

# РЕСУРСО- ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА ПІДПРИЄМСТВАХ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ГАЛУЗІ І У ЛИВАРНИХ ЦЕХАХ

ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 31, 2023, № 4 (335), 64-74

<https://doi.org/10.15407/steelcast2023.04.08>

УДК 620.98

**Л.Ю. Назюта**, д-р техн. наук, проф., e-mail: nazutaludmila3@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-8692-5243>

**Д.В. Степаненко**<sup>1</sup>, аспірант, e-mail: Danikstepanenko.95@gmail.com

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (Київ, Україна)

## Енергетична та екологічна безпека в контексті розвитку атомної енергетики

*Проаналізовано основні причини світової енергетичної кризи, зв'язок енергетичної та екологічної безпеки в контексті глобального розвитку суспільства. Акцентовано увагу на різке відставання атомної енергетики від відновлюваної з точки зору залучення інвестицій. Розглянуто структуру атомної енергетики світу. Проаналізовано типи, технології та терміни експлуатації атомних реакторів, а також перспективи впровадження в атомну енергетику нових технологій і конструкцій агрегатів. Показано, що більшість експлуатованих атомних реакторів не завжди відповідають сучасним вимогам у контексті технологічної ефективності та екологічної безпеки. Проаналізовано причини неконтрольованого поширення ядерного озброєння, можливі аварії на атомних електростанціях, а також небезпеку накопичення ядерних відходів. Проаналізовано причини та наслідки аварій на АЕС «Фукусіма» в контексті роботи реакторів у регіонах з високою сейсмічною небезпекою. Показано, що для того, щоб бути затребуваними у виробництві електроенергії, ядерні технології потребують змін. Вважається, що майбутнє атомної енергетики — реактори на швидких нейтронах, ядерні реактори на хвилі, що біжить, а також технології з використання замість збагаченого урану ізотопу торію. Особливе місце в структурі атомної енергетики мають посісти малі модульні реактори (Small modular reactors, SMR), невеликі за розмірами та потужністю (наприклад реактор Oklo Auroga, який проходять процес ліцензування у США та Канаді). Зазначено, що для повної реалізації потенціалу сучасних атомних технологій у глобальному масштабі знадобляться нові, гнучкіші правила регулювання, ліцензування та фінансування, а також оновлення глобальної основи ядерної безпеки та нерозповсюдження ядерної зброї.*

**Ключові слова:** атомна енергетика, енергетична криза, екологія, ядерна безпека, ядерні реактори, відходи ядерного палива, уран, плутоній, торій.

**Вступ.** Сучасна світова економічна криза загострила багато проблем, пов'язаних із забезпеченням глобальної безпеки в різних сферах, зокрема в енергетиці та екології. Сучасна економіка базується на викопному паливі, яке, на думку кліматологів [1, 2], є основною причиною глобального потепління. Тому для забезпечення сталого існування міжнародної спільноти необхідна стратегія енергетичного розвитку, що враховує екологічну безпеку.

Одна з причин глобальної енергетичної кризи — швидке зростання споживання мінерального палива. Згідно зі статистикою Міжнародного енергетичного агентства (International Energy Agency, IEA) з 1990 р. спостерігається різке підвищення споживання енергетичних ресурсів [3]. За останні 50 років світове споживання енергетичних ресурсів зросло майже в 4 рази. При збереженні рівня їхнього видобутку світових запасів вугілля вистачить на 250 років, а нафти і природного газу — на 50 років. При цьому необхідно

враховувати, що їхні геологічні запаси нерівномірно розміщені на території планети та можуть бути значно віддалені від потенційних споживачів, які гостро їх потребують.

Початок використання у світовій політиці та міжнародних відносинах терміна «енергетична безпека» відносять до 1973 р. — початку першої глобальної енергетичної (насамперед нафтової) кризи, яка продемонструвала залежність економік провідних індустриальних країн від постачання енергоносіїв. Такі країни, як США, Японія і держави Західної Європи, постали перед необхідністю формування спільної енергетичної політики [4].

У таблиці 1 наведено глобальне (світове) споживання енергетичних ресурсів у розрізі основних джерел за період 1990—2008 рр. Аналіз показує, що структура їх споживання була відносно стабільною. Основним енергетичним ресурсом були викопні вуглеводні (вугілля, нафта і газ), част-

ка яких становила близько 80 %. У 2019 р. при загальному споживанні енергетичних ресурсів близько 160 ПВт-год їхня частка збільшилася до 83 % переважно за рахунок збільшення споживання природного газу. Альтернативні джерела в цей період відігравали невелику роль в енергоспоживанні — близько 13 % і 6 % для відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) і атомної енергії відповідно.

Таблиця 1

Динаміка споживання енергії в розрізі джерел [3]

| Споживання енергії в розрізі джерел, ПВт-год [4] |         |        |              |         |
|--------------------------------------------------|---------|--------|--------------|---------|
| Рік                                              | Викопні | Атомні | Відновлювані | Разом   |
| 1990                                             | 83,374  | 6,113  | 13,082       | 102,569 |
| 2000                                             | 94,493  | 7,857  | 15,337       | 117,687 |
| 2008                                             | 117,076 | 8,283  | 18,492       | 143,851 |
| 2021                                             | 174,828 | 9,8    | 81,83        | 284,66  |

\*Динаміка споживання в розрізі джерел 1990—2008 рр.

\*\*Світове виробництво електроенергії 2021 р.

1 ПВт-год =  $10^{12}$  кВт-год]

Економічні перегони між розвиненими країнами (США, ЄС тощо), які нині приватизували найбільші ринки викопних теплоносіїв, і країнами, що розвиваються (Китай, Індія тощо) та використовують сучасні технології генерації енергії, змінюють глобальну енергетичну карту світу. Енергетична криза являє собою величезну проблему, з якою жодна держава не може впоратися самостійно.

У відповідь на енергетичну кризу економічно розвинені країни намагаються монополізувати глобальні ресурси викопного палива, а країни, що розвиваються, намагаються об'єднатися і розробити свою енергетичну концепцію, в якій ставку роблять на альтернативні джерела енергії.

Суттєво впливають на формування глобальної енергетичної стратегії побоювання країн-постачальників енергоресурсів. Вони вкладають колосальні кошти у створення інфраструктури з видобутку та транспортування енергоносіїв і хочуть бути впевненими, що їхня продукція матиме гарантований попит.

Екологічна безпека посідає центральне місце в системі глобальної безпеки і тісно пов'язана з енергетичною безпекою як на національному, так і на глобальному рівнях. Водночас, на думку фахівців у галузі енергетики, створення життєздатної енергетичної системи, в якій було б обмежено застосування викопного палива, цілком реально. Над розв'язанням цих проблем працюють світові інститути в галузі енергетики під контролем ООН, а також приватні організації в різних країнах.

