

Л. Ю. НАЗЮТА, Д. В. СТЕПАНЕНКО

АТОМНА ЕНЕРГЕТИКА КИТАЮ В КОНТЕКСТІ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ СВІТОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Проаналізовано глобальну структуру споживання енергетичних ресурсів. Показано, що загальне споживання енергоресурсів у 20 столітті зросло майже в 15 разів і становило у 2000 році близько 118 ПВт·год. З них понад 80 % припадало на викопні (природні) енергоносії, 13 % – на поновлювані джерела енергії і понад 6 % – на атомну енергетику. Така тенденція зберігалася протягом багатьох років. Згідно з прогнозами, відновлювальні джерела енергетики та атомна енергетика домінуватимуть у зростанні світового енергоспоживання, задовольняючи в середньому понад 90 % додаткового попиту. Китай посідає перше місце у світі за ВВП і темпами розвитку електроенергетичного комплексу, а також за обсягом виробництва і темпами розвитку атомної енергетики. Проаналізовано структуру вироблення електроенергії за видами палива в країнах (ТОП 5, 2021) з високим рівнем енергоспоживання. Показано, що основними гравцями на цьому ринку займають три країни: Китай (30 %), США (13 %) та Індія (6 %). Обсяг виробництва електричної енергії в Китаї майже втричі більший, ніж у країнах ЄС і майже в 7 разів більший, ніж у Росії. Розглянуто структуру атомної енергетики та досягнення Китаю в цій галузі. Показано, що в контексті ядерних технологій (створення реакторів четвертого покоління, розробка технологій, близьких до повного замкнутого циклу переробки ядерних відходів) Китай уже зараз готовий значно розширити масштаби застосування атомної енергетики. Особливе місце в роботі приділено безпеці експлуатації ядерних об'єктів. Основна проблема, з якою зіткнеться Китай, – це відсутність нездоланного бар'єру між цивільним і військовим застосуванням таких технологій. Це створює серйозну загрозу екології та безпеці життєдіяльності країни. У довгостроковій перспективі атомній енергетиці належить вирішити також проблему безпечної, довготривалої утилізації радіоактивних відходів. Показано, що надалі Китаю необхідно ще раз розглянути свою ядерну програму в контексті співпраці з Міжнародними організаціями з ядерної безпеки.

Ключові слова: Китай, декарбонізація, енергетика, викопне паливо, відновлювальні джерела енергетики (ВДЕ), атомна енергетика, енергетична криза, ядерна безпека.

L. YU. NAZYUTA, D. V. STEPANENKO

CHINA'S NUCLEAR POWER IN THE CONTEXT OF DECARBONIZATION OF THE GLOBAL ENERGY INDUSTRY

The global structure of energy resource consumption is analyzed. It is shown that the total consumption of energy resources in the 20th century increased almost 15 times and amounted to about 118 PWh in 2000. Of these, more than 80% were fossil (natural) energy carriers, 13 % were renewable energy sources and more than 6 % were nuclear power. This trend has continued for many years. Renewable energy sources and nuclear power are projected to dominate the growth of global energy consumption, meeting on average more than 90 % of the additional demand. China ranks first in the world in terms of GDP and the rate of development of the electric power complex, as well as in terms of production volume and the rate of development of nuclear power. The structure of electricity generation by fuel type in countries (TOP 5, 2021) with high energy consumption has been analyzed. It is shown that the main players in this market are three countries: China (30 %), USA (13 %) and India (6 %). The volume of electricity production in China is almost three times larger than in the EU countries and almost 7 times larger than in Russia. The structure of nuclear energy and China's achievements in this field are considered. It is shown that in the context of nuclear technologies (creation of fourth-generation reactors, development of technologies close to the full closed cycle of nuclear waste processing) China is already ready to significantly expand the scope of nuclear energy. Special attention is paid to the safety of nuclear facilities operations. The main problem China will face is the absence of an insurmountable barrier between civilian and military use of such technologies. This poses a serious threat to the ecology and life safety of the country. In the long term, nuclear power must also solve the problem of safe, long-term disposal of radioactive waste. It is shown that in the future China needs to re-examine its nuclear program in the context of cooperation with International Nuclear Security Organizations.

Keywords: China, decarbonization, energy, fossil fuels, renewable energy sources (RES), nuclear power, energy crisis, nuclear safety.

Вплив енергетичних криз. Сучасні тенденції розвитку світової цивілізації характеризуються стрімким зростанням економіки країн, що розвиваються (Китаю, Індії, країн Південно-Східної Азії), і, відповідно, споживанням енергетичних ресурсів. За даними Міжнародного енергетичного Агентства (International Energy Agency, IEA) загальне споживання енергоресурсів у 20 столітті зросло майже в 15 разів і становило у 2000 році близько 118 ПВт·год. З них понад 80 % припадало на викопні (природні) енергоносії, 13 % – на поновлювані джерела енергії (ВДЕ) і понад 6 % – на атомну енергетику. Така тенденція зберігалася протягом багатьох років. Так, наприклад, 2021 року загальна витрата енергії у світі зросла в півтора раза. Однак, як і раніше, близько 82 % її витрат припадало на викопні вуглеводні [1, 2].

Щодо дефіциту енергетичних ресурсів, то за даними British Petroleum за останні 50 років їхнє світове споживання зросло майже вчетверо. Згідно з

розрахунками цієї компанії при збереженні рівня видобутку світових запасів вугілля вистачить на 250 років, а нафти і природного газу на 50 років.

Швидке зростання споживання природних копалин (здебільшого вуглеводнів) чинить негативний вплив на клімат планети (сприяє глобальному потеплінню) і є причиною енергетичних криз [3, 4]. Світова енергетична криза 2021–2023 рр. нагадала про те, на скільки світ залежить від викопного палива в забезпеченні енергетичної безпеки, яка стає основним елементом національної (зокрема економічної) безпеки практично всіх країн. Залежно від структури виробництва та наявності власних енергетичних ресурсів розглядають кілька моделей подолання кризи. Вважають, що найуразливішими є країни-імпортери природних копалин, які розвиваються [5, 6].

