#) складається з 37 паливних збірок і 16 стрижнів. Конструкція паливної збірки змодельована на основі стандартної паливної збірки 17 x 17 [PWR](#) з 24 місцями напрямних трубок для керуючого стержня і центральної трубки реактору. Збірка номінально становить половину висоти стандартного заводського реакторного палива і підтримується п'ятьма розпірними сітками. Паливо являє собою  $UO_2$  з  $Gd_2O_3$  як горючий поглинач, однорідно-змішаний у паливі для кожного з окремих місць розташування стрижнів. Збагачення  $U^{235}$  нижче поточної межі збагачення виробника США в 4,95%.

**Контроль реактивності.** Контроль реакційної здатності в кожному [NPM](#) досягається в основному за рахунок розчинного бору в первинному теплоносії і 16 вузлах регулюючих стрижнів. Стрижні керування організовані в дві групи: контрольна група та група відключення. Контрольна група, що складається з чотирьох стрижнів, симетрично розташованих в активній зоні, функціонує як регулююча група, яка використовується під час нормальної роботи установки для контролю реактивності. Група вимкнення, що складається з 12 стрижнів, використовується під час вимкнення та аварії. Матеріал поглинача стрижнів управління -  $B_4C$ , а довжина стрижня управління - 2 метри.



**Система охолодження реактора.** Система теплоносія реактора (СРР) — це підсистема NPM, що забезпечує циркуляцію теплоносія первинної ланки на основі природної циркуляції. Отже, RCS не потребує насосів теплоносія реактора або зовнішньої системи трубопроводів. RCS включає в себе корпус реактора під тиском (RPV) і вбудований герметик, внутрішні частини корпусу реактора, запобіжні клапани реактора, труби RCS всередині захисної оболонки та інші.

**Реактор під тиском і внутрішні пристрої.** RPV складається з циліндричної сталеві ємності з внутрішнім діаметром 2,7 м, загальною висотою приблизно 17,7 м і розрахована на робочий тиск 13,8 МПа. Верхня і нижня головки мають сферичну форму, а нижня частина судна має фланці трохи вище основної області, щоб забезпечити доступ для заправки. Верхня головка RPV підтримує механізми приводу тяги управління. Форсунки на верхній головці забезпечують з'єднання для запобіжних клапанів реактора, вентиляційних клапанів реактора та парових трубопроводів вторинної системи.

**Парогенератор.** Кожен NPM використовує для виробництва пари два переплетених парогенератора зі спіральними змійовиками. Парогенератори розташовані в кільцевому просторі між стояком гарячої ноги і стінкою внутрішнього діаметра RPV. Парогенератор складається з труб, з'єднаних з живильною водою, і парових камер з трубними листами. Попередньо підігріта живильна вода надходить у нижню камеру живлення через форсунки на RPV. Коли живильна вода проходить через внутрішню частину труб парогенератора, тепло додається від первинного теплоносія. Рідина вторинної сторони нагрівається, кип'ятиться і перегрівается для отримання сухої пари для турбогенератора.

**Нагнітач тиску.** Внутрішній регулятор тиску є основним засобом для контролю тиску в системі теплоносія реактора. Він призначений для підтримки постійного тиску теплоносія в реакторі під час роботи. Тиск теплоносія в реакторі підвищується шляхом подачі живлення до групи нагрівачів, встановлених над перегородкою герметика. Тиск знижується за допомогою розпилювачів, що надаються системою контролю хімічних речовин і об'єму (CVCS).

**Особливості безпеки.** На заводі NuScale використовується набір інженерних засобів безпеки, призначених для забезпечення надійного довготривалого охолодження активної зони за будь-яких умов, включаючи подолання наслідків серйозних аварій. Вони включають інтегральну конфігурацію первинної системи, ємність для захисту, пасивні системи відведення тепла та функції подолання наслідків серйозних аварій (рис.5).