Світова енергетична криза 2021—2022 рр. спричинена різким збільшенням споживання природного газу. Вона протікала на тлі пандемії COVID в умовах глобального потепління (запровадження вуглецевого податку). Оптові ціни на природний газ і, відповідно, електроенергію різко збільшилися. Наприкінці 2021 р. ціна природного газу зросла в 3...4 рази і перевищила позначку 1990 дол. за тис. м<sup>3</sup>. На початку криза охопила країни ЄС і була пов'язана з дефіцитом і припиненням поставок природного газу з Норвегії та Росії, а потім поширилася на інші країни (США, Індія та Китай) [5].

Ця енергетична криза ще раз нагадала про те, наскільки світ, як і раніше, залежить від викопного палива. Європа була змушена імпортувати скраплений природний газ із США та інших регіонів, а також прискорювати реалізацію проєктів нових трубопроводів з Північної Африки і перезапускати законсервовані вугільні електростанції.

Після вторгнення Росії в Україну дефіцит енергоресурсів на тлі пандемії перетворився на повномасштабну енергетичну кризу. Атомні електростанції, закриття яких планувалося по всій Європі, продовжували працювати.

Війна призвела до колосальних перегонів в галузі озброєння в усьому світі, зокрема за рахунок використання ядерної зброї, яка стає головним інструментом стримування агресії. Після погроз Росії підірвати найбільшу в Європі Запорізьку АЕС заговорили про ядерну безпеку. Страх перед ядерною війною змусив багато країн переглянути свої енергетичні концепції. Як альтернативу природним копалинам (вуглеводням) на глобальному рівні стали розглядати ВДЕ та атомну енергетику.

В умовах світової кризи в питаннях ядерної безпеки суспільство розділилося на два табори. Країни, енергетична стратегія яких орієнтована на використання ВДЕ та скорочення ядерних технологій (розвинені країни — ЄС, США) та країни, що розвиваються, які пов'язують свою економіку з атомною енергетикою.

Згідно з аналізом IEA у найближчі три роки, з 2023—2025 рр., ВДЕ разом з атомною енергетикою задовольнятимуть переважну частину (у середньому понад 90 %) зростання світового попиту на електроенергію. З урахуванням наявних темпів зростання ВДЕ їхня частка у світовому енергобалансі збільшиться з 29 до 35 % у 2025 р. [5].

Однак, як показав досвід європейських країн, повна відмова від інших джерел електроенергії та перехід на ВДЕ не є ефективною. Ключова проблема ВДЕ — як забезпечити безперебійне постачання енергією кінцевих споживачів і особливо після заходу сонця та відсутності вітру.

Атомна енергія є потенційним рішенням обох проблем, забезпечуючи надійне джерело електроенергії, яке може доповнювати змінні джерела відновлюваної енергії в електричних мережах та екологічну безпеку.

Аналіз IEA ще раз підтвердив роль, яку атомна енергетика відіграє та в перспективі відіграватиме в досягненні цілей енергетичної та екологічної безпеки.

Однак, незважаючи на позицію прихильників

ядерної енергетики, технічні, економічні та політичні проблеми, пов'язані з цим видом енергетики, стають досить гострими та стримують її розвиток.

**Мета роботи** — проаналізувати на глобальному рівні ефективність атомної енергетики в контексті енергетичної та ядерної безпеки, показати досвід Китаю в розвитку атомної енергетики нового покоління. Може бути корисною при складанні енергетичного профілю країн, що розвиваються, зокрема України.

**Ситуація в секторі атомної енергетики світу.** Станом атомної енергетики та її впливом на довкілля опікується Міжнародне агентство з атомної енергії МАГАТЕ (International Atomic Energy Agency, IAEA), створене відповідно до рішення ООН від 4 грудня 1954 р., яке входить до системи ООН, здійснює повноваження розвитку співробітництва у сфері мирного використання атомної енергії. Штаб-квартира розташована у Відні, Австрія (<https://www.iaea.org>).

Всесвітня ядерна асоціація (World Nuclear Association, WNA) — міжнародна організація, що займається просуванням ядерної енергетики. WNA щорічно випускає звіт з аналізом подій і тенденцій у світовій атомній галузі (<https://world-nuclear.org/>).

У 2020 р. за участю цих організацій та Європейської економічної комісії ООН групою міжнародних експертів з вуглецевої нейтральності (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) підготовлено та опубліковано два огляди щодо стану атомної енергетики та ядерних технологій. У них показано, що атомна енергетика є джерелом низьковуглецевої електроенергії і тепла та робить істотний внесок в енергетичну безпеку країн з різним рівнем технічного розвитку [6—8]. Викликають інтерес

і дослідження інших організацій щодо стану атомної енергетики в окремих країнах [9—12].

Війна на Середньому Сході на початку 1970-х рр. призвела до підвищення цін на нафту в усьому світі. Провідні енергетичні компанії звернули увагу на нову технологію, яка давала їм змогу не залежати від поставок природного газу та нафти й отримувати дешеву електроенергію. Як результат, більше половини всіх ядерних реакторів світу було побудовано між 1970 і 1985 рр.

Нині атомна енергетика переживає не найпростіший період. Ще десятиліття тому атомна енергетика в багатьох державах світу перебувала в стадії активного зростання. Однак після трагедії на Фукусімі (березень 2011 р.) інтерес до атомної енергетики в багатьох країнах пропав.

Згідно зі світовою статистикою частка атомної енергетики в глобальному енергетичному балансі становила 1995 р. — 18 %, 2012 р. — 10,9 %, 2015 р. — 10,7 %, а 2021 р. — 9,8 % (у країнах ЄС — понад 25 %). Пік атомної енергетики припадає на 2006 р. Глобальне уповільнення атомної галузі є очевидним.

У табл. 2 наведено рейтинг країн за обсягом виробництва електроенергії, виробленої на АЕС у 2020 р. У ній також представлено кількість і тип діючих атомних реакторів [13]. У табл. 3 наведено порівняльний аналіз виробництва електроенергії на АЕС у 1995 і 2021 рр. у країнах з високою часткою атомної енергетики в електроенергетичному секторі. Згідно з аналізом світове виробництво електроенергії за цей період зросло у 2,32 рази (з 12260,7 до 28466,3 ТВт·год), а виробництво електроенергії

Таблиця 2

Країни за обсягом виробництва ядерної електроенергії за даними (Nuclear Power Production by Country) за підсумками 2020 р. [13]

| Країна         | Поставлена ядерна електроенергія, ТВт·год | Частка ринку, % | Кількість діючих реакторів |
|----------------|-------------------------------------------|-----------------|----------------------------|
| США            | 789,9                                     | 30,9            | 96                         |
| Китай          | 344,7                                     | 13,5            | 50                         |
| Франція        | 338,7                                     | 13,3            | 58                         |
| росія          | 201,8                                     | 7,9             | 39                         |
| Південна Корея | 152,6                                     | 6               | 24                         |
| Канада         | 92,2                                      | 3,6             | 19                         |
| Україна        | 71,6                                      | 2,8             | 15                         |
| Німеччина      | 60,9                                      | 2,4             | 6                          |
| Іспанія        | 55,8                                      | 2,2             | 7                          |
| Швеція         | 47,4                                      | 1,9             | 7                          |
| Великобританія | 45,7                                      | 1,8             | 15                         |
| Японія         | 43,1                                      | 1,7             | 33                         |
| Індія          | 40,4                                      | 1,6             | 22                         |
| Бельгія        | 32,8                                      | 1,3             | 7                          |
| Чехія          | 28,4                                      | 1,1             | 6                          |
| Решта світу    | 207,3                                     | 8,1             | 44                         |
| Усього         | 2 553,2                                   | 100             | 448                        |

