

ПЕРСПЕКТИВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПОЛІПШЕННЯ ЯДЕРНО-ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Кордуба І.Б.¹, Патлашенко Ж.І.²

¹Київський національний університет будівництва і архітектури

Повітрофлотський пр., 31, 03680, м. Київ

²Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління

вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ

uaror-korduba@ukr.net, deazh@ukr.net

Розглянута найактуальніша проблема існуючої та майбутньої ядерної енергетики щодо забезпечення ядерно-екологічної безпеки роботи ядерних енергетичних реакторних блоків (ЯЕРБ) та атомних електростанцій (АЕС). На сьогодні вона розв'язується завдяки застосуванню глибоко ешелонованого захисту та протиаварійного комплексу методів та засобів для ефективного контролю роботи активних зон реакторів (АЗР), а також реагування на відхилення їх робочих характеристик від проєктних параметрів. Проте небезпека існуючих у світі ЯЕРБ час від часу проявляється у формі важких запроєктних аварій і катастроф з викиданням у навколишнє середовище значної кількості небезпечних для всього живого радіоактивних матеріалів. Сучасні покоління ЯЕРБ були створені та на сьогодні оновлюються у зв'язку з масовим виведенням з експлуатації старих ЯЕРБ, пов'язаним із закінчення їхнього проєктного експлуатаційного ресурсу в основному на базі реакторів типу водо-водяного енергетичного реактора (ВВЕР), кількість яких у світовому ядерному енергетичному парку становить близько 80%. Побудова нових ЯЕРБ та АЕС на базі застарілих реакторних технологій гальмується потужним супротивом світової громадськості. А традиційні економічні підходи та фінансові схеми зведення та використання нових ЯЕРБ та АЕС на сьогодні втратили свою привабливість і тому нові будівництва об'єктів ядерної енергетики перетворюються на дуже дорогі довгобуду. Така ситуація викликає сумніви щодо доцільності інвестицій в сучасну ядерну енергетику, особливо на фоні зростання загального скептицизму в Європі щодо подальшого розвитку гірничої видобувної галузі. Сформульовані головні основоположні науково-технічні та інженерно-фізичні принципи ядерних енергетичних технологій п'ятого покоління G5 (Generation 5) з максимальним еталонним рівнем ядерно-екологічної безпеки для майбутнього розвитку ядерної енергетики в Україні та світі. Технологія ядерних реакторів покоління G5 шляхом вторинного використання відпрацьованого опроміненого ядерного палива (ВОЯП) для виробництва енергії та енергетичної сировини з одночасним його випалюванням до екологічно безпечного стану, здатна досить швидко скоротити наявні запаси та подальше виробництво небезпечного ВОЯП, гарантувати ядерно-екологічну безпеку ЯЕРБ з реакторами G5 та технологічним чином унеможливити ядерні запроєктні аварії та катастрофи на рівні фізичного закону з повним усуненням людського фактору. *Ключові слова:* ядерно-екологічна безпека, ядерний енергетичний реакторний блок, ядерний паливний цикл, ядерні технології п'ятого покоління.

Prospects of technological enhancement nuclear environmental safety and efficiency of nuclear energy. Korduba I., Patlashenko Zh.

The mosturgent problem of the existing and future nuclear power industry is to ensure nuclear and environmental safety of the operation of nuclear power reactor units (NPRUs) and nuclear power plants (NPPs). Today, this problem is solved by applying deeply echeloned protection and an antiaccident complex of methods and means for effective control of the operation of active reactor zones (AZR) and responding to deviations of their operating characteristics from the design parameters. However, the danger of existing NPRUs sin the world periodic allyman if ests itself in the form of severe beyond-design accidents and catastrophes with the release into the environment of a large amount of radioactive materials dangerous fo alliving things. The main fundamental scientific-technical and engineering-physical principles of nuclear energy technologies of the fifth generation G5 (Generation 5) with the maximum reference level of nuclear-environmental safety for the future development of nuclear energy of Ukraine and the world are formulated in the work. The technology of nuclear reactors of the G5 generation through the secondary use of spent irradiated nuclear fuel (SNF) for the production of energy and energy raw materials, with its simultaneous burning to an environmentally safe state, is able to quickly reduce the available stocks and further production of dangerous SNF, guarantee the nuclear and environmental safety of NPRUs with reactors G5 and to technologically make nuclear beyond design accidents and disasters impossible at the level of physical law with the complete exclusion of the human factor. *Key words:* nuclear-environmental safety, nuclea rpower reactor unit, nuclear fuel cycle, nuclear technologies of the fifth generation.