Система відведення тепла від розпаду палива в реакторі (DHRS) забезпечує охолодження вторинного бічного реактора у випадку подій, які не є аварією з втратою охолоджуючої рідини, коли нормальна живильна вода недоступна. Система являє собою двофазну систему охолодження з природною циркуляцією замкнутого циклу. Передбачено два ланцюги

обладнання для відведення тепла, по одному прикріпленому до кожного контуру парогенератора. Кожен ланцюг здатний зняти 100% теплового навантаження розпаду та охолодити первинну систему теплоносія. Кожен ланцюг має пасивний конденсатор, занурений у басейн реактора. Під час нормальної роботи конденсатори DHRS забезпечуються достатнім запасом води для стабільної та ефективної роботи.

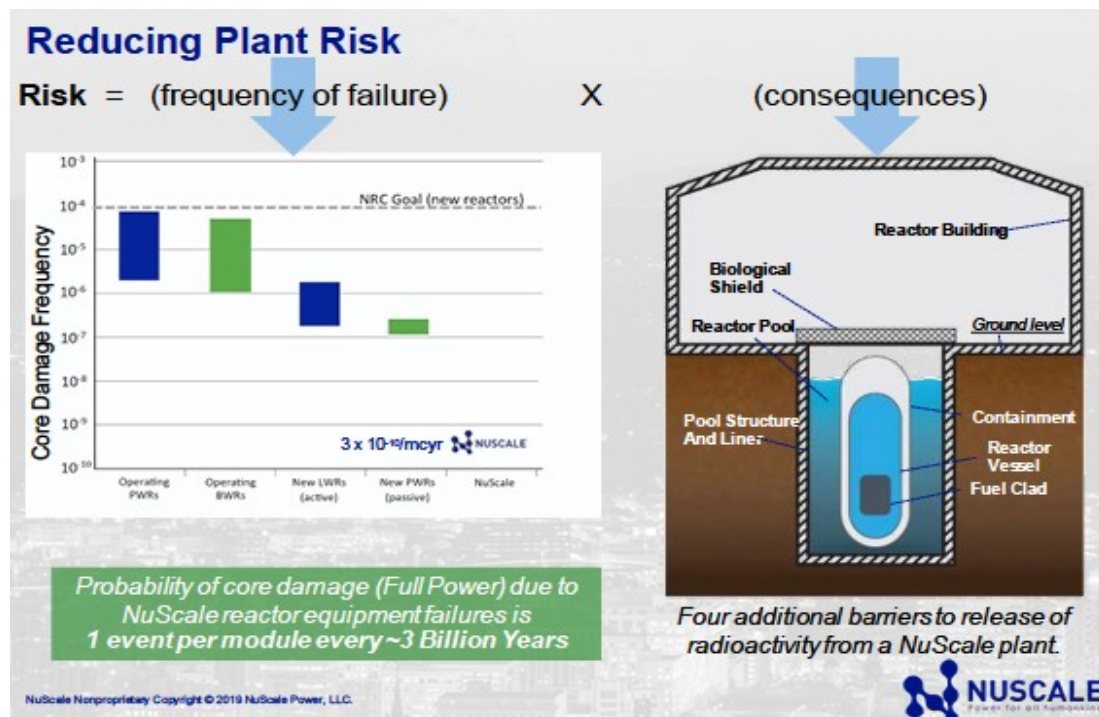


Рис. 5. Особливості безпеки NuScale.

**Система аварійного охолодження активної зони** складається з трьох незалежних вентиляційних клапанів реактора і двох незалежних клапанів рециркуляції реактора. Для аварій з втратою охолоджуючої рідини всередині захисної оболонки система аварійного охолодження повертає теплоносії з **CNV** в корпус реактора. Це гарантує, що ядро залишається покритим, а тепло розпаду відводиться. Система аварійного охолодження забезпечує відведення тепла при розпаді у малоймовірному випадку втрати потоку живильної води в поєднанні з втратою обох ланцюгів **DHRS**. Система видаляє тепло та обмежує тиск у захисній камері шляхом конденсації пари на внутрішній поверхні **CNV** та конвективної теплопередачі до неї.