Джерело: <https://nonews.co/directory/lists/countries/nuclear-power-production>

## Країни з високою часткою виробництва атомної енергії в загальних обсягах країни

| Країна         | Частка АЕС у загальному виробництві електроенергії, % |         | Загальне виробництво електроенергії на АЕС, ТВт·год |          |
|----------------|-------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------|----------|
|                | Рік                                                   |         | Рік                                                 |          |
|                | 1995*                                                 | 2021**  | 1995*                                               | 2021**   |
| Франція        | 78                                                    | 70,6*** | 368,2                                               | 382,4*** |
| Бельгія        | 60                                                    | 47,8*** | 41,9                                                | 41,4***  |
| Швеція         | 43                                                    | 34,0*** | 61,4                                                | 64,4***  |
| Іспанія        | 36                                                    | 20,8    | 56,1                                                | 56,5     |
| Південна Корея | 36                                                    | 26,3    | 58,1                                                | 158,0    |
| Україна        | 33                                                    | 55      | 75,2                                                | 86,2     |
| Німеччина      | 29                                                    | 11,8    | 153,5                                               | 69,0     |
| Японія         | 28                                                    | 6       | 249,3                                               | 61,2     |
| Великобританія | 28                                                    | 15,1    | 89,4                                                | 46,9     |
| США            | 19                                                    | 18,5    | 610,4                                               | 819,1    |
| Канада         | 18                                                    | 14,4    | 94,8                                                | 92,0     |
| рф             | 12                                                    | 19,2    | 119,2                                               | 222,4    |
| Усього         | 18                                                    | 9,8     | 2167,5                                              | 2800,3   |
| Країни ЄС      | —                                                     | 25,3    | —                                                   | 732,2    |

\*За даними [3]

\*\*British Petroleum (BP) [9]

\*\*\*Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ)

атомними електростанціями — в 1,3 рази (з 2167,5 до 2800,3 ТВт·год). Зростання виробництва електроенергії відбувалося переважно за рахунок викопного палива та ВДЕ. При цьому загальний обсяг виробництва атомної електроенергії змінився не суттєво.

Найвища частка атомної енергетики в технічно розвинених країнах ЄС (Франції, Бельгії, Швеції), Північної Америки (США, Канади) і Південної Кореї. Проте і в цих країнах частка атомної енергії в загальному балансі генерації за вказаний період зменшилася. Водночас у деяких країнах (наприклад, в США, росії та Україні) навпаки обсяг виробництва на АЕС збільшився.

Як і в попередні роки, у 2021 р. країни «великої п'ятірки» в атомній енергетиці, а саме США, Франція, Китай, росія та Південна Корея забезпечили виробництво понад 71 % електроенергії, що генерується на АЕС у світі. У 5-ти країнах частка виробництва атомної енергії перевищує 20 %. Світовим лідером за загальним виробництвом є Франція, у якій атомна енергетика є національним пріоритетом (71 %). У США частка атомної енергетики в загальному балансі становить 18,5 %, у росії — 19,2 % (у Європейській частині рф вона більша — близько 30 %). В Україні 2021 р. частка атомної енергії в балансі електроенергії становила 55,1 %.

Деякі країни, зокрема Австрія, Австралія, Греція, Норвегія та ін., не мають атомної енергетики. Низка країн ухвалили рішення скоротити використання атомної енергії для запобігання техногенним катастрофам і послаблення суспільної критики. Зокрема у Німеччині та Швейцарії передбачено повну відмову від експлуатації атомних станцій, причому німецьке керівництво планувало закрити всі діючі енергоблоки

вже до кінця 2022 р.

Станом на 2021 р. у світі налічувалося 448 реакторів, 50 реакторів перебувало в стадії будівництва, більшість з них у країнах, що швидко розвиваються, зокрема Китаї, Індії та росії. Загалом за десятиліття 2010—2019 рр. у світі було запущено 63 нових блоки, з яких 37 (59 %) побудовані в Китаї. Але з експлуатації за той самий час було виведено 55 одиниць, причому жодного в Китаї.

Більшість атомних реакторів було побудовано наприкінці 90-х років ХХ ст. Здебільшого (80 %) це різні види легководних реакторів (LWR — Light Water Reactor) II покоління, в яких для уповільнення нейтронів та/або як теплоносії використовується звичайна вода. Термін їхньої експлуатації закінчується, а використані технології не завжди відповідають сучасним вимогам у контексті технологічної ефективності та екологічної безпеки.

Що стосується терміну експлуатації діючих атомних електростанцій — він неухильно збільшується (30...40 років). У деяких країнах передбачається продовження середнього терміну експлуатації реакторів аж до 80 років. Для компенсації очікуваного виведення реакторів з експлуатації через їхній вік, конкурентоспроможність або інші чинники найближчими роками може виникнути потреба в нових безпечніших реакторах III і IV покоління.

Сьогодні перед багатьма країнами стоїть вибір між заміною, що дорого коштує, застарілих реакторів, можливо ефективнішими, але менш перевіреними моделями, і переходом від атомної енергетики до інших технологій з нижчою вартістю та впливом на навколишнє середовище (наприклад ВДЕ).

Цікаво, що всі країни, які з 2000 р. побудували нові ядерні реактори, не входять до категорії розви-

нених. Страх перед ядерною війною заважає розвитку атомної енергетики в країнах ЄС і США. Вони неохоче розпочинають реалізацію проєктів атомних електростанцій не тільки через ядерну безпеку, а й через нижчу економічну ефективність порівняно з ВДЕ. На атомній енергетиці загалом негативно позначаються низькі ціни на природний газ, особливо після масового видобутку дешевого (у 3...4 рази) сланцевого газу. У багатьох країнах атомна енергетика стала програвати газовим електростанціям, і навіть у США деякі аналітики прогнозують зниження обсягу виробництва енергії на АЕС [15].

Слід зазначити, що, згідно з експертами IEA, основні запаси сланцевого газу знаходяться в Китаї (31,5 трлн м<sup>3</sup>), Аргентині (28,7 трлн м<sup>3</sup>) і США (24,5 трлн м<sup>3</sup>). Ресурси останнього оцінюються на 10...20 років. Росія за запасами сланцевого газу посідає дев'яте місце у світі з обсягом 8 трлн м<sup>3</sup>.

І хоча атомна енергетика у 2021 р. забезпечила генерацію близько 10 % світової електроенергії, і ця частка залишається порівняно стабільною, галузеві експерти та компанії регулярно висловлюють занепокоєння щодо значного зниження діючих генеруючих потужностей та їхньої ринкової частки в останні 10...15 років. Якщо збережуться нинішні тенденції ринку, технологій і ресурсів, то її позиції у світі, розраховуючи на довгострокову перспективу, істотно послабнуть.