Мета роботи. Сформулювати головні основоположні принципи максимальної ядерно-екологічної безпеки для реакторних енергетичних технологій п'ятого покоління G5 (Geration 5).

Постановка проблеми. Збитки, завдані всіма екологічними аваріями та катастрофами на АЕС світу за всю історію їхньої роботи, становлять понад одного трильйона доларів. Це додає до вар-

тості кожного побудованого реактора в середньому приблизно ще два мільярди доларів. При цьому ліквідація наслідків ядерних катастроф розтягується на тисячі і сотні тисяч років. Тому на сьогодні, з урахуванням екологічних, економічних, соціальних, демографічних, медичних, радіоекологічних, політичних та інших факторів, що визначають перспективу розвитку всього комплексу підприємств

ядерного паливного циклу (ЯПЦ), сформувалася світова думка, згідно з якою вирішальним критерієм для оновлення світової ядерної енергетики має бути екологічний фактор.

В якості такого критерію можна взяти поняття максимальної еталонної безпеки з її кількісним показником, що визначається величинами відношення концентрацій будь-яких техногенних радіонуклідів та інших екологічно шкідливих субстанцій до їх гранично допустимих концентрацій, накопичуваних на промислових майданчиках АЕС та в геосферних середовищах навколо АЕС і на будь-яких відстанях від них.

Актуальність дослідження. Сучасні покоління ЯЕРБ були створені та оновлюються (у зв'язку з масовим виведенням з експлуатації старих ЯЕРБ зважаючи на закінчення їхнього проєктного експлуатаційного ресурсу) в основному на базі реакторів типу ВВЕР, кількість яких у світовому ядерному енергетичному парку становить близько 80% [1].

Коефіцієнт корисної дії (ККД) діючих АЕС з реакторами ВВЕР не перевищує 30-40%, а решта виробленої теплової енергії витратним чином викидається у довкілля. В той же час у світі є значний дефіцит комунального та високотемпературного промислового тепла. Низькою є також і ефективність спалювання ядерного палива [2] не зважаючи на те, що світових запасів урану-235, з огляду на сучасні темпи його споживання, вистачить лише на кілька наступних десятиліть.

За останні 10 років поточні обсяги видобування та перероблення уранової сировини достатні для забезпечення потреб в ядерному паливі у короткостроковій перспективі. Падіння світових цін на уран істотно вплинуло на його світовий видобуток у 2017–2018 роках. Але в довгостроковій перспективі у разі зростання попиту на уран обов'язково виникне потреба у значних інвестиціях для удосконалення технологій його видобування та додаткової розробки законсервованих родовищ.

Внаслідок нейтронного опромінення ядерного палива в АЗР у процесі паливної компанії утворюються високоактивні екологічно небезпечні радіоактивні відходи (РАВ) у формі відпрацьованого опроміненого ядерного палива (ВОЯП). Проблемні питання його безпечної утилізації та переробки на сьогодні залишаються не вирішеними і тому безпечне поводження з таким ВОЯП вимагає складної науково-технічної та промислової інфраструктури [3; 4].

За оцінками МАГАТЕ, за увесь час існування ядерної енергетики, в 14 країнах світу було вироблено приблизно 370000 тонн високорадіоактивного і високотоксичного ВОЯП, яке тривалий час зберігається на АЕС в басейнах витримки для його охолодження та радіоекологічної витримки. З них перероблено 120000 тонн. Щорічно світові запаси ВОЯП збільшуються на 10–20 тис. тонн, а переробляється лише 20–30% цієї кількості.