Згідно з прогнозами IEA, ВДЕ та атомна енергетика домінуватимуть у зростанні світового електропостачання найближчими роками,

© Н. Ю. Назюта, Д. В. Степаненко, 2024

задовольняючи в середньому понад 90 % додаткового попиту. Разом з тим, поновилися дискусії щодо майбутньої ролі атома в енергобалансі економічно розвинених країн (ЄС і США), які прагнуть розширити використання альтернативних джерел енергії, щоб витіснити викопні види палива в таких секторах, як транспорт, опалення та промисловість.

Основною галуззю енергетичного комплексу кожної країни є виробництво електричної енергії. За даними British Petroleum світове виробництво електроенергії починаючи з 1980 року мало тенденцію зростання. За період з 1991 по 2021 роки вироблення електроенергії зросло в 2,4 раза і склало 28460 ТВт-год. Глобальний тренд збільшення вироблення і споживання електроенергії (переважно завдяки альтернативним джерелам енергії) викликаний високими темпами зростання економіки в країнах, що розвиваються, і прагненням економічно розвинених країн поліпшити екологічну безпеку завдяки скороченню витрат викопного палива і переходу на альтернативні джерела енергії.

При цьому слід зазначити, що в період енергетичної кризи протягом 2020 року світове виробництво електроенергії збільшилося на 6,5 %. Насамперед за рахунок її зростання в країнах, що розвиваються, на які припадає понад 70 % світового попиту на електроенергію. За цей рік виробництво електроенергії збільшилося в Індії на 9,7 %, Саудівській Аравії – на 6 %, Китаї – на 3,7 %, США – на 3,2 % [7, 8].

У таблиці 1 наведено рейтинг країн (ТОП 5) з вироблення електроенергії у 2021 році за видом палива. Як випливає з представлених даних, основну частину ринку електроенергетики займають три країни – Китай (30 %), США (13 %) та Індія (6 %). Обсяг виробництва електричної енергії в Китаї майже втричі більший, ніж у країнах ЄС і майже в 7 разів більший, ніж у Росії.

Структура виробництва електроенергії в цих країнах залежить від наявності власних копалин. Тому в Китаї та Індії основним енергоносієм є вугілля, у Росії – природний газ. У Канаді основний акцент роблять на гідроенергетику, у США – на скраплений природний газ (СПГ) і альтернативні джерела енергії.

Сучасну структуру атомної енергетики, досягнення та екологічні ризики в роботі цього сектору проаналізовано у [9]. У зазначеній статті показано, що в умовах глобальної енергетичної кризи атомна

енергетика продовжувала розвиватися і відіграла ключову роль у відновленні світової економіки, забезпечивши стрімке зростання електроенергетичного комплексу.

Головні гравці на ринку енергоресурсів США та Китай мають стратегію власної енергетичної безпеки і протистоять один одному в тактиці та стратегії розвитку своєї економіки. І хоча в Китаї частка атомної енергетики в загальному балансі виробітку майже вчетверо менша, ніж у США (4,8 порівняно з 18,5 %) загальний обсяг виробництва атомної складової практично не відрізняється. Крім того, за темпами розвитку цієї галузі Китай значно випереджає США і посідає перше місце у світі.

У зв'язку з цим **метою статті** є аналіз структури атомної енергетики Китаю, зокрема особливості експлуатації сучасних типів атомних реакторів у контексті ядерної безпеки та обслуговування їхньої роботи. Цей аналіз може бути корисним у період реформування енергетичного комплексу України після закінчення воєнних дій.

Структура атомної енергетики Китаю. Нині, за даними Світового банку, Китай посідає перше місце у світі за ВВП і темпами розвитку електроенергетичного комплексу – ключовою галуззю його економіки. Китай посідає перше місце у світі за обсягом виробництва і темпами розвитку атомної енергетики. І друге місце після США за виробництвом електроенергії та кількістю діючих і споруджуваних атомних електростанцій (АЕС).

У період енергетичної кризи, щоб не знижувати темпи зростання економіки, відмовився від штучного обмеження споживання енергії та зберіг високу частку вугільної складової у виробленні електричної енергії. Тому питання екології Китаю набувають особливого значення.

В умовах зростаючої конкуренції за доступ до енергоресурсів з боку країн, що розвиваються, позиція Китаю залишається вразливою. Раніше Китай забезпечував енергоресурсами не тільки себе, а й своїх сусідів – Південну Корею і Японію. Однак нині він є найбільшим імпортером нафти (понад 18 % світового ринку) і природного газу. З 2016 року – є імпортером СПГ (з Австралії). Згідно з прогнозами, частка природного газу в енергобалансі Китаю до 2050 року зросте з 9 % до 14 %.

Таблиця 1 – Список країн за кількістю вироблення електроенергії у 2022 році за видом палива за даними British Petroleum

| Країна | Обсяг виробництва ТВт-год (%) | Структура виробництва, % від загального виробітку в країні | | | | | |
|-----------|-------------------------------|--|------|-------|----------------------------------|------|--------|
| | | Викопні енергоносії, % | | | Альтернативні джерела енергії, % | | |
| | | Вугілля | Газ | Нафта | Гідроенергетика | ВДЕ | Атомна |
| Китай | 8334 (30) | 62,6 | 3,2 | 0,1 | 15 | 14 | 4,8 |
| США | 4406 (16) | 22,2 | 38,4 | 0,5 | 5,8 | 14 | 18,5 |
| Індія | 1715 (6) | 74 | 3,7 | 0,1 | 9,3 | 10,1 | 2,6 |
| Росія | 1159 (4) | 17,7 | 43 | 0,7 | 18,5 | 0,5 | 19,2 |
| Канада | 641 (2) | 6 | 11,8 | 0,5 | 59,4 | 7,8 | 14,4 |
| Країни ЄС | 2895 (10) | 15,2 | 19 | 1,5 | 12 | 25 | 25,3 |
| Усього | 28466 (100) | 36 | 23 | 2,5 | 15 | 12,8 | 9,8 |