За цих обставин атомна енергетика втрачає в ціновій конкурентоспроможності. Згідно з розрахунками найбільшого у світі приватного інвестиційного банку Lazard, у період з 2009 по 2018 р. витрати на реалізацію проєктів сонячної генерації промислового масштабу знизилися на 88 %, вітрової — на 69 %, тоді як атомна енергетика подорожчала на 23 %. У сучасних ринкових умовах високі капітальні витрати на нові проєкти в атомній енергетиці є критичною проблемою.

У цьому контексті слід звернути увагу на різке відставання атомної енергетики від відновлюваної з точки зору залучення інвестицій. Так, у 2018 р. валовий обсяг інвестицій у проєкти нових енергоблоків на АЕС у світі становив 33 млрд дол. США, тоді як аналогічний показник щодо вітрової та сонячної енергетики сягав відповідно 134 і 139 млрд дол. США. Інвестиційні рішення слід розглядати як важливий барометр поточного стану політичної кон'юнктури, а також економічної привабливості технологій на глобальному та регіональному рівнях.

На думку експертів IEA, є висока ймовірність того, що відновлювана енергія домінуватиме в енергетичній системі майбутнього. У міру посилення екологічного законодавства та впровадження нових технологічних рішень її переваги перед атомною енергетикою стають дедалі очевиднішими.

В огляді BusinessViews проаналізовано основні причини, через які багато країн відмовляються від ядерної енергетики [16]. Основний аргумент — ядерна безпека. Практично неможливо розробити ядерну зброю, не маючи технологій ядерного реактора.

Протягом 40 років п'ять країн розробили влас-

ну ядерну зброю за допомогою технології ядерних реакторів. При цьому договір про нерозповсюдження ядерної зброї не завжди справляється зі своїм завданням.

За даними Стокгольмського міжнародного інституту досліджень проблем миру (Stockholm International Peace Research Institute — SIPRI), що проводить дослідження воєнних конфліктів і проблем роззброєння, станом на 2023 р. дев'ять держав (так званий «Ядерний клуб») легітимно володіють ядерними технологіями та у своєму арсеналі мають 12512 ядерних боєголовок. Легітимність діяльності членів «Ядерного клубу» забезпечує договір про нерозповсюдження ядерної зброї 1968 р. Ключова відповідальність за дотримання договору покладається на IAEA, який є міжнародним експертом і періодично проводить перевірки з виконання прийнятих зобов'язань. Станом на 2021 р. крім країн, що володіють ядерним озброєнням, цей договір підписали 176 держав [13].

При цьому на частку росії та США припадає майже 90 % усього ядерного потенціалу світу. Кількість боєголовок є приблизно однаковою. Тому аналітики в галузі ядерної безпеки тривалий час вважали, що ядерні конфлікти між цими країнами наразі малоімовірні.

США і росія мають двосторонній договір про стратегічні наступальні озброєння (ДСНО), який закінчився в лютому 2021 р. [9]. Наразі росія в односторонньому порядку призупинила його пролонгацію, посилячись на відомості про розробку США сучасних ядерних технологій, до яких росія не має доступу, а також на вищий сукупний ядерний потенціал країн НАТО. За даними BBC, у липні 2023 р. частину боєголовок зі США переправлено до Великої Британії.

Іншим аргументом відмови від атомної енергетики, і особливо в технічно розвинених країнах, вважають небезпеку накопичення ядерних відходів. Проблеми, пов'язані з їхнім зберіганням, з кожним роком стають дедалі глобальнішими. Відходи є не тільки радіоактивними, а й містять вкрай небезпечні хімічні елементи, наприклад плутоній. Він втрачає свої властивості через кілька десятків тисяч років. Плутоній використовується у двох цілях — для створення ядерної зброї або як нове паливо. Міліграм плутонію може вбити людину, а з кількох кілограмів можна зробити атомну бомбу.

На думку академіка та голови антиядерного товариства Татарстану Альберта Гаранова, атомна енергетика виробляє не стільки енергії, скільки радіоактивних відходів і матеріалів, які можуть бути використані у військових цілях. Вважають, що у світовій практиці не існує безпечних методів утилізації ядерних відходів. Більшість ядерних сховищ знаходиться на поверхні. Проте у майбутньому всі згодні з тим, що їх краще зберігати глибоко під землею, у контейнерах із цементним наповнювачем. Там вони можуть зберігатися до тисячі років. Проте такий спосіб зберігання ядерних відходів не завжди підтримується екологами та населенням низки країн ЄС. Основний аргумент — у Європі немає вільних площ для їхнього

зберігання. Найбільше глибоке поховання ядерних відходів знаходиться в пустелі штату Невада, США. Поховання в космосі та в глибині океану екологічними активістами не розглядається [17].

У контексті ядерної безпеки слід зазначити, що в більшості країн немає надійних технологій переробки та зберігання ядерних відходів, у тому числі відпрацьованого ядерного палива. Згідно зі стандартами IAEA сховище відходів ядерного палива є ядерною установкою, тож вимоги до їхньої безпеки такі ж, як для АЕС.

Існують мокрі (у водному середовищі в басейнах) і сухі системи зберігання. Сухе зберігання надійніше, ніж мокре. Воно являє собою метод зберігання після мокрої витримки протягом декількох років. Як правило, паливо туди передають у спеціальних контейнерах всередині бетонних модулів, які забезпечують основний радіаційний захист. Там воно зберігається протягом 50...100 років, чекаючи подальшого поховання або повторного залучення їх у ядерний паливний цикл [18]. Сухі системи зберігання є практично у всіх країн з атомною енергетикою.

Найбільше сховище радіоактивних відходів розташоване в Чорнобильській зоні. У період роботи Чорнобильської АЕС за проектом «росатома» було побудовано сховище мокрого типу для відпрацьованого палива трьох блоків АЕС, термін експлуатації якого спливає 2025 р. Тому починаючи з 2015 р. було розпочато будівництво другого сховища за технологією американської компанії Holtec International, яке має усунути залежність України від росії. До цього часу ядерні відходи відправлялися в росію на переробку, що щорічно обходилося в 170 млрд євро. При цьому російське паливо замінюють на паливо від американської компанії Westinghouse. Тут же в зоні відчуження за проектом цієї компанії було побудовано централізоване сховище відпрацьованого ядерного палива контейнерного типу в середовищі нейтрального газу в контейнерах з пасивним повітряним охолодженням. Воно розраховане на зберігання ядерних відходів з Рівненської, Хмельницької, Південноукраїнської АЕС протягом багатьох років (до 100). На площі нового сховища будуть розташовані 468 метало-бетонних контейнерів. У Запоріжжі є своє сховище.

У Чорнобильській зоні також спільно з компаніями Holtec International і Westinghouse планується організувати переробку відпрацьованого палива з метою його залучення до замкнутого ядерного циклу для отримання нового палива для реакторів ВВЕР-1000, зокрема й для експорту в інші країни Європи (Чехію, Словаччину, Фінляндію, Болгарію), залежні від російських ядерних технологій [19].