Так, під час радіохімічної переробки 1 тони ВОЯП з метою вилучення з нього урану та плутонію, утворюється 7500 тонн нових твердих і 1000–2200 тонн рідких, не менш небезпечних за ВОЯП, радіоактивних відходів, що потребують подальшого зберігання і утилізації.

Щоб переробити решту 250000 тон накопиченого ВОЯП знадобиться залучити в радіаційне виробництво і злити потім в навколишнє середовище більше 400 мільйонів тонн забрудненої радіонуклідами води та вивантажити з виробництва приблизно 250 мільйонів тонн твердих небезпечних РАВ.

Побудова нових ЯЕРБ та АЕС на базі старих реакторних технологій гальмується потужним супротивом світової громадськості. А традиційні економічні підходи та фінансові схеми побудови нових ЯЕРБ та АЕС на сьогодні втратили свою привабливість і тому нові будівництва об'єктів ядерної енергетики перетворюються на дуже дорогі довгобуду. Така ситуація викликає сумніви щодо доцільності інвестицій в сучасну ядерну енергетику, особливо на фоні зростання загального скептицизму в Європі щодо подальшого розвитку гірничої видобувної галузі. Тому викладений в роботі підхід щодо створення еталонно безпечної ядерної енергетики є на сьогодні надзвичайно актуальною проблемою.

Викладення основного матеріалу дослідження та обґрунтування отриманих результатів. Для оновлення та розвитку ядерної енергетики України та світу на фоні четвертого енергетичного переходу на відновлювальні джерела енергії має їх потенціал для значного зниження викидів вуглецю у навколишнє середовище. Надзвичайно важливими є дослідження ядерно-екологічної безпеки реакторів типу ВВЕР і в першу чергу їх поколінь III та III+ і в тому числі інноваційних реакторів AP-1000 та малих модульних реакторів ММР типу МР-160 [1]. Саме на базі таких реакторів планується розвиток ядерної енергетики України. Тому необхідні подальші дослідження з метою науково-технічного обґрунтування сучасних пріоритетних завдань з підвищення безпеки АЕС з ЯЕРБ на базі реакторів типу ВВЕР і, зокрема, інноваційних реакторів AP-1000 та МР-160, а також розробка концептуальних основ для створення реакторів наступного покоління G5 [5], в основу яких повинні бути покладені принципи максимальної еталонної ядерно-екологічної безпеки.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. У загальному детальний технологічний та екологічний аналіз реакторів типу ВВЕР, зважаючи на особливості їх експлуатації в умовах війни та терористичних загроз, засвідчує певні недоліки, що прямим чином можуть впливати на їхню ядерно-екологічну безпеку і які не можна усунути шляхом модернізації їх захисних та протиаварійних систем.

Внаслідок важкої запроектованої аварії на реакторах типу ВВЕР може відбутися викидання радіоактивних матеріалів, в кількості еквівалентній кільком Чорнобильським аваріям. При цьому всі відомі ядерні катастрофи на енергетичних реакторах підтверджують особливу небезпеку людського фактору [6] та нерозуміння фізичної суті таких катастроф [7].

Модернізація діючих у світі ядерних реакторів передбачає і реалізує задачі збільшення тиску в реакторі, підвищення робочої температури і збільшення відсотка вигорання палива. Наслідком такої модернізації та роботи ядерних реакторів в продовженому, надпроектному режимі їх експлуатації є додаткове прискорене старіння металу і подальше зниження надійності і безпеки АЕС. Але промислові стандарти ядерних підприємств не завжди це враховують.

Всі діючі у світі реактори не мають спеціально створених надійних методів та засобів захисту від терористичних та воєнних атак.

Існує також небезпека зовнішніх впливів екстремальних непереборних природних явищ – землетрусів і смерчів [8], змін глобального клімату [9; 13], затоплень [10], падіння астероїдів та інших геокосмічних явищ [14].

Викладення основного матеріалу. Сучасні процеси і технології ядерного паливного циклу як і в перспективі мінімум на 2–3 десятиліття технологічно незахищені щодо гарантованого виключення можливого неконтрольованого поширення ядерних матеріалів [11].