Диверсифікація енергетичного балансу є основним способом забезпечення економічної безпеки країни. У плані її забезпечення важливу роль має відіграти атомна енергетика. У 2005 році ухвалено довгострокову програму її розвитку. Відповідно до цієї програми китайські компанії активізували співпрацю з Міжнародним агентством з атомної енергії (МАГАТЕ), а також із зарубіжними постачальниками урану – з Росією, Казахстаном і Узбекистаном [10]. Офіційний початок атомної енергетики в Китаї – 20 березня 1985 року, коли почалося будівництво реактора Qinshan-1 (тип реактора – водо-водяний ядерний реактор (ВВЕР)) на Циньшанській АЕС, який було запущено 15 грудня 1991 року.

Стан атомної енергетики Китаю та перспективи розширення масштабів атомної галузі наведено в [11–14]. Станом на січень 2022 року атомна енергетика Китаю має 54 діючих промислових ядерних реактори, розміщених на 18 АЕС, сумарною потужністю 50,8 ГВт. Середня тривалість роботи реакторів – 9 років. Також 14 блоків перебувають у стадії будівництва і приблизно 30 заплановано. За період з 2014 до 2020 року, частка атомної енергетики в загальному виробітку електрики зросла на 2,55 % і склала 4,94 % у загальному балансі країни.

У найближчих планах – збільшення частки АЕС в енергетичному секторі до 10–15 %. Однак і цього може виявитися недостатньо для декарбонізації всієї економіки. Вважають, що в перспективі атомна енергія досягне однієї третини в сукупній структурі енергетичного балансу країни. Запланована потужність атомних станцій до 2030 року має становити 120–150 ГВт порівняно з 50,8 ГВт 2021 року. Таким чином, Китай стає світовим лідером за темпами введення АЕС. Згідно з п'ятирічним планом, Китай збирається збільшити до 2030 року кількість ядерних реакторів до 110 і щорічно вводити 4–8 атомних реакторів. При цьому щорічно виділяти на будівництво атомних станцій до 80 млрд. дол. починаючи з 2016 року. На жаль, через економічну кризу ці зобов'язання до кінця не були виконані.

Більшість атомних електростанцій розташовані на узбережжі та засновані на використанні морської води для прямого охолодження. Фахівці МАГАТЕ говорять про брак потенційних майданчиків для можливого будівництва нових станцій на морському узбережжі (рис. 1).

У секторі атомної енергетики Китаю працюють три найбільші компанії.

- Китайська національна ядерна корпорація (China National Nuclear Corporation, CNNC) – флагман національної атомної енергетики, працює у сфері атомної енергетики та розробки ядерної зброї на північному сході Китаю.

- Китайська ядерна енергетична група (China General Nuclear Power Group, CGN). До травня 2013 року Гуандунська ядерно-енергетична група (China Guangdong Nuclear Power Group, CGNPG) – освоєла французькі атомні технології, працює в основному на південному сході Китаю.



Рисунок 1 – Розташування АЕС на карті Китаю

- Державна енергетична інвестиційна корпорація (State Power Investment Corporation, SPIC) освоєла американські технології. Володіє, як основний акціонер, двома АЕС на сході Китаю – Хайянь і Саньмень.

На рис. 2 представлено динаміку виробництва електроенергії Китаю на АЕС у період 1992–2018 рік [8]. Як випливає з наведених даних, різкий підйом вироблення електроенергії (у 2003 і 2013 рр.) був пов'язаний із введенням в експлуатацію першої китайської АЕС Хун'яньхе, яка почала використовувати технологію опріснення морської води для отримання охолоджувальної рідини. У табл. 2 показано вироблення електроенергії на АЕС Китаю в наступні три роки. Дані підтверджують зростання атомної складової в загальному енергобалансі Китаю. За цей період, незважаючи на світову енергетичну кризу, виробіток електроенергії зріс у 1,22 рази переважно за рахунок альтернативних джерел енергії (ВДЕ у 2,1–2,4, атомної в 1,4 рази).

Основним типом реактора є CPR-1000 – китайський водо-водяний ядерний реактор другого покоління, на основі французьких реакторів (M310) електричною потужністю 900 МВт, імпортованих у 1980-х роках. Зміни полягають у збільшенні електричної потужності до 1000 МВт (1080 МВт брутто) і розрахункового терміну служби до 60 років. Наразі CPR-1000 виробляється та експлуатується компанією CGN. Основне обладнання виробляється в Китаї.

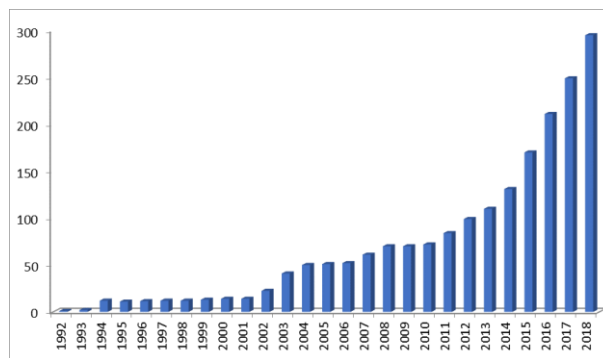


Рисунок 2 – Виробництво електроенергії-брутто на АЕС Китаю 1992–2018 роки, млрд кВт·год