Таким чином, на думку фізика-ядерника О. Ожаровського, усі проекти, які передбачають захоронення ядерних відходів, зводяться до перекладання проблем на майбутні покоління. Щоб запобігти накопиченню ядерних відходів на поверхневих об'єктах, необхідні кардинальні рішення [17].

І головна причина, на яку звертає увагу населення багатьох країн, — це нещасні випадки та катастро-

фи світового рівня. Загалом за історію експлуатації АЕС у 15-ти країнах сталося понад 200 аварій (втра- та управління ядерною реакцією) та надзвичайних станів. У [20] розглянуто наймасштабніші аварії на АЕС. Вони відбувалися в різних країнах (США, Канада, росія, Велика Британія). Половина аварій — у дослідницьких центрах — були пов'язані з помилками в проектуванні конструкцій агрегатів.

Три найбільші аварії сталися: 1979 р. (США, АЕС Три-Майл-Айленд), 1986 р. (Україна, Чорнобильська АЕС) і 2011 р. (Японія, Фукусіма). Ці катастрофи відбувалися з реакторами абсолютно різних типів, у різних країнах.

Особливу увагу слід приділити аварії на японському острові Фукусіма. Ця аварія була спричинена землетрусом і цунамі та супроводжувалася потужним вибухом реактора [21]. На думку вчених причина аварії пов'язана з глибинними змінами в земній корі.

При цьому слід зазначити, що у вільному доступі немає даних щодо впливу зовнішніх джерел (наприклад випробування ядерної зброї або інших причин рухливості ґрунту) на роботу ядерних реакторів і особливо в період дозаправки палива. Проте науці відомі технології, які можуть спричинити штучний землетрус у районах роботи АЕС. Це ще раз підвищує вимоги до вибору географічного розташування станції та вказує на необхідність постійного контролю за сейсмічними змінами на поверхні землі.

У контексті цього привертає до себе увагу потужний землетрус у лютому-березні 2023 р. на південному сході Туреччини та півночі Сирії амплітудою вище за 7,4 бали в районі Альпійсько-Гімалайського сейсмічного поясу, який є однією з найактивніших зон планети, у зв'язку з чим зберігається постійна загроза виникнення землетрусів [22, 23]. Карту землетрусу в Туреччині 6—7 лютого 2023 р. показано на рис. 1., на

### Землетрясения в Турции 6–7 февраля

Указаны провинции, где есть разрушения

● Землетрясения магнитудой 5 и выше



Источники: AFAD, SANA, Haberturk, МФКК, USGS, Google Maps

© РБК, 2023

Рис. 1. Карта землетрусу в Туреччині 6—7 лютого 2023 р.

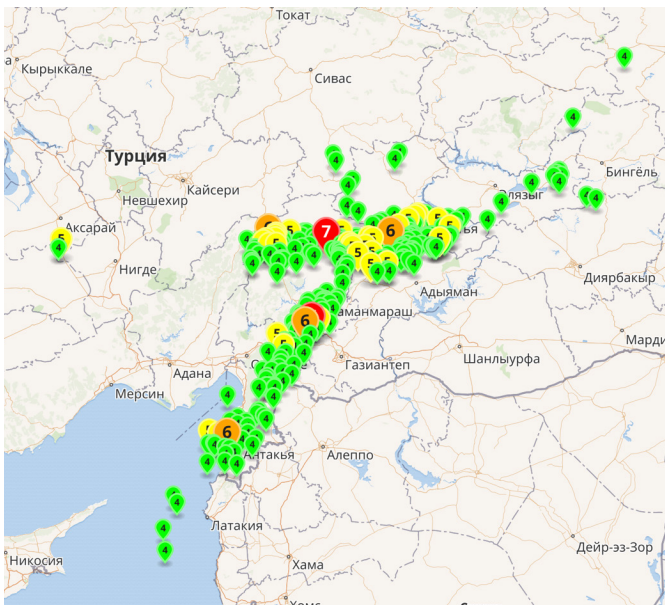


Рис. 2. Карта основних і повторних поштовхів магнітудою 4 і більше одиниць

рис. 2. — карту основних і повторних поштовхів 4 і більше одиниць.

За даними турецького агентства з боротьби зі стихійними лихами AFAD Туреччина має у своєму розпорядженні другу за величиною мережу станцій моніторингу землетрусів у Європі. У Туреччині та прилеглих до неї регіонах осередки землетрусів відстежують і фіксують цілодобово за допомогою 1143 станцій. Так, наприклад, у першому півріччі цього року зафіксовано майже 53 тис. землетрусів магнітудою 4 бали і вище. Невеликі хвилі цунамі було зафіксовано біля узбережжя Кіпру та Італії.

Туреччина давно цікавить сейсмологів усього світу. У Потсдамі, Німеччина, розташовано Німецький дослідницький центр геологічних наук (GFZ), який проводить моніторинг цього району з 1980 р. Ці спостереження показують, що ризик землетрусів особливо високий у всьому регіоні навколо Мармурового моря, на узбережжі якого розташовано м. Стамбул. На думку фахівців цього центру: «Питання не в тому, чи станеться землетрус, питання в тому, коли це станеться».

За даними американських учених сейсмологічна небезпека східного Середземномор'я збережеться протягом 50 років з імовірністю 10 %. Тож зсув плит під Мармуровим морем триває, а безпосередньо біля турецької столиці знаходиться сейсмонебезпечна зона, яка довгий час була підозріло спокійною.

На думку президента Національного інституту геофізики і вулканології Італії Карло Доніолі, внаслідок цього землетрусу стався зсув континентальних плит. Аравійська плита зсунулася на три метри відносно Анатолійської плити (звичайний рух не перевищує 2...3 мм на рік). Вважають, що подібного явища не фіксували за всю історію спостереження.

Що могло бути причиною землетрусів у Туреччині? У соціальних мережах окремі користувачі висловили кілька припущень. Приблизно половина опитаних пов'язують цю катастрофу із заходом у порти Туреч-

чини бойових кораблів США. Третя частина вважають причиною землетрусів застосування американської системи HAARP і удари титановими стрижнями з американських супутників. Це дослідницька програма, розроблена для аналізу іоносфери (частини верхньої атмосфери), яка простягається приблизно від 85 до 600 км вгору над поверхнею Землі. Дослідницька станція HAARP розташована в Гаконі на Алясці [24].

На карті основних і повторних поштовхів з амплітудою понад чотири бали добре видно, що в районі напружень знаходиться найбільша в Європі Турецька АЕС «Аккую», яка розташована на Середземноморському узбережжі в районі Мерсина і Гюльнара. Будівництво велось за проєктом «росатом», яка володіє 100 % акцій у капіталі АТ «Аккую нуклеар». Після завершення будівництва ця компанія має право продати 49 % акцій іншим інвесторам [25].

АЕС «Аккую» включає в себе чотири енергоблоку з водо-водяними реакторами під тиском ВВЕР-1200 (європейський аналог — PWR) покоління III+. Згідно з угодою паливо на станцію постачатиме «росатом». Паливні стрижні будуть використані для виробництва електроенергії протягом 1...5 років. Після закінчення цього терміну відпрацьовані стрижні перевезуть в особливу зону для зберігання. Зберігання та переробку відпрацьованого палива планують у росії. Якщо подібні землетруси повторюватимуться, то на станцію «Аккую» може чекати доля «Фукусіми».