**Система стримування.** Функції контейнера (**CNV**) полягають у тому, щоб стримувати викид радіоактивності після серйозних аварій, захищати **RPV** від зовнішніх небезпек і забезпечувати відведення тепла в реакторний басейн після спрацьовування. Кожен **CNV** складається зі сталевого циліндра із зовнішнім діаметром 4,5 м і загальною висотою 23,1 м. **CNV** містить **RPV**, механізми приводу керуючого стержня, а також відповідні трубопроводи та

компоненти NSSS. CNV занурений у басейн реактора, що забезпечує гарантований пасивний тепловідвід для відведення тепла в захисній камері в умовах аварії з втратою охолоджуючої рідини.

**Безпека та експлуатаційні характеристики установки.** Кожен [NPM](#) працює незалежно від інших модулів. Модуль заправляється, від'єднуючи його від робочого відсіку та переміщуючи його в загальну зону заправки в межах спільного реакторного басейну. Модуль розібраний на три основні компоненти: нижню секцію [RPV](#), яка містить серцевину та нижню внутрішню частину, нижню секцію [CNV](#) та верхню секцію [RPV/CNV](#), яка містить парогенератори та герметик. Після огляду секцій модуля та заправки активної зони модуль знову збирають і переміщують у робочий відсік і знову підключають до ліній пари та живильної води. Інші модулі заводу продовжують працювати, поки один модуль заправляється.

**Будівля реактора.** Станція NuScale складається в основному з корпусу реактора, будівлі диспетчерської, двох корпусів турбогенераторів, будівлі для обробки радіоактивних відходів, градирень з примусовою тягою, розподільчої станції та зони зберігання сухого палива. Будівля реактора, показана на малюнку вище, складається з до 12 силових модулів, обладнання для монтажу/розбирання модулів, обладнання для переробки палива та басейну відпрацьованого палива. Кожен [NPM](#) працює зануреним у загальний реакторний басейн в окремому відсіку з бетонним покриттям, яке служить біологічним щитом. Реакторний басейн нижчого класу та корпус реактора спроектовані відповідно до стандартів сейсмічної категорії 1. Зовнішній вигляд будівлі NuScale [SMR](#) у розрізі та зовнішній вигляд станції з реакторами NuScale [SMR](#) приведені на рис. 6 і 7[20].

Головна диспетчерська розташована нижче рівня в корпусі управління, розташованому поруч із корпусом реактора. Усі [NPM](#) керуються з однієї диспетчерської. Оператори реактора контролюють автоматизовану систему керування кожним реактором та загальними системами.

**Структура станції.** Станція NuScale має два окремих корпуси турбін, у кожному з яких міститься до шести турбін і генераторів з повітряним охолодженням. Будівлі турбіни — це споруди високого класу захисту, в яких розміщені турбогенератори з допоміжним обладнанням, конденсатори, системи підготовки конденсату та системи живлення. Кожна турбіна-генератор пов'язана з одним [NPM](#) і має спеціальні насоси для конденсату та живильної води. В NuScale кожен модуль з'єднаний зі спеціальною турбіною і синхронним генератором, тобто кожен блок може працювати як окрема система. У випадку, коли на один з блоків накладені певні обмеження, наприклад, один блок [SMR](#) має обмежену здатність маневрування потужністю. В такому випадку вихідна потужність і динамічна поведінка цього блоку має залишатися стабільними, а в цей же час інші блоки повинні відреагувати на зміни цього блоку та видавати більші величини потужності. Хоча блоки [SMR](#) відокремлені один від одного термічно, їх електричні та

термодинамічні вихідні показники виявляють сильну взаємну залежність. Зміни в одному блоці впливають не тільки на його власні вихідні показники, а й впливають на електричну та термодинамічну поведінку інших блоків.