Таблиця 2 – Встановлена потужність і вироблення електроенергії Китаю за період 2018–2021 року

| Встановлена потужність електроенергетики Китаю (ГВт) | | | |
|--|----------------|----------------|---------------|
| | 2018 | 2019 | 2021 |
| ТЕС | 1144,08 | 1190,55 | 1300,0 |
| ГЕС | 352,59 | 356,40 | 390,0 |
| АЕС | 44,66 | 48,74 | 50,0 |
| Вітер | 184,27 | 210,05 | 330,0 |
| Сонце | 174,33 | 204,68 | 310,0 |
| УСЬОГО | 1900,12 | 2010,65 | 2380,0 |
| Вироблення електростанцій Китаю (ТВт·год) | | | |
| | 2018 | 2019 | 2021 |
| ТЕС | 4924,9 | 5045,0 | 5623,8 |
| ГЕС | 1232,1 | 1301,9 | 1300,0 |
| АЕС | 295,0 | 348,7 | 405,5 |
| Вітер | 365,8 | 405,7 | 775,7 |
| Сонце | 176,9 | 223,8 | 427,0 |
| УСЬОГО | 6994,7 | 7325,3 | 8534,3 |

У Китаї також розроблено і запущено у виробництво реактор третього покоління «Хуалун-1» (Hualong One, Hualong-1, HPR1000, англ.) – китайський трипетельовий ВВЕР з водою під тиском. Був розроблений CGN і CNNC. Його презентація відбулася в березні 2018 року на виставці в Пекіні. Вважають, що Хуалун-1 (у перекладі – «Китайський дракон») стане вирішальним фактором у декарбонізації енергетики країни, оскільки практично не залежить від імпорту обладнання. У 2021–2022 році ці реактори встановлені на 5 і 6 блоці АЕС у місті Фуцин (провінція Фуцзянь, Східний Китай) і повністю відповідають вимогам безпеки.

У 2022 році цей реактор був запропонований Управлінню з ядерного регулювання (ONR) і Агентству з охорони навколишнього середовища Великої Британії. Вони повідомили, що китайський ядерний реактор «Хуалун-1» (HPR1000) придатний для будівництва на території країни за умови отримання повного пакета дозвільних документів.

Вирішальну роль у переході економіки Китаю на атомну енергетику може стати використання реакторів четвертого покоління. Це малий модульний реактор (small modular reactors, SMR) потужністю до 300 МВт на енергоблок, що становить третю частину генерованої потужності промислових ядерних реакторів. Існують різні типи реакторів на повільних і швидких нейтронах, а також моделі реакторів на розплавах солей із газовим охолодженням. У нових реакторах замість води може бути використаний гелій.

SMR – сучасний ядерний реактор відносно невеликих розмірів, який може бути побудований на заводі, а потім використаний на будь-якому підготовленому майданчику. Вони можуть бути під'єднані до наявної електромережі або працювати автономно. Найефективніше їх використовувати в парі

з ВДЕ (вітер і сонце) з метою підвищення їх ефективності [15]. Існує 70 комерційних проєктів SMR.

У січні 2022 року керована державою компанія China Huaneng Group, п'ятий виробник електроенергії в країні, відвітувала про успішний запуск першого реактора SMR на АЕС Шидаовань потужністю 200 МВт. Він був успішно синхронізований і підключений до електромереж провінції Шаньдун. Китайські атомники позиціонують свій новий реактор, як об'єкт наступного – четвертого покоління.

У майбутньому SMR можуть розв'язати проблему забезпечення світлом і теплом населених пунктів, де немає сенсу будувати звичайну АЕС, а поставки інших видів палива значно дорожчі й підвищують вартість послуг для населення. Тому вважають, хто першим поставити виробництво SMR на потік – стане монополістом на світових ринках атомної енергетики. Вироблені в Китаї реактори планують розміщувати не тільки на території країни, а й у суміжних державах – уздовж так званого нового «Шовкового шляху», що проходить через країни Центральної Азії та Пакистан.

Серед реакторів четвертого покоління слід відзначити реактор CFR-600 (China Fast Reactor) – частина проєкту з досягнення замкнутого ядерного циклу. Це ядерний реактор басейнового типу з натрієвим охолодженням на швидких нейтронах. Наразі під'єднаний на АЕС у повіті Сяпу, провінція Фуцзянь на острові Чанбяо. Це проєкт IV покоління Китайської національної ядерної корпорації (CNNC). Проєкт також відомий як пілотний проєкт реактора на швидких нейтронах у Сяпу. Будівництво реактора почалося наприкінці 2017 року. Там же планують встановити ще один реактор CFR-600 і чотири реактори більшої потужності CFR-1000.

Слід зазначити, що CFR-600 дає змогу в 10 разів збільшити потенціал ядерного палива до 30 %. Він є частиною амбітної програми Китаю вартістю 440 млрд. дол., спрямованої на те, щоб до середини наступного десятиліття обігнати США і стати найбільшим у світі постачальником ядерної енергії. На відміну від традиційних реакторів, він працює на комбінації високозбагаченого урану і так званого змішаного оксидного пального, внаслідок якого як побічний продукт отримують збройовий плутоній.

У вересні 2021 року китайські енергетики запустили експериментальний атомний реактор LFTR (liquid fluoride thorium reactor). Він є реактором-розмножувачем на теплових нейтронах, який потенційно може змінити всю галузь атомної енергетики. У новому реакторі замість урану-235 як паливо використовуються уран-233 і торій-232, які формують рідке паливо. Воно являє собою розплави солей – фторидів торію та урану і деяких допоміжних речовин і набагато ефективніше за уран, а також створює менше радіоактивних відходів. Торій більш поширений у надрах землі, ніж уран і має у 200 разів більший енергетичний потенціал. Такі реактори не потребують водяного охолодження, тому їх можна буде будувати в пустельних районах. Якщо експериментальний реактор запрацює на повну

потужність, то Китай отримає доступ до дешевшої та безпечнішої ядерної енергії.

У США перший реактор, що працював на торії, був побудований наприкінці 1940-х років і закритий 1969 року. Китай уперше спробував освоїти цю технологію ще в 1970-ті роки. Однак проєкт закрили, не впоравшись із технологічними складнощами. Дослідження було відновлено в 2011 році. Пекін інвестував у цей проєкт щонайменше 3 млрд євро.