На сьогодні в жодній країні світу не існує екологічно прийнятної технології поводження з ВОЯП. В результаті радіохімічної переробки 1 тонни ВЯП, у перерахунку на уран, утворюється 7500 тонн твердих та 2200 тонн рідких радіоактивних відходів (РАВ), які також потребують подальшої утилізації та поховання.

Економічно це невиправдано і будувати такий переробний комплекс у країні з невеликою територією є вкрай небезпечним. Тому все більше країн схилиються до відмови від переробки ВОЯП та починають розглядати його як особливий вид РАВ.

Існує думка про те, що одним із найбільш безпечних варіантів тривалої ізоляції високоактивних відходів від навколишнього середовища та людини можуть бути глибокі геологічні сховища. Однак така думка не має достатнього екологічного обґрунтування, що має враховувати нові знання в галузі астрогеофізики про динаміку та природу енергетичної активності глибоких надр Землі. При цьому будівництво одного такого сховища, аналогічного «Юкка Моунтін» буде коштувати десятки мільярдів доларів США і триватиме кілька десятиліть. Отже, питання щодо створення нових технологій для абсолютної екологічно безпечної нейтралізації та остаточної утилізації ВОЯП залишиться невирішеним на досить тривалий період.

Глибоке поховання ВЯП має здійснюватися на горизонтах до 500 метрів. Проте і на таких глибинах може виникнути фізична ядерна небезпека нових екологічних аварій із непередбачуваними та неконтрольованими екологічними наслідками.

У продуктах розпаду немає матеріалів, що діляться, і їх поховання цілком в нормальних умовах вважається безпечним з точки зору критично масової небезпеки. Але у якийсь геологічний період можуть виникнути тектонічні процеси, здатні спресувати ВТВЗ, а в ВОЯП завжди існує певне нейтронне поле і тому згодом частина U-238 перетвориться в Pu-239 і тектонічне пресування такої маси до її критичного стану може стати небезпечним.

У списку реакторних технологій G4 – 5 проєктів, заснованих на реалізації замкнутого ядерного паливного циклу (ЗЯПЦ) і один проєкт високотемпературного реактора з газовим теплоносієм має організацію відкритого ядерного паливного циклу (ВЯПЦ).

У пост фукусімський період стало очевидним, що стратегія ЗЯПЦ на базі швидких реакторів GIV не призведе до абсолютно безпечної ядерної енергетики. Крім того на сьогодні програма GIV не вкладається до бюджету та у терміни її виконання. Тому, щоб уникнути незліченних ризиків ЗЯПЦ, фахівці наполегливо рекомендують ядерним державам продовжувати відкритий ЯПЦ.

Промислове впровадження замкнутих ядерних паливних циклів GIV вимагає скасування політики нерозповсюдження для країн, що експлуатують, а також істотної зміни існуючих програм і стратегій більшості ядерних країн. При цьому будь-яке промислове використання реакторів GIV на базі ЗЯПЦ вимагає величезних капіталовкладень у старі небезпечні технології для переробних заводів.

У висновку провідних фахівців Масачусетського технологічного інституту щодо технологій G-IV отримано висновок про те, що концепції цих технологій, їх розробники ще не представили переконливих матеріалів щодо реальності декларованих переваг ЗЯПЦ з переробкою ВОЯП та акцентують увагу на зростанні ризиків поширення [12]. Ці дослідження також засвідчили, що для ЗЯПЦ GIV вартість витрат на зберігання та поховання ВЯП у 4,5 рази більша, ніж для паливного циклу з одноразовим незамкненим використанням палива. Тому нереально те, що швидкі технології GIV із ЗЯПЦ одночасно розв'яжуть проблеми високої вартості, безпечного захоронення відходів та розповсюдження.