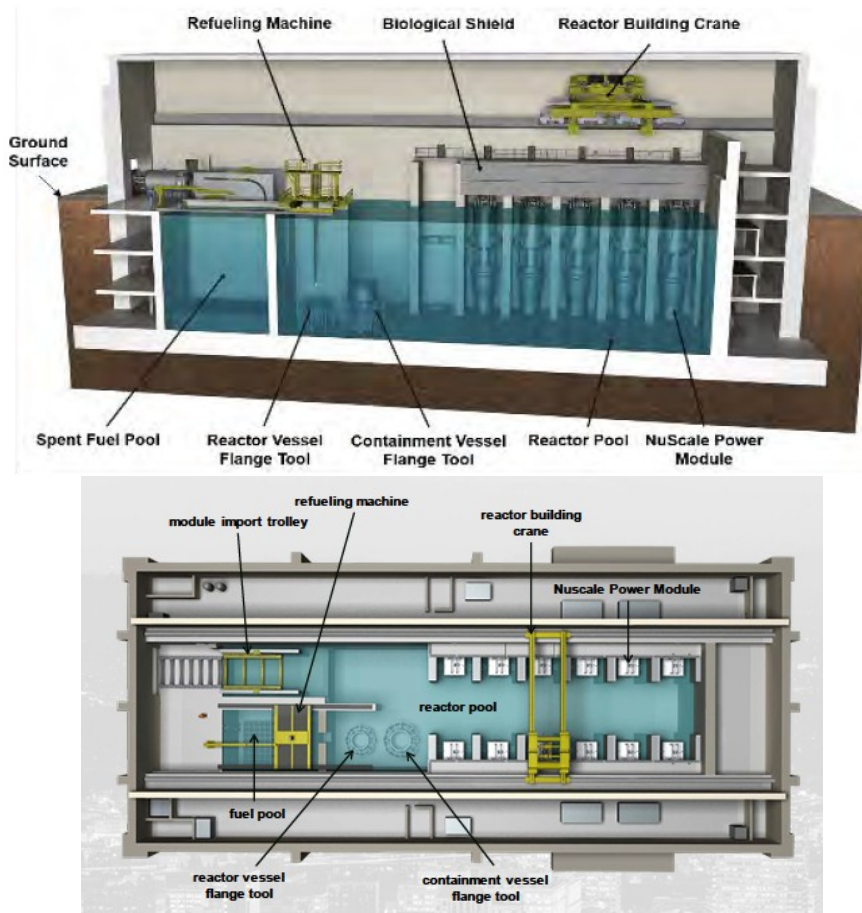


Рис. 6. Зовнішній вигляд будівлі NuScale [SMR](#)

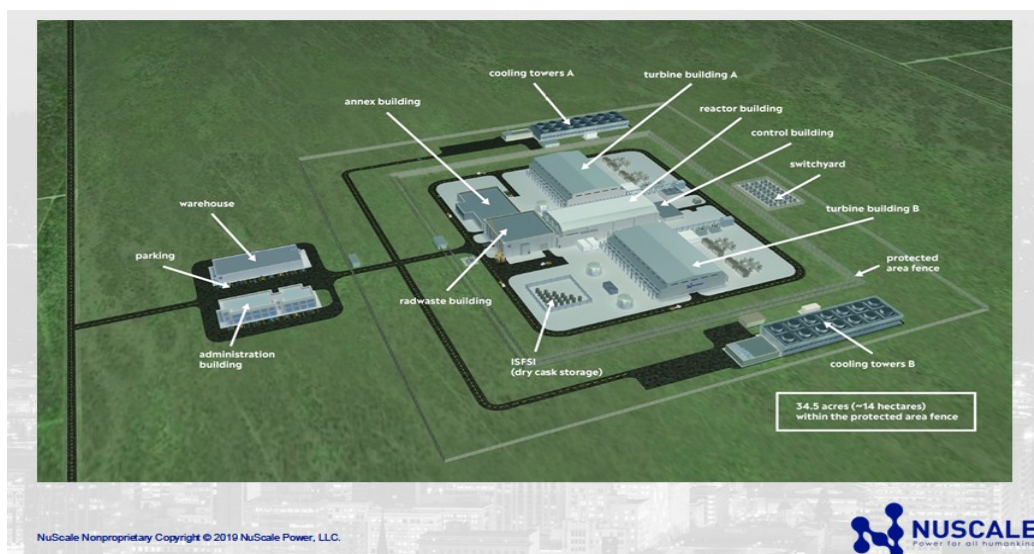


Рис. 7. Зовнішній вигляд станції з NuScale [SMR](#) [20]

**Висновки.** Для аналізу перспектив розвитку і застосування малих модульних реакторів було обрано технологію реактора NuScale [SMR](#). Розглянуті основні технічні характеристики, особливості конструкції реактора, будівлі станції, систем безпеки та систем керування. На основі аналізу шляхів розвитку технології малих модульних реакторів (SMR) в світі і Україні та поведінку [SMR](#) в сучасній гібридній мережі з відновлювальними джерелами та накопичувачами електроенергії можна зробити висновок, що [SMR](#) мають певні переваги для використання в сучасних мережах, завдяки своїй модульній конструкції та модульному розгортанню, щоб задовольнити різноманітні вимоги до зміни та масштабування потужності. Окремі питання щодо конструкцій, безпеки SMR та економіки впровадження і експлуатації поки що остаються дискусійними.