Таким чином за останні 20 років Китай став світовим лідером із введення АЕС і використання атомної енергії в загальному балансі електроенергетики країни. У зв'язку з цим представники МАГАТЕ вважають, що КНР необхідно вжити термінових заходів для розв'язання проблем ядерної безпеки, зокрема щодо створення інфраструктури атомної енергетики та міжнародних центрів утилізації ядерного палива.

Проблеми ядерної безпеки та їх вирішення. У 2009 році на 25 асамблеї Ради Європи було ухвалено резолюцію 1679 – низку документів, спрямованих на врегулювання проблем атомної енергетики в контексті сталого розвитку та ядерної безпеки [16]. Такі країни, як Фінляндія, Франція, Росія, Китай, Індія, Республіка Корея, США та Японія оголосили про намір будувати або вже будують нові атомні електростанції. Наприклад, у Японії до 2030 року атомна енергетика може стати важливим джерелом енергії, покриваючи понад 40 % енергетичних потреб країни.

Виходячи з цього, Асамблея вважає, що міжнародне співтовариство має відшукати ефективні рішення трьох взаємопов'язаних проблем: енергетичної безпеки, економічного зростання і захисту навколишнього середовища. Розвиток атомної енергетики має підкріплюватися створенням національної системи забезпечення безпеки та охорони ядерних матеріалів і об'єктів. При цьому слід зазначити, що енергетичний ринок став більш глобальним і відкритим. Широкомасштабний розвиток атомної енергетики у світі нерозривно пов'язаний з отриманням дедалі більшим числом країн доступу до ядерних технологій, матеріалів та обладнання. Тому жодна країна у світі не може діяти абсолютно самостійно.

У 2016 році в Китаї ухвалено закон про ядерну безпеку. До теперішнього часу питання безпеки в китайському ядерному секторі не регулювалися на законодавчому рівні. Згідно з новим правовим актом, посилюються правила будівництва атомних реакторів, а також підвищуються вимоги до імпортованого обладнання, що використовується в ядерній галузі. Крім того, затверджується чіткий механізм експортного контролю операцій з продажу ядерного обладнання за кордон [17].

Разом із розвитком атомної енергетики в Китаї збільшується потреба розроблення технологічних схем з переробки відпрацьованого палива і реакторів для його виробництва, під час якого утворюється величезна кількість матеріалів, придатних для створення бойової зброї.

Що стосується переробки ядерних відходів, то МАГАТЕ розглядає кілька варіантів таких технологій. Одна з них захоронення ядерних відходів глибоко під землею. У контексті цього в пустелі Гобі Китай почав будівництво великої підземної лабораторії для дослідження технологій захоронення високоактивних радіоактивних відходів. Лабораторія повинна буде підготувати ґрунт для майбутнього сховища, яке зможе безпечно ізолювати ці матеріали протягом кількох десятків тисяч років. Експериментальне сховище розташоване на 560 м нижче поверхні.

Вартість лабораторії оцінюють у 422 млн дол. і на її будівництво піде 7 років. Якщо лабораторія в пустелі Гобі підтвердить безпеку, то до 2050 року в тому самому районі побудують довготривале глибинне сховище для захоронення високорадіоактивних відходів із китайських атомних електростанцій. Зокрема відпрацьованого ядерного палива, яке наразі не підлягає переробці і становить приблизно 1 % від усіх радіоактивних відходів. Решта 99 % – це низькорадіоактивні відходи (наприклад, одяг персоналу) і середньорадіоактивні, до яких можна зарахувати компоненти реакторів. Це буде найглибше сховище радіоактивних відходів у світі [18].

В інших країнах, зокрема в Росії, поступово розвивають технологію близьку до повного замкнутого циклу переробки відпрацьованого ядерного палива. У Китаї такої технології немає, а проблема накопичення відпрацьованого палива зростає рік за роком. Тому Китай почав розробляти технологію спалювання радіоактивних відходів. У пустелі Гобі провінції Ганьсу Китай планує ввести в експлуатацію завод, призначений для вилучення плутонію з відпрацьованого пального CFR-600.

Запропонованим варіантом переробки ядерних відходів є розробка в Китаї на базі CFR-600 системи CIADS (China Initiative Accelerator Driven System), яка передбачає спалювання в реакторі ядерних відходів за допомогою прискорювача заряджених частинок (протонів або позитивно заряджених іонів). Для охолодження реактора використовуватимуть не воду, а високо корозійні рідкі метали. Пучком частинок пропонується обстрілювати вольфрамову мішень, яка після цього почне випускати швидкі нейтрони і руйнувати відходи. Перспективний сплав дасть змогу реактору втримати високотемпературні навантаження. Площа установки становитиме 60 гектарів [19].

Будівництво установки планують з 2022 року в прибережній провінції Гуандун. Комерційне введення реактора для спалювання відходів від атомних електростанцій може зайняти ще одне десятиліття. Створенням перспективного реактора і нового матеріалу займаються профільні інститути Китайської академії наук. Перспективна технологія, за словами вчених, дасть змогу зробити ядерні відходи та експлуатацію реактора безпечними. Установка може бути зупинена вимиканням прискорювача частинок. Тестова модель реактора для спалювання радіоактивного палива пройшла випробування і встановлена в східній провінції Шаньдун.

Експерти МАГАТЕ вважають, що ядерна енергетика може сприяти пом'якшенню зміни клімату не тільки в Китаї, а й в інших країнах, що розвиваються. Оскільки попит на електричну енергію випереджає її виробництво з вуглеводнів і ВДЕ. На думку фахівців, нові типи реакторів дадуть змогу наблизити енергетику Китаю до вуглецево-нейтральної.