Наразі увагу світової громадськості знову повернуто до аварії на «Фукусімі». 24 серпня 2023 р. АЕС «Фукусіма» почала злив води, що використовувалася для охолодження аварійних реакторів, у Тихий океан. Після аварії ця вода була ретельно відфільтрована і зберігалася в спеціальних резервуарах. Проте у скинутій воді все ще зустрічаються атоми радіоактивних ізотопів водню — тритію. І хоча фахівці, зокрема ІАЕА, вважають, що тритій у тій кількості безпечний для довкілля, екологи та сусідні країни не згодні з таким рішенням. У відповідь Китай заборонив до вживання океанічну рибу [26].

Водночас у період глобальної економічної кризи зростає кількість доводів на користь атомної енергетики для забезпечення енергетичної безпеки країн, що розвиваються. У цьому контексті становить інтерес стаття «Ядерне відродження» провідних експертів з екологічної політики Інституту проривних технологій (Breakthrough Institute) [10]. У ній основну увагу приділено стану атомної енергетики на 2022 р. і перспективам її розвитку.

Показано, що, щоб бути затребуваними у виробництві електроенергії в енергетичних секторах не тільки тих, що розвиваються, а й країн з високим рівнем технологічного розвитку, ядерні технології повинні будуть змінитися.

На думку авторів технологія великих легководних ядерних реакторів на повільних нейтронах LWR, що наразі домінують у цьому секторі, та раніше була ефективною під час заміни викопного палива на ТЕЦ, має поступитися місцем сучасним безпечнішим технологіям. Ці реактори мають складні технологічні рішення, працюють на збагаченому урані

і містять у своєму ядрі велику кількість матеріалу, що розщеплюється. У них необхідно регулярно, приблизно кожні 18 місяців, проводити заміну палива, що спричиняє цілу низку проблем у сфері ядерного розповсюдження та утилізації відходів.

Крім того, легководні реактори, що працюють за нижчих температур, не можуть задовольнити потреби в тепловій енергії для багатьох галузей промисловості. Їхнє використання здебільшого обмежене електроенергетичним сектором. І навіть у цьому секторі вони, маючи обмежену здатність нарощувати та скорочувати потужність, не можуть застосовуватися для мереж, у яких для генерації електрики використовується значна кількість змінної вітрової та сонячної енергії.

З цих причин, щоб відігравати важливу роль у розв'язанні проблем енергетичної безпеки, сектор атомної енергетики повинен значним чином змінитися. Наразі розроблено кілька нових передових реакторних технологій, які більше підходять для промислового використання і націлені на заміну наявного виробництва електроенергії за допомогою спалювання вугілля.

Вважають, що майбутнє атомної енергетики за реакторами на швидких нейтронах, тобто реакторами, в активній зоні яких немає сповільнювачів (переважно графіту) нейтронів. Цей реактор працює на низькозбагаченому урані (5...20 %), який може бути отриманий з відпрацьованого палива інших атомних електростанцій. Ці реактори здатні перетворювати збіднений уран і відпрацьоване ядерне паливо на нове паливо інших АЕС. Використовуючи замкнутий цикл, вони дають змогу збільшити ядерний потенціал палива до 30 % (порівняно з 3 % у звичайних реакторах). Основною перевагою є залучення в паливний баланс замість урану 235 уран 238 і торію 232. У комерційних проєктах використовують схеми з рідким металевим теплоносієм (натрієм або сумішшю свинцю і вісмуту) [10, 28].

Замкнутий цикл дає невичерпний резерв для вторинної переробки ядерних відходів. До недоліків проєкту слід віднести можливість використання цих реакторів як розмножувачів для отримання збройового плутонію.

Однотипними з реакторами на швидких нейтронах є розроблені американською фірмою TerraPower ядерні реактори на хвилі, що біжить. Вони можуть працювати на збідненому урані без дозаправки протягом 40...60 років. Одним з основних інвесторів є Білл Гейтс. Вони також можуть використовувати уран 238 і перетворювати його на ізотоп плутонію 239. Основна відмінність цих реакторів у тому, що реакція відбувається не в усій реакційній зоні, а тепловиділення від ядерної реакції перетворюється на електроенергію за допомогою парових турбін [28, розділ 5.3].

Останніми роками виник інтерес до торієвого паливного циклу, в якому замість урану використовується ізотоп торію (Th-232). У реакторі він трансформується в штучний ізотоп урану (U-233). Останній є ядерним паливом і може бути використаний у реакторах

різного типу спільно з іншими видами палива. Основна перевага торію — доступність. З нього дуже важко зробити ядерну зброю і він продукує вдвічі менше відходів, ніж сучасні ядерні реактори. До того ж, його відходи можуть бути небезпечними лише кілька сотень, а не десятки тисяч років. Одна тонна торію може виробити приблизно стільки ж енергії, як 200 т урану або 3,5 млн т вугілля.

Існують газоохолоджувані реактори, які використовують як теплоносії вуглекислий газ або гелій (NTR). Їхня частка в загальній кількості реакторів не велика і становить не більше 3 %. Деякі типи цих реакторів дають змогу отримувати теплову та електричну енергію.

Що стосується конструкцій реакторів та їхньої потужності, особливе місце займають малі модульні реактори (Small modular reactors, SMR), невеликі за розмірами і потужністю, які складаються з готових модулів, а потім перевозяться на будь-який підготовлений майданчик. Ці вельми компактні реактори є герметичними та не вимагають регулярної заміни палива, у зв'язку з чим вони підходять для застосування, за якого весь реактор може бути підключений до енергетичної мережі або встановлений у віддаленій локації в автономному режимі. Ці реактори можуть працювати протягом багатьох років без заміни палива, а потім їх можна замінити новим пристроєм і відправити назад на завод для заміни палива і переоснащення. Існує понад 70 технологічних проєктів SMR. Серед них слід звернути увагу на реактор «Oklo Aurora», що проходять процес ліцензування у США та Канаді.

Атомна енергетика, як і раніше, залишається джерелом енергії, яке, поряд із відновлюваною енергетикою, здатне прискорити декарбонізацію енергопостачання. Висока питома потужність і надійність ядерних енергетичних установок роблять їх придатними для забезпечення стійкості великих національних енергетичних систем. Зокрема, існують можливості інтеграції атомної генерації з системами відновлюваної енергетики та зберігання електроенергії.

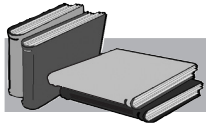
Важливим кроком у досягненні цих цілей стає розвиток міжнародної інфраструктури атомної енергетики, що ґрунтується на широкому міжнародному співробітництві та активній участі всіх зацікавлених країн, наприклад у вигляді створення міжнародних центрів утилізації ядерного палива, у тому числі продуктів збагачення урану і відпрацьованого ядерного палива під наглядом МАГАТЕ (IAEA).

