УДК 327.7:334+621

МІЖНАРОДНИЙ ДОСВІД РОЗРОБКИ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ ЕНЕРГІЇ У ЯДЕРНІЙ ТА СУМІЖНИХ СФЕРАХ

Бобро Дмитро Геннадійович,
кандидат фізико-математичних наук
ORCID:0000-0002-3246-7436

Проаналізовано світові тенденції упровадження інноваційних технологій в енергетичній сфері. Інновації у цій сфері необхідні не тільки для підвищення добробуту та забезпечення енергетичної безпеки, а й для боротьби зі зміною клімату. Саме тому інноваційна складова розвитку енергетики України є надзвичайно актуальною, а одним із ключових елементів підвищення енергетичної безпеки та забезпечення енергетичної незалежності України є впровадження інноваційних розробок у цій сфері з урахуванням міжнародного досвіду.

Ураховуючи те, що Україна має розвинену ядерну енергетику, достатню сировинну базу урану та цирконію, що є основними елементами для виробництва ядерного палива, урановидобувну промисловість та дослідно-промислову базу виробництва цирконієвої продукції, науковий та технічний кадровий потенціал, наголос зроблено на вивченні міжнародного досвіду інноваційного розвитку ядерної енергетики та промисловості. З урахуванням інноваційних прогалин у ядерній сфері, визначених Міжнародним енергетичним агентством (неелектричне застосування; малі модульні реактори; інноваційні ядерні палива, які мають підвищену аварійну стійкість) опрацьовані пропозиції щодо стратегічних інноваційних пріоритетів у ядерній та суміжних сферах.

Надані рекомендації щодо підтримки (у рамках міжнародної співпраці як на корпоративному, так і державному рівнях) інноваційних проектів: малих модульних реакторів, у т. ч. щодо їх використання для отримання водню; водневих паливних комірок та інноваційного ядерного палива для малих модульних реакторів, стійкого до аварій. Зазначене надасть змогу забезпечити інноваційний розвиток економіки України та досягти встановлених як політичних (енергетична незалежність), так і глобальних (боротьба зі зміною клімату) цілей.

Ключові слова: інновації, інноваційні прогалини, відновлювана енергетика, атомна енергетика, малі модульні реактори, інноваційні аварійно стійкі ядерні палива, воднева енергетика.

Bobro Dmytro

INTERNATIONAL EXPERIENCE OF DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF ENERGY INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN NUCLEAR AND RELATED FIELDS

The global tendencies of introduction of innovative technologies in the energy sphere are analyzed. Innovations in this area are needed not only to improve welfare and energy security, but also to combat climate change. That is why the innovative component of Ukraine's energy development is extremely relevant, and one of the key elements of improving energy security and ensuring Ukraine's energy independence is the implementation of innovative developments in this field, taking into account international experience.

Given the fact, that Ukraine has advanced nuclear power, sufficient raw material base of uranium and zirconium (which are the basic elements for the nuclear fuel production), the uranium mining, research and industrial base of production of zirconium production, scientific and technical personnel potential, emphasis is placed on studying the international experience of innovative development of nuclear energy and industry. Taking into account the innovation gaps in the nuclear field, identified by the International Energy Agency (non-electrical applications; Small Modular Reactors; innovative nuclear Accident Tolerant Fuels), proposals for strategic innovation priorities in the nuclear and related fields have been worked out.

Recommendations were given to support (within the framework of international cooperation both at the corporate and state levels) innovative projects: small modular reactors, incl. on their use for hydrogen production; hydrogen fuel cells and innovative nuclear accident tolerant fuel for small modular reactors. This will allow to ensure innovative development of the economy of Ukraine and achieve both the set political (energy independence) and global (combating climate change) goals.

Keywords: innovations, innovation gaps, renewable power, nuclear power, small modular reactors, innovative nuclear accident tolerant fuels, hydrogen energy.

Постановка проблеми. Енергетика, яка охоплює процеси видобування, зберігання, транспортування, перетворення, виробництва та використання паливно-енергетичних ресурсів, є складною виробничо-технологічною, екологічною та економічною системою. Інновації у цій сфері необхідні не тільки для підвищення добробуту та забезпечення енергетичної безпеки, а й для боротьби зі зміною клімату. Саме тому інноваційна складова розвитку енергетики України є надзвичайно актуальною, а одним із ключових елементів підвищення енергетичної безпеки та забезпечення енергетичної незалежності України є впровадження інноваційних розробок у цій сфері з урахуванням міжнародного досвіду.

Водночас для України як для держави, що має розвинену ядерну енергетику, достатню сировинну базу урану та цирконію (це базові елементи для виробництва ядерного палива),顶урановидобувну промисловість та дослідно-промислову базу виробництва цирконієвої продукції, науковий та технічний кадровий потенціал, розв'язання проблеми енергетичної залежності визначальною мірою перебуває саме в площині сталого інноваційного розвитку ядерної енергетики та промисловості [1].

Аналіз останніх наукових досліджень і публікацій. Зарубіжні та вітчизняні вчені приділяють значну увагу дослідженню проблем інноваційного розвитку. За проблематикою теорії інновацій та розбудови інноваційної економіки можна виокремити праці зарубіжних дослідників, зокрема, Й. Шумпетера, Б. Санто та Г. Чесбро, а також вітчизняних учених: В. М. Гейця, М. З. Згуровського, В. В. Дергачової, Д. М. Черваньова, В. П. Соловйова, О. І. Амоші, Л. І. Федулової, у роботах яких також аналізувалися окремі аспекти інноваційного розвитку та можливості використання зарубіжного досвіду для досягнення стратегічної мети розвитку українського суспільства – упровадження в Україні європейських стандартів життя та вихід України на провідні позиції у світі [1].