Водночас у резолюції Ради Європи №1649 наголошується, що атомну енергетику не можна вважати «стійкою», оскільки запаси урану кінцеві й на них можна розраховувати у найкращому разі лише в середньостроковій перспективі протягом близько 30 років. Концентрація урану в земній корі становить $2,4 \cdot 10^{-4} \%$, у морській воді $3,3 \cdot 10^{-7} \%$. Основна причина дефіциту урану – низька концентрація його в рудах, придатних для розробки. Основні запаси урану знаходяться в Казахстані, Австралії, Канаді та Намібії. За запасами урану світовим лідером є Австралія (31,2 % усіх світових запасів урану, що в чисельному еквіваленті відповідає 661 тис. т). Китай посідає 9 місце у світі за запасами уранових руд (4 % від світового видобутку). З 2020 року лідером з виробництва урану є Казахстан – 41 % від світового видобутку. До трійки лідерів входять Австралія і Намібія з виробленням – 13 % і 11 % відповідно.

На відміну від багатьох іноземних держав у Китаї абсолютно відсутня фобія на атомну енергетику. За даними CNNC китайські АЕС мають найкращі у світі показники безпеки їхньої експлуатації, а ядерна енергія є найбезпечнішим, найефективнішим і найстабільнішим джерелом чистої енергії.

Однак, на думку експертів МАГАТЕ, китайські служби безпеки не завжди мають у своєму розпорядженні необхідні ресурси для того, щоб забезпечити якісну перевірку роботи об'єктів. Це створює серйозну загрозу екології та безпеці життєдіяльності країни. У довгостроковій перспективі атомній енергетиці належить вирішити також проблему безпечної, довготривалої утилізації радіоактивних відходів. Слід зазначити, що з роками раніше створені реактори старіють, у їхньому корпусі відбуваються незворотні зміни структури металу. Для переробки таких відходів потрібне спеціальне дослідження.

Крім того, жодна інша технологія не схильна такою мірою до різних загроз. Однієї важкої аварії або терористичної атаки на АЕС буде достатньо, щоб остаточно підірвати довіру людей до цієї технології. У такому разі довелось б достроково зупинити більшість реакторів, принаймні в демократичних країнах.

На скільки безпечні Китайські АЕС? Досить поглянути на карти Китаю з активними сейсмічними районами та місцями розташування АЕС. Китай розташований у регіоні, де сходяться кілька тектонічних плит – зокрема, Євразійська, Індійська та Тихоокеанська, – і особливо схильний до землетрусів.

Окрім цього слід враховувати, що на виробництво енергії з альтернативних джерел знижуються, собівартість атомної енергії може тільки зрости. Капітальні витрати Китайських АЕС станом на 2022 рік

становлять 5550 дол/кВт порівняно з 2200 дол/кВт потужності вітрових станцій.

Згідно з розрахунками найбільшого у світі приватного інвестиційного банку Lazard, у період з 2009 по 2018 роки витрати на реалізацію проєктів сонячної генерації промислового масштабу знизилися на 88 %, вітрової – на 69 %, у той час як атомна енергетика подорожчала на 23 %. У сучасних ринкових умовах, високі капітальні витрати на нові проєкти в атомній енергетиці є критичною проблемою [20].

При цьому слід звернути увагу на різке відставання атомної енергетики від відновлюваної з точки зору залучення інвестицій. Так, у 2018 році 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.

Крім того, разом із розвитком атомної енергетики збільшується і потреба у створенні технологічних схем переробки відпрацьованого палива та реакторів розмножувачів для виробництва ядерного палива. Тому на вільному ринку дуже важко знайти джерело фінансування для будівництва нових АЕС третього та четвертого покоління. До того ж до кінця не розв'язана проблема з імпортованою сировиною та переробкою ядерних відходів [21].

Багато фахівців у галузі екології та безпеки життєдіяльності вважають, що атомна енергетика і ВДЕ конкурують одна з одною не тільки за інвестиції. Атомна енергетика не може зробити вирішальний внесок у захист навколишнього середовища. На думку Ральфа Фокса, голови фонду імені Генріха Бюлля, загроза неконтрольованого розповсюдження ядерних технологій зростає разом зі збільшенням кількості АЕС у всьому світі. Незважаючи на всі зусилля з контролю за ними з боку МАГАТЕ, не існує нездоланного бар'єру між цивільним і військовим застосуванням таких технологій. Останнім прикладом може слугувати багаторічна (4 роки) війна Ірану на Близькому сході з використанням касетних бомб і хімічної зброї. Звертає на себе увагу позиція керівництва Німеччини впродовж останніх 10 років щодо атомної енергетики. У квітні 2023 року останні три АЕС припинили свою роботу і ера ядерної енергетики в цій країні, яка тривала понад 60 років, підійшла до кінця.

У контексті ядерної безпеки слід зазначити, що в грудні 2022 року «Росатом» відправив велику партію ядерного палива на віддалений китайський острів Чанб'яо (6,5 т.) для реактора CFR-600, який вироблятиме плутоній збройової якості. За даними відкритих джерел, у період з вересня по грудень Росія експортувала до Китаю для CFR-600 майже в 7 разів більше збагаченого урану, ніж усього матеріалу, вивезеного по всьому світу під егідою США і МАГАТЕ за останні три десятиліття. У цей період Китай заплатив близько 384 млн. дол. з траншами за 25 т

палива для CFR-600 від «Росатома». При цьому слід зазначити, що з 2017 року Пекін припинив добровільно повідомляти МАГАТЕ про запаси плутонію [22].

Міф про атомну енергію як про невичерпне, найвигідніше і найнадійніше джерело енергії сильно похитнувся в багатьох країнах. Офіційно суперечки точаться тільки про те, до якого терміну можна і потрібно зупинити наявні АЕС. У Німеччині зараз навіть великі енергетичні концерни визнають, що майбутнє – виключно за поновлюваними джерелами енергії. До цих давно вже відомих аргументів проти атомної енергії додаються нові.