## Висновки

Незважаючи на те, що використання відновлюваних джерел енергії, таких як вітер і сонячна енергія, за останнє десятиліття зросло в рази, ядерна енергетика, як і раніше, є другим за величиною джерелом безвуглецевої електроенергії. Атомна енергетика робить істотний внесок в енергетичну безпеку країн з різним рівнем технічного розвитку.

Розвиток атомної енергетики має підкріплюватися створенням раціональної системи забезпечення безпеки та охорони ядерних матеріалів і об'єктів. Для

повної реалізації потенціалу сучасних технологій у а також оновлення глобальної основи ядерної безпеки та нерозповсюдження ядерної зброї. глобальному масштабі знадобляться нові, гнучкіші правила регулювання, ліцензування та фінансування,

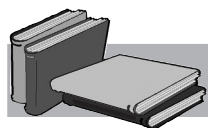


## ЛІТЕРАТУРА

1. Назюта Л.Ю., Степаненко Д.В. На шляху до декарбонізації світової економіки. Глобальне потепління. Кліматичні конференції ООН. *Вісник приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2022. № 45. С. 97—108. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.45.2022.276242>
2. Ортис Д.А. Глобальное потепление: что могу сделать лично я? URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/vert-fut-russian-46126839> (дата звернення: 01.12.2023).
3. Энергетическая статистика. URL: <https://www.eesea.ec.europa.eu/energeticeskaa-statistika> (дата звернення: 01.12.2023).
4. Косов Ю.В. Взаємозв'язок енергетичної та екологічної безпеки в умовах сучасної світової економічної кризи. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper> (дата звернення: 01.12.2023).
5. Данильченко К. Причины и последствия нового мирового кризиса: кто пострадает первым. URL: <https://thepage.ua/economy/energeticheskij-kризis-что-proishodit-s-ekonomikami-mira> (дата звернення: 01.12.2023).
6. Атомная энергия мира. URL: <https://econs.online/articles/details/atomnaya-energiya-mira/> (дата звернення 01.12.2023).
7. Обзор технологий атомной энергетики. URL: [https://unece.org/sites/default/files/2021-08/Nuclear%20brief\\_RU.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2021-08/Nuclear%20brief_RU.pdf) (дата звернення: 01.12.2023).
8. Обзор ядерных технологий 2020. URL: [https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc64-inf2\\_rus.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc64-inf2_rus.pdf) (дата звернення: 01.12.2023).
9. Мир, достоинство и равенство на здоровой планете. Атомная энергия. URL: <https://www.un.org/ru/global-issues/atomic-energy> (дата звернення: 01.12.2023).
10. Нордхаус Т., Ллойд Ю. Ядерное возрождение. URL: <https://www.imf.org/ru/Publications/fandd/issues/2022/12/nuclear-resurgence-nordhaus-lloyd> (дата звернення: 01.12.2023).
11. Демченков Я. Атомна енергетика для кліматично-нейтрального майбутнього. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2021/04/13/672935/> (дата звернення: 01.12.2023).
12. Векторы развития мировой атомной энергетики. URL: <https://www.kazenergy.com/ru/journal/articles/2050> (дата звернення: 01.12.2023).
13. Рейтинг стран по производству атомной энергии. URL: <https://nonews.co/directory/lists/countries/nuclear-power-production> (дата звернення: 01.12.2023).
14. Сет А. Роль атомной энергии в мировой энергетике и производстве электроэнергии. URL: <https://www.ieer.org/ensec/no-1/no1russ/glbng.html> (дата звернення: 01.12.2023).
15. Хижняк Н. Сланцевая революция: мощнее, чем цветная? URL: [https://www.bbc.com/ukrainian/ukraine\\_in\\_russian/2012/04/120415\\_ru\\_s\\_shall\\_gas\\_international](https://www.bbc.com/ukrainian/ukraine_in_russian/2012/04/120415_ru_s_shall_gas_international) (дата звернення: 01.12.2023).
16. Что нам делать с атомной энергетикой? URL: <https://businessviews.com.ua/ru/strategies/id/что-ne-tak-ili-tak-s-jadernoj-energij-i-stoit-li-chelovechestvu-ispolzovat-ee-dalshe-1532/> (дата звернення: 01.12.2023).
17. АЭС — проблема будущего: в мировой практике не существует безопасного метода утилизации ядерных отходов. URL: <https://canecca.org/aes-problema-budushhego-v-mirovoj-praktike-ne-sushhestvuet-bezopasnogo-metoda-utilizaczii-yadernyh-othodov/> (дата звернення: 01.12.2023).
18. О современном методе хранения отработавшего ядерного топлива. URL: <https://habr.com/ru/articles/400511/> (дата звернення: 01.12.2023).
19. Централизованное хранилище ядерного топлива вскоре смогут использовать. URL: <https://www.epravda.com.ua/rus/news/2021/08/20/677095/> (дата звернення: 01.12.2023).
20. Ткачук Я. Самые масштабные радиационные аварии мира. URL: <https://kosatka.media/ru/category/blog/news/samye-masshtabnye-radiacionnye-avarii-mira> (дата звернення: 01.12.2023).
21. Козлов І. та ін. Розвиток методів переоцінки ядерної безпеки з урахуванням уроків великої аварії на АЕС Fukushima-Daiichi. Lambert Academic Publishing. 2014.
22. В Турции с начала 2023 года зафиксировано почти 53 тысячи землетрясений. URL: <https://focus.ua/world/577353-v-turcii-s-nachala-2023-goda-zafiksirovano-pochti-53-tysyachi-zemletryaseniy> (дата звернення: 01.12.2023).
23. Фукс Х., Блейкер К. Причины землетрясения в Турции. Что говорят эксперты из ФРГ. URL: <https://www.dw.com/ru/prichiny-zemletrasenia-v-turcii-cto-govorat-nemeckie-eksperty/a-64634863> (дата звернення: 01.12.2023).
24. Кто виноват в землетрясении в Турции? URL: <https://ruinform.com/page/kto-vinovat-v-zemletrjasenii-v-turcii> (дата звернення: 01.12.2023).
25. Гибридный атом. Россия использует коррупционную «черную дыру» для экспансии. URL: <https://crime-ua.com/node/30224> (дата звернення: 01.12.2023).
26. Фройнд А. Опасен ли сброс в океан радиоактивной воды с «Фукусимы-1»? URL: <https://www.dw.com/ru/opasna-li-sbrasyvaema-v-tihij-ocean-radioaktivnaa-voda-s-aes-fukusima1/a-66613292> (дата звернення: 01.12.2023).

27. Барьяхтар В.Г., Данилевич М.Г., Леженко И.В. Ядерные реакторы на быстрых нейтронах и их роль в XXI веке. *Путанья атомної науки і техніки*. 2016. № 4(104). С. 125—130.
28. Энергетика. История, настоящее и будущее. Книга 4. Развитие атомной энергетики и объединенных энергосистем. URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-4> (дата звернення: 01.12.2023).