#### Список використаної літератури:

1. Нові реакторні технології: реалії та перспективи. URL: <https://www.ATOM.org/2020/07/24/novi-reaktorni-tehnologiyi-realiyi-ta-perspektivi.html>
2. Review of integration of small modular reactors in renewable energy microgrids. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121009138?3Dihub>.
3. A Ukrainian Roadmap for Small Modular Reactors: Current Activities and Future Plans, 2nd TWG-SMR Meeting : 8 – 11 July 2019, IAEA, Vienna, Austria.
4. NuScale's SMR Technology. URL: <https://www.nuscalepower.com/technology>
5. NuScale Small Modular Reactor (SMR) Overview. URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df17/IV.5-KenLangdon-NuScale.pdf>
6. Lessons Learned in Regulating Small Modular Reactors. Challenges, Resolutions and InsightsMarketing and Sales Unit, Publishing Section International Atomic Energy Agency Vienna International Centre, 2022. URL: [www.iaea.org/publications](http://www.iaea.org/publications)
7. Marketing and Sales Unit, Publishing Section International Atomic Energy Agency Vienna International Centre, 2021. URL: [www.iaea.org/publications](http://www.iaea.org/publications)
8. Methodologies for seismic soil-structure interaction analysis in the design and assessment of nuclear installations. Publishing Section International Atomic Energy Agency Vienna International Centre, 2022. URL: [www.iaea.org/publications](http://www.iaea.org/publications)
9. Суходоля О. М. Геополітичні та економічні пріоритети енергетичної безпеки України. Стратегічна панорама. 2017. № 1. С. 42–52.
10. Земляний М. Г. До оцінки рівня енергетичної безпеки. Концептуальні підходи. Стратегічна панорама. 2000. № 2. С. 56.
11. Бараннік В. О. Енергетична безпека держави: основні сучасні тенденції та принципи забезпечення. Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили. Серія «Політологія». 2013. Т. 212. Вип. 200. С. 101–106.
12. Микитенко В. На чому базується енергетична безпека держави. Вісник НАН України. 2005. С. 41–47.
13. Бараннік В. О. Ефективність енергоспоживання в державі як індикатор конкурентоспроможності. Міждержавні співставлення. Економічний вісник НТУУ «КПІ». 2010. № 7. С. 14–18. URL: [http://economy.kpi.ua/files/files/3\\_kpi\\_2010\\_7.pdf](http://economy.kpi.ua/files/files/3_kpi_2010_7.pdf).
14. Бобров С. А. Сучасна енергетична політика України та її вплив на енергетичну безпеку держави. Lviv Polytechnic National University Institutional Repository. С. 78. URL: <http://ena.lp.edu.ua>
15. Бохан А. В. Енергетичний потенціал України в аспектах екологічної безпеки та суверенітету. Збалансоване природокористування. 201. №1. с. 178–183.
16. Нові реакторні технології: реалії та перспективи. URL: <https://www.ATOM.org/2020/07/24/novi-reaktorni-tehnologiyi-realiyi-ta-perspektivi.html>
17. Review of integration of small modular reactors in renewable energy microgrids. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121009138?3Dihub>

18. A Ukrainian Roadmap for Small Modular Reactors: Current Activities and Future Plans, 2nd TWG-SMR Meeting : 8 – 11 July 2019, IAEA, Vienna, Austria.
19. NuScale's SMR Technology. URL: <https://www.nuscalepower.com/technology>
20. NuScale Small Modular Reactor (SMR) Overview. URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df17/IV.5-KenLangdon-NuScale.pdf>
21. URL: <https://ecoaction.org.ua/velyki-problemy-malykh-reaktoriv.html>