Наукова новизна полягає в тому, що в основу концепції нової ядерної енергетики та ядерних енергетичних реакторних технологій покоління G-5 [5] з максимальним еталонним рівнем їхньої ядерно-екологічної безпеки для майбутнього розвитку ядерної енергетики України та світу мають бути покладені фізичні закони, що дозволяють реалізувати наступні головні основоположні науково-технічні та інженерно-фізичні принципи:

- використовувати в якості ядерного палива технічний та незбагачений природний уран, а також ВОЯП, що накопичилося в результаті роботи реакторів попередніх поколінь для отримання електроенергії та високотемпературного промислового тепла з метою заміни вуглеводневого палива, промислового виробництва екологічно безпечних енергоресурсів та енергосировини – водню, синтетичного моторного палива та мастила, прісної води, добрив та інших матеріалів;

- увесь ЯПЦ організовується безпосередньо в активній зоні реактора G5 з повним саморегулюванням процесів горіння усіх перерахованих вище видів ядерного палива для технологічного та інженерно-фізичного унеможливлення важких запроєктних аварій з руйнуванням активної зони реактора [14] і радіоекологічних катастроф, а також для розв'язання проблеми нерозповсюдження ядерних технологій та матеріалів подвійного застосування;

- на відміну від реакторних енергетичних технологій попередніх поколінь, активні зони реакторів покоління G-5 [12] не повинні мати понадкритичне завантаження ядерним паливом;

- фізичним законом унеможливити запроєктні аварії з їх катастрофічними ядерно-екологічними наслідками в результаті воєнних та терористичних атак;

- поза конкурентна висока економічність проєктування, будівництва та експлуатації ЯЕРБ;

- внутрішньо реакторна ядерно-екологічна безпека та поглиблення її технологічних основ для біологічної сумісності та соціальної прийнятності технологій на всіх ланках нового ЯПЦ;

- повна відсутність людського фактору, зниження капітальних, експлуатаційних та після експлуатаційних витрат шляхом застосування серійних матеріалів та обладнання з мінімальною номенклатурою, оптимізація поведінки з РАВ та ОЯП, усунення ремонтних робіт та частих перезавантажень ядерного палива, мінімізація чисельності персоналу, оптимізація витрат на НДЕКР;

- гарантовану найвищу ядерно-екологічну безпеку, яка включає: повну радіоекологічну безпеку в будь якій нештатній ситуації роботи; нехтувано мале радіоактивне забруднення реакторного залу; радіаційне опромінення персоналу і зовнішнього навколишнього середовища.

Перспективи використання результатів дослідження. В подальших дослідженнях особливу увагу

слід зосередити на перспективах розвитку світової ядерної енергетики та забезпечення її ядерно-екологічною безпекою в умовах четвертого глобального енергетичного переходу та здійснити перехід на нові безпечні ядерно енергетичні технології покоління G5. Такі технології, завдяки своїм інженерно-фізичним та технічним особливостям, повинні істотно і позитивно вплинути на функціонування й розвиток національних та глобальних систем енергетичної безпеки. Крім цього досягнути головної цілі нинішнього глобального енергетичного переходу – нульового впливу на глобальне здоров'я цивілізації та на глобальну кліматичну безпеку.

Головні висновки. Всі реактори поколінь II, III, III+ та IV, що знаходяться на сьогодні в експлуатації, мають потенціал катастрофічних аварій, виробництва небезпечного відпрацьованого опроміненого ядерного палива (ВОЯП), можливість неконтрольованого поширення ядерних матеріалів, відсутність екологічно прийнятної технології переробки ВЯП при недостатності обґрунтувань екологічної безпеки будь-яких видів тривалого зберігання ВОЯП, у тому числі його глибоке поховання в геологічних породах. Вищевикладене стосується також і реакторів покоління IV, що розробляються вже понад 20 років.

Нові безпечні ядерні енергетичні технології покоління G5 допоможуть зняти питання дефіциту уранового палива на сотні років, що в свою чергу практично необмежено розширить сировинні ресурси для виробництва дешевої електричної енергії та високотемпературного тепла. В свою чергу, це дозволяє виключити з ядерного паливного циклу дуже складний процес збагачення природного урану і разом з тим вирішити проблему накопичення екологічно небезпечного радіоактивного ВОЯП та відходів утворених в процесі його переробки.