Надійшла 05.12.2023



## REFERENCES

1. Nazyuta, L.Yu., Stepanenko, D.V. (2022). On the way to decarbonization of the world economy. Global warming. UN climate conferences. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, 45, 97-108. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.45.2022.276242> [in Ukrainian].
2. Ortis, D.A. (2018). Global warming: what can I do personally? URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/vert-fut-russian-46126839> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
3. Energy statistics. URL: <https://www.eesea.ec.europa.eu/en/energeticeskaa-statistika> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
4. Kosov, Yu.V. The relationship between energy and environmental safety in the conditions of the modern world economic crisis. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper> (Last accessed: 01.12.2023) [in Ukrainian].
5. Danilchenko, K. (2021). Causes and consequences of the new global crisis: Who will be affected first. URL: <https://thepage.ua/economy/energeticheskij-krizis-cto-proishodit-s-ekonomikami-mira> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
6. Nuclear power of the world. URL: <https://econs.online/articles/details/atomnaya-energiya-mira/> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
7. Overview of nuclear power technologies. URL: [https://unece.org/sites/default/files/2021-08/Nuclear%20brief\\_RU.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2021-08/Nuclear%20brief_RU.pdf) (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
8. Review of nuclear technologies 2020. [https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc64-inf2\\_rus.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc64-inf2_rus.pdf) (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
9. Peace, dignity and equality on a healthy planet. Nuclear power. URL: <https://www.un.org/ru/global-issues/atomic-energy> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
10. Nordhaus, T., Lloyd, Y. (2022). Nuclear renaissance. (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
11. Demchenkov, Ya. (2021). Nuclear power for a climate-neutral future. (Last accessed: 01.12.2023) [in Ukrainian].
12. Vectors of the development of world nuclear power. URL: <https://www.kazenergy.com/ru/journal/articles/2050> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
13. Ranking of countries on the production of nuclear power. URL: <https://nonews.co/directory/lists/countries/nuclear-power-production> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
14. Seth, A. The role of nuclear power in world energy and electricity production. URL: <https://www.ieer.org/ensec/no-1/no1russ/glnrg.html> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
15. Khizhnyak, N. (2012). Is slate revolution: more powerful than colorful? URL: [https://www.bbc.com/ukrainian/ukraine\\_in\\_russian/2012/04/120415\\_ru\\_s\\_shall\\_gas\\_international](https://www.bbc.com/ukrainian/ukraine_in_russian/2012/04/120415_ru_s_shall_gas_international) (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
16. What should we do with nuclear energy? URL: <https://businessviews.com.ua/ru/strategies/id/cto-ne-tak-ili-tak-s-jadernoj-energiej-i-stoit-li-chelovechestvu-ispolzovat-ee-dalshe-1532/> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
17. NPP is a problem of the future: there is no safe method of disposal of nuclear waste in world practice. URL: <https://caneecca.org/aes-problema-budushhego-v-mirovoj-praktike-ne-sushhestvuet-bezopasnogo-metoda-utilizacii-yadernyh-othodov/> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
18. About the modern method of storing spent nuclear fuel. URL: <https://habr.com/ru/articles/400511/> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
19. The centralized storage of nuclear fuel will soon be able to be used. URL: <https://www.epravda.com.ua/rus/news/2021/08/20/677095/> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
20. Tkachuk, Ya. (2021). The worst nuclear accidents worldwide. URL: <https://kosatka.media/ru/category/blog/news/samye-masshtabnye-radiacionnye-avarii-mira> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
21. Kozlov, I. et al. (2014). Development of nuclear safety reassessment methods taking into account the lessons of the major accident at the Fukushima-Daiichi NPP. Lambert Academic Publishing [in Ukrainian].
22. Almost 53 thousand earthquakes have been recorded in Turkey since the beginning of 2023. URL: <https://focus.ua/world/577353-v-turcii-s-nachala-2023-goda-zafiksirovano-pochti-53-tysyachi-zemletryaseniy> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
23. Fuks, H., Blaker, K. (2023). Causes of the earthquake in Turkey. What experts from Germany say. URL: <https://www.dw.com/ru/prichiny-zemletrasenia-v-turcii-cto-govorat-nemeckie-eksperty/a-64634863> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
24. Who is to blame for the earthquake in Turkey? URL: <https://ruinform.com/page/kto-vinovat-v-zemletrjassenii-v-turcii> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].

25. Hybrid atom. Russia uses the corruption "black hole" for expansion. URL: <https://crime-ua.com/node/30224> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
26. Freund, A. (2023). Is the discharge of radioactive water into the ocean from Fukushima-1 dangerous? URL: <https://www.dw.com/ru/opasna-li-sbrasyvaemaa-v-tihij-ocean-radioaktivnaa-voda-s-aes-fukusima1/a-66613292> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].
27. Baryakhtar, V.G., Danilevich, M.G., Lezhnenko, I.V. (2016). Fast neutron nuclear reactors and their role in the 21st century. *Problems of atomic science and technology*, 4(104), 125-130 [in Russian].
28. Energy. History, present and future. Book 4. Development of nuclear energy and integrated energy systems. URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-4> (Last accessed: 01.12.2023) [in Russian].

Received 05.12.2023

**Summary**

**L.Yu. Naziuta**, Dr. Sci. (Engin.), Professor,  
e-mail: [nazutaludmila3@gmail.com](mailto:nazutaludmila3@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0005-8692-5243>  
**D.V. Stepanenko**<sup>1</sup>, PhD student, e-mail: [Danikstepanenko.95@gmail.com](mailto:Danikstepanenko.95@gmail.com)

<sup>1</sup>*E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)*

**Energy and environmental safety in the context of nuclear energy development**

*The article analyzes the main causes of the global energy crisis, the connection between energy and environmental safety in the context of the global development of society. Attention is focused on the sharp lag between nuclear and renewable energy in terms of attracting investment. The structure of the world's nuclear power industry is analyzed. The types, technologies and terms of operation of nuclear reactors are analyzed, as well as the prospects for introducing new technologies and unit designs into the nuclear power industry. It is shown that the majority of operated nuclear reactors do not always meet modern requirements in the context of technological efficiency and environmental safety. The reasons for the uncontrolled proliferation of nuclear weapons, possible accidents at nuclear power plants, and the danger of nuclear waste accumulation are analyzed. The causes and consequences of accidents at the Fukushima NPP were analyzed in the context of the operation of reactors in regions with a high seismic risk. It is shown that nuclear technologies will have to change in order to be in demand for power generation. It is believed that the future of nuclear power lies in fast neutron reactors, traveling wave nuclear reactors, and technologies that use thorium isotope instead of enriched uranium. Small modular reactors (SMRs), small in size and capacity (for example, the Oklo Aurora reactor, which is undergoing the licensing process in the United States and Canada), should take a special place in the nuclear power structure. It is noted that the full realization of the potential of modern nuclear technologies on a global scale will require new, more flexible rules of regulation, licensing and financing, as well as updating the global basis of nuclear security and non-proliferation of nuclear weapons.*

**Keywords**

*Nuclear power, energy crisis, ecology, nuclear safety, nuclear reactors, nuclear fuel waste, uranium, plutonium, thorium.*