#### References:

1. Novi reaktorni tehnologiyi: realiyi ta perspektivi. Available at: <https://www.uatom.org/2020/07/24/novi-reaktorni-tehnologiyi-realiyi-ta-perspektivi.html>
2. Review of integration of small modular reactors in renewable energy microgrids. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121009138? =ihub>
3. A Ukrainian Roadmap for Small Modular Reactors: Current Activities and Future Plans, 2nd TWG-SMR Meeting : 8 – 11 July 2019, IAEA, Vienna, Austria
4. NuScale's SMR Technology Available at: <https://www.nuscalepower.com/technology>
5. NuScale Small Modular Reactor (SMR) Overview. Available at: <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df17/IV.5-KenLangdon-NuScale.pdf>
6. Lessons Learned in Regulating Small Modular Reactors Challenges, Resolutions and Insights Marketing and Sales Unit, Publishing Section International Atomic Energy Agency Vienna International Centre, 2022. Available at: [www.iaea.org/publications](http://www.iaea.org/publications)
7. Marketing and Sales Unit, Publishing Section International Atomic Energy Agency Vienna International Centre, 2021. Available at: [www.iaea.org/publications](http://www.iaea.org/publications)
8. Methodologies for seismic soil-structure interaction analysis in the design and assessment of nuclear installations. Publishing Section International Atomic Energy Agency Vienna International Centre, 2022. Available at: [www.iaea.org/publications](http://www.iaea.org/publications)
9. Suhodolya O. M. Geopolitichni ta ekonomichni prioriteti energetichnoyi bezpeki UkraYini. Strategichna panorama. 2017. # 1. S. 42–52.
10. Zemlyaniy M. G. Do otsinki rlvnya energetichnoyi bezpeki. Kontseptualni pidhodi. Strategichna panorama. 2000. # 2. S. 56.
11. Baranik V. O. Energetichna bezpeka derzhavi: osnovni suchasni tendentsiyi ta printsiipi zabezpechennya. Naukovi pratsi Chornomorskogo derzhavnogo univrsitetu Imeni Petra Mogili. Seriya «Polittologiya». 2013. T. 212. Vip. 200. S. 101–106.
12. Mikitenko V. Na chomu bazuetsya energetichna bezpeka derzhavi. Visnik NAN UkraYini. 2005. S. 41–47.
13. Baranik V. O. Efektivni energospozhivannya v derzhavi yak indikator konkurentospromozhnosti. Mizhderzhavni spivstavleniya. Ekonomichniy visnik NTUU «KPI». 2010. # 7. S. 14–18. Available at: [http://economy.kpi.ua/files/files/3\\_kpi\\_2010\\_7.pdf](http://economy.kpi.ua/files/files/3_kpi_2010_7.pdf).
14. Bobrov E. A. Suchasna energetichna politika UkraYini ta yiyi vpliv na energetichnu bezpeku derzhavi. Lviv Polytechnic National University Institutional Repository. S. 78. URL: <http://ena.lp.edu.ua>
15. Bohan A. V. Energetichniy potentsial UkraYini v aspektah ekologichnoyi bezpeki ta suverenitetu. Zbalansovane prirodokoristuvannya. 201. #1. s. 178–183.
16. Novi reaktorni tehnologiyi: realiyi ta perspektivi. Available at: <https://www.uatom.org/2020/07/24/novi-reaktorni-tehnologiyi-realiyi-ta-perspektivi.html>
17. Review of integration of small modular reactors in renewable energy microgrids. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121009138? 3Dihub>
18. A Ukrainian Roadmap for Small Modular Reactors: Current Activities and Future Plans, 2nd TWG-SMR Meeting : 8 – 11 July 2019, IAEA, Vienna, Austria.
19. NuScale's SMR Technology. Available at: <https://www.nuscalepower.com/technology>
20. NuScale Small Modular Reactor (SMR) Overview. Available at: <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df17/IV.5-KenLangdon-NuScale.pdf>
21. Available at: <https://ecoaction.org.ua/velyki-problemy-malykh-reaktoriv.html>

Стаття надійшла до редакції 23.06.2022р.