Однак, водночас у деяких частинах планети (Китаї, Індії та інших країнах, що розвиваються) спостерігається зростання цього сектора енергетики. Прихильники атомної енергії запустили в обіг новий аргумент: атомна енергетика – необхідний етап на шляху в еру сонячної енергії та необхідна умова енергопостачання з мінімальними викидами CO₂.

Виникає питання, чи будуть зусилля Китаю з переведення своєї енергетики на нові рейки успішними та чи не є відповідні заяви піаром, щоб відволікти світову спільноту від глобальних процесів. Однак навіть якщо повна реалізованість цих програм викликає сумніви, очевидним є той факт, що розвиток альтернативної енергетики – це необхідний захід стимулювання економіки в епоху енергетичної кризи.

Перед Китаєм стоїть дуже складне завдання. За даними різних авторів програма декарбонізації китайської економіки обійдеться країні в 5–12 трлн. міжнародних доларів. Тому компроміс між захистом довкілля та економічним зростанням становить найбільшу проблему для Китаю.

Висновки. У контексті ядерних технологій (створення реакторів четвертого покоління, розробка технологій близьких до повного замкненого циклу переробки ядерних відходів) Китай уже зараз готовий значно розширити масштаби застосування атомної енергетики.

Основна проблема, з якою зіткнеться Китай, буде відсутність нездоланного бар'єру між цивільним і військовим застосуванням таких технологій. Однак, основною перешкодою в цьому напрямку буде економічна та політична нестабільність Світового співтовариства.

Тому надалі Китаю слід переглянути свою ядерну програму в контексті співробітництва з Міжнародними органами з ядерної безпеки і, особливо, МАГАТЕ.

У контексті безпеки життєдіяльності на планеті особливу увагу слід звернути на те, куди і з якою метою буде спрямований отриманий на китайських АЕС плутоній. Можливі його застосування на інших континентах (наприклад, на Близькому Сході) і країнах, що матиме негативний вплив на ядерну безпеку не лише в інших країнах, а й у самому Китаї.

Список літератури

1. Global Energy & CO₂ Data. *Enerdata*. URL: <https://www.enerdata.net/research/energy-market-data-co2-emissions-database.html>.

2. United Nations Environment Programme, International Resource Panel. Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want. 2019. URL: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/27517>.
3. 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. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.45.2022.276242>.
4. Дімітров О. О., Яковлева О. Ю., Хмельнюк М. Г. Енергетична криза або майбутнє альтернативної енергетики? *Холодильна техніка та технологія*. 2014. Т. 50, № 4. С. 30–36. DOI: <https://doi.org/10.15673/0453-8307.4/2014.28048>.
5. United Nations Economic Commission for Europe. Energy efficiency and energy security in the Commonwealth of Independent States. New York and Geneva: United Nations, 2001. URL: https://digitalibrary.un.org/record/451738/files/ece_energy_4_4_e.pdf.
6. Маляренко В. А. Введение в инженерную экологию энергетики: навч. посіб. 2-ге вид. Харків: САГА, 2008. 243 с.
7. Global Energy Trends - 2023 Edition. *Enerdata*. URL: <https://www.enerdata.net/publications/reports-presentations/world-energy-trends.html>.
8. UNSD Energy statistics. *UNdata*. URL: <https://data.un.org/SdmxBrowser>.
9. Назюта Л. Ю., Степаненко Д. В. Енергетична та екологічна безпека в контексті розвитку атомної енергетики. *Метал та литейні України*. 2023. Т. 31, № 4 (335). С. 64–74. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.04.08>.
10. Ping Z. Nuclear power development in China. The country is seeking to develop a diversified energy base. *IAEA Bulletin*. 1987. Vol. 29, no. 2. URL: <https://www.iaea.org/publications/magazines/bulletin/29-2/nuclear-power-development-china-country-seeking-develop-diversified-energy-base>.
11. Review of nuclear power development in China: environment analysis, historical stages, development status, problems and countermeasures / M. Zeng et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 59. P. 1369–1383. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.045>.
12. Hua S. Atomic Power Is In Again—and China Has the Edge. *The Wall Street Journal*. URL: <https://www.wsj.com/world/china/atomic-power-is-in-again-and-china-has-the-edge-5f8a8b84>.
13. Лачан Т., Шпросс Х., Елкина А. Почему Китай намерен развивать атомную энергетику. *Deutsche Welle*. URL: <https://www.dw.com/ru/почему-китай-намерен-развивать-атомную-энергетику/a-39104562>.
14. De Clercq G. China to build at least 60 nuclear plants in coming decade - industry official. *Reuters*. URL: <https://www.reuters.com/article/china-nuclear-idUSL8N1BS3VB/>.
15. Small modular reactors (SMR). *International Atomic Energy Agency / Atoms for Peace and Development*. URL: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>.
16. Parliamentary Assembly of the Council of Europe. Nuclear energy and sustainable development. 2009. 3 p. URL: <https://pace.coe.int/pdf/8409d84215387e5ed786ad188d4c58e94cd7f9995a4c6294d88a39810879e0dc/res.%201679.pdf>.
17. China's legislature passes nuclear safety law. *Reuters*. URL: <https://www.reuters.com/article/us-china-nuclearpower/chinas-legislature-passes-nuclear-safety-law-idUSKCN1BC4ER/>.
18. Xie E. China builds bunker to test whether nuclear waste can be dumped underground. *South China Morning Post*. URL: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3138484/china-builds-bunker-test-whether-nuclear-waste-can-be-dumped>.
19. Chen S. Heavy metal: nation's first nuclear waste 'incinerator' gets boost as Chinese team create new steel alloy that can take the heat. *South China Morning Post*. URL: <https://www.scmp.com/tech/science-research/article/1913490/heavy-metal-nations-first-nuclear-waste-incinerator-gets-boost>.
20. Renewable investment. *Bloomberg*. URL: <https://www.bloomberg.com/graphics/climate-change-data-green/investment.html>.