Технологія G5 шляхом вторинного використання ВЯП для виробництва енергії та енергетичної сировини, з одночасним його випалюванням до екологічно безпечного стану, здатна швидко скоротити наявні запаси та подальше виробництво небезпечного ВОЯП, гарантувати ядерно-екологічну безпеку ЯЕРБ з реакторами G5 та технологічним чином унеможливити ядерні запроєктні аварії і катастрофи на рівні фізичного закону з повним уникненням людського фактору.

Література

1. В.М. Ващенко, І.Б. Кордуба, О.Г. Жукова. Технологічні та експлуатаційні особливості реакторів AP-1000 покоління III+ та малих модульних реакторів MR-160. *Екологічна безпека та природокористування*. 2021. № 4(40). С. 149–156.
2. С.В. Широков, В.В. Засц. Глибина вигорання ядерного палива ВВЕР з різними вигорючими поглиначами. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2011. № 4(52). С. 29-32. [https://doi.org/10.32918/nrs.2011.4\(52\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2011.4(52).04)
3. Федоренко О.О., Микитенко Л.З. Проблематика утилізації радіоактивних відходів в Україні. Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології: зб. матеріалів Нац. форуму (4–5.11.2014 р., Київ). Київ, 2014. С. 125–127.
4. V. Vashchenko, V. Skalozubov, O. Voloshkina, I. Korduba, I. Dudarev, H. Hayo, O. Zhukova, V. Hryb. Stipulating the radioecological impact of consequences of accidents at nuclear power facilities. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021. №11(10). С. 24–27.
5. Rusov V.D. Tarasov V.F. Vashchenko V.M. Treveling vave nuclear reactor. *Science Technology Sustainable Development*. Kiev. 2013. 130 с.

6. П. Дряпаченко. Об'єктивізація концепції «довічного» супроводу зони відчуження, наявність та необхідність подолання людського фактору в супроводі ядерних підприємств та установок. *Проблеми безпеки атомних станцій та проблем Чорнобиля*. Вип. 3 Ч. 1. 2005. С. 102-110.
7. Б.С. Пристер, А.А. Ключников, В.М. Шестопалов, В.П. Кухарь. Проблемы безопасности атомной энергетики. Уроки Чернобыля : монография. Чернобыль. 2013. 200 с.
8. Ващенко, В.М., Кордуба, І.Б., Лоза, Є.А., Патлашенко, Ж.І., Банніков, О.О., Кризська, Ю.М. Статистика смерців на території України на основі нових даних. 2018. *Геофізичний журнал*. Vol. 40. № 3. С. 199–213.
9. В.Д. Русов, А.В. Глушков, В.Н. Ващенко. Астрофизическая модель глобального климата Земли. 2003. Київ. 214 с.
10. В. И. Скалозубов, В. Н. Ващенко, И. Л. Козлов, Т. В. Габлая, Т.В. Герасименко. Гидродинамическая модель затопления промплощадки АЭС Fukushima-Daiichi. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2014. № 2(62). С. 13–16.
11. Кондратов С.І. Тенденції та актуальні проблеми у сфері протидії незаконному обігу ядерних та інших радіоактивних матеріалів, також ядерному та радіаційному тероризму. Аналітична доповідь. Київ. 2012. 27 с.
12. Бэкфорд. Э. Будущее атомной энергетики // Междисциплинарное исследование Массачусетского технологического института. URL: <http://www.seu.ru/programs/atomsafe/books/FAE1.pdf>.
13. Vitaliy D. Rusov, Victor A. Tarasov, Volodymyr N., Vashchenko, Sergei A. Chernezhenko, Andrei A. Kakaev, Oksana I. Pantak. Fast traveling-wave reactor of the channel type. *Interdisciplinary Studies of Complex Systems*. 2016. No. 9. P. 36–57.
14. Ю.Д. Медведєв, Ю.С. Бондаренко, Д.Е. Вавілов, В.А. Шор. Проблеми дослідження астероїдно-кометної небезпеки. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2016. Т. 32. № 5. С. 18–24.