21. Ядерная энергия: мифы и реальность. Тематические исследования по ядерной энергетике / ред. А. Н. Мартынюк. 2-ге вид. Рівне: Представництво Фонду ім. Г. Бюлля в Україні та Екоclub, 2010. 352 с.
22. Tirone J. China's imports of Russian uranium spark fear of new arms race. *Bloomberg*. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-03-01/china-nuclear-trade-with-russia-risks-tipping-military-balance>.

References

1. "Global Energy & CO2 Data." Enerdata. [Online]. Available: <https://www.enerdata.net/research/energy-market-data-co2-emissions-database.html>
2. United Nations Environment Programme and International Resource Panel, "Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want", DTI/2226/NA, 2019. [Online]. Available: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/27517>
3. L. Nazyuta and D. Stepanenko, "On the way to decarbonization of the world economy. Global warming. UN climate conferences", *Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical Sciences*, no. 45, pp. 97–108, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.45.2022.276242> (in Ukrainian)
4. A. Dimitrov, O. Yakovleva, and M. Khmelniuk, "Power crisis or the future of alternative power engineering?", *Refrigeration Engineering and Technology*, vol. 150, no. 4, pp. 30–36, Oct. 2014, doi: <https://doi.org/10.15673/0453-8307.4/2014.28048> (in Russian)
5. United Nations Economic Commission for Europe, *Energy Efficiency and Energy Security in the Commonwealth of Independent States*. New York and Geneva: United Nations, 2001. [Online]. Available: https://digitallibrary.un.org/record/451738/files/ece_energy_44_e.pdf
6. V. A. Maliarenko, *Vvedenie v Inzhenernuju Jekologiju Jenergetiki [Introduction to Power Engineering Ecology]*, 2nd ed. Kharkiv: SAHA, 2008. (in Russian)
7. "Global energy trends - 2023 edition." Enerdata. [Online]. Available: <https://www.enerdata.net/publications/reports-presentations/world-energy-trends.html>
8. "UNSD Energy statistics." UNdata. [Online]. Available: <https://data.un.org/SdmxBrowser>
9. L. Yu. Naziuta and D. V. Stepanenko, "Energy and environmental safety in the context of nuclear energy development", *Metal and Casting of Ukraine*, vol. 31, no. 4 (335), pp. 64–74, 2023, doi: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.04.08> (in Ukrainian)
10. Z. Ping, "Nuclear power development in China. The country is seeking to develop a diversified energy base", *IAEA Bulletin*, vol. 29, no. 2, 1987. [Online]. Available: <https://www.iaea.org/publications/magazines/bulletin/29-2/nuclear-power-development-china-country-seeking-develop-diversified-energy-base>
11. M. Zeng, S. Wang, J. Duan, J. Sun, P. Zhong, and Y. Zhang, "Review of nuclear power development in China: Environment analysis, historical stages, development status, problems and countermeasures", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 1369–1383, Jun. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.045>
12. S. Hua. "Atomic power is in again—and China has the edge." *The Wall Street Journal*. [Online]. Available: <https://www.wsj.com/world/china/atomic-power-is-in-againand-china-has-the-edge-5f8a8b84>
13. T. Lachan, Kh. Shpross, and A. Elkyna. "Pochemu Kitaj nameren razvivat' atomnuju jenergetiku [Why China intends to develop nuclear power]." *Deutsche Welle*. [Online]. Available: <https://www.dw.com/ru/почему-китай-намерен-развивать-атомную-энергетику/a-39104562> (in Russian)
14. G. De Clercq. "China to build at least 60 nuclear plants in coming decade - industry official." *Reuters*. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/article/china-nuclear-idUSL8N1BS3VB/>
15. "Small modular reactors (SMR)." International Atomic Energy Agency | Atoms for Peace and Development. [Online]. Available: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>
16. Parliamentary Assembly of the Council of Europe, "Nuclear energy and sustainable development", Resolution 1679, Jun. 2009. [Online]. Available: <https://pace.coe.int/pdf/8409d84215387e5ed786ad188d4c58e94cd7f9995a4c6294d88a39810879e0dc/res.%201679.pdf>
17. "China's legislature passes nuclear safety law." *Reuters*. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/article/us-china-nuclearpower/chinas-legislature-passes-nuclear-safety-law-idUSKCN1BC4ER/>
18. E. Xie. "China builds bunker to test whether nuclear waste can be dumped underground." *South China Morning Post*. [Online]. Available: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3138484/china-builds-bunker-test-whether-nuclear-waste-can-be-dumped>
19. S. Chen. "Heavy metal: Nation's first nuclear waste 'incinerator' gets boost as Chinese team create new steel alloy that can take the heat." *South China Morning Post*. [Online]. Available: <https://www.scmp.com/tech/science-research/article/1913490/heavy-metal-nations-first-nuclear-waste-incinerator-gets-boost>
20. "Renewable investment." *Bloomberg*. [Online]. Available: <https://www.bloomberg.com/graphics/climate-change-data-green/investment.html>
21. A. N. Martynjuk, Ed., *Jadernaja Jenergija: Mify I Real'nost'. Tematicheskie Issledovanija Po Jadernoj Jenergetike [Nuclear Energy: Myths and Reality. Case Studies on Nuclear Energy]*, 2nd ed. Rівne: Predstavnytstvo Fondu im. H. Bollija v Ukraini ta Ekoclub, 2010. (in Russian)
22. J. Tirone. "China's imports of Russian uranium spark fear of new arms race." *Bloomberg*. [Online]. Available: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-03-01/china-nuclear-trade-with-russia-risks-tipping-military-balance>

Надійшло (received) 18.03.2024

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Назюта Людмила Юрійвна (Lyudmyla Nazyuta) – доктор технічних наук, професор; м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8692-5243>; e-mail: nazutaludmila3@gmail.com.

Степаненко Данило Вадимович (Stepanenko Danylo) – аспірант Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2032-6861>; e-mail: Danikstepanenko.95@gmail.com.