Окремо слід згадати центральний інноваційний репозиторій, розроблений Міжнародним енергетичним агентством (МЕА) [2], та оцінку МЕА щодо перспектив енергетичних технологій [3], а також дослідження, проведені працівниками Українського інституту науково-технічної експертизи та інформації (УкрІНТЕІ), зокрема [4].

Віддаючи належне напрацюванням зарубіжних та вітчизняних учених у сфері теорії інноваційного розвитку, варто зазначити, що досі не знайшли свого кінцевого застосування конкретні шляхи адаптації світового досвіду впровадження новітніх технологій отримання енергії в ядерній та суміжних сферах.

Метою статті є вивчення та аналіз основних напрямів упровадження інновацій у світовій енергетиці та можливість використання міжнародного досвіду в Україні з метою досягнення енергетичної незалежності та забезпечення енергетичної безпеки на основі інноваційного розвитку ядерної енергетики та промисловості.

[1] Подібне розуміння стратегічної мети розвитку відповідає цілям Стратегії сталого розвитку «Україна – 2020».

Виклад основного матеріалу дослідження. Що ж ми розуміємо під поняттям «енергетична безпека» і яку роль відіграють інновації? Значна кількість концепцій енергетичної безпеки побудована на твердженні про те, що вона складається з чотирьох елементів: наявність (availability), фізична доступність (accessibility), цінова доступність (affordability) та прийнятність (acceptability). МЕА зазначає, що сутність енергетичної безпеки полягає в гарантуванні безперервного постачання енергетичних ресурсів за доступними цінами. Ми будемо виходити з розуміння того, що *енергетична безпека* – стан країни, за якого технічно надійним та безпечним, економічно ефективним та екологічно прийнятним способом будуть задоволені потреби суспільства в енергоресурсах. Це, у свою чергу, забезпечить стале функціонування національної економіки, її розвиток, незалежність держави. Відтак для досягнення прийнятного рівня енергетичної безпеки потрібно вирішити низку технічних, економічних та екологічних задач, кращим шляхом розв'язання яких у світі вважається інноваційний.

Слід зазначити, що МЕА володіє унікальним досвідом у сфері аналізу енергетичних інновацій – від даних про дослідження, розробки та демонстрацію (те, що у нас зветься науково-дослідними та дослідно-конструкторськими роботами – НДДКР) до широкомасштабного впровадження та аналізу тенденцій у сфері державних і приватних інвестицій; від виявлення інноваційних прогалин до створення глобальної мережі співпраці (в інтерпретації МЕА – оцінка рівнів готовності технології, чи *англ.* Technology Readiness Level, TRL).

У своїх дослідженнях МЕА виокремлює 45 ключових технологій та секторів. Останнє всеосяжне оцінювання МЕА переходу на екологічно чисту енергію [2] засвідчує, що тільки сім із них відповідають Сценарію сталого розвитку МЕА [5]: сонячна фотоелектрика, біоенергетика, накопичувачі енергії, електромобілі та залізничний транспорт, освітлювальні прилади та дата-центри. Потребують поліпшення 22 ключові технології, з-поміж них: вітрова, гідро-, ядерна та воднева енергетика, використання енергії у промисловості й на транспорті, «розумні» мережі та управління попитом, а 16 – взагалі відстають, зокрема: геотермальна енергетика, сонячні концентратори, енергія хвиль та припливів, теплові насоси, газ метан нафтових та вугільних родовищ, спалювання вугілля, скорочення викидів та утилізація CO_2, використання біопалива на транспорті, енергоефективні будівлі.

Для цих ключових технологій МЕА визначає основні технологічні проблеми – інноваційні прогалини, які необхідно заповнити для досягнення довгострокових цілей переходу на екологічно чисту енергію. У рамковій програмі визначено близько 100 прогалин в інноваціях [6]. Усі вони розподілені за 7 напрямами: енергетика, відновлювані джерела, постачання палива, транспорт, будівлі, промисловість, інтеграція енергії.

Кожна інноваційна прогалина є інноваційним завданням, яке необхідно розв'язати. Для кожної прогалини в інноваціях МЕА визначає, які рішення існують на сьогодні, ранжирує їх за шкалою рівня готовності технологій (TRL), яка бере початок від етапу розробки концепції і триває до впровадження технологічного рішення, його масштабування та інтеграції. Також МЕА аналізує, які дії чиняться для просування цих рішень та усунення прогалин і які уряди, компанії та дослідницькі інститути наразі очолюють ці зусилля. Нарешті, МЕА рекомендує, що доцільно зробити урядам, підприємствам енергетики та іншим заінтересованим сторонам, щоб скористатися цими можливостями як у короткостроковій, так і в довгостроковій перспективі.

Так, наприклад, сонячним фотогальванічним установкам потрібні набагато кращі інтелектуальні інвертори та накопичувачі енергії для зниження витрат на їх інтеграцію в енергосистему та забезпечення її стабільної роботи [2]. Великі обсяги малих присадибних фотогальванічних установок потребують інновацій для управління ними та інтеграції їх до енергосистеми.

Окремо слід навести дані про інвестування в інновації. Так, за даними МЕА [2], у 2018 р. глобальні державні інвестиції в дослідження та розробку низьковуглецевих енергетичних технологій зросли до 23 млрд дол. США, а корпоративні витрати – до майже 94 млрд дол. США. Водночас залучення венчурного капіталу в екологічно чисту енергію досягло найвищого за всю історію інвестування в інновації рівня – майже 7 млрд дол. США. При цьому інтерес становить і перерозподіл інвестицій у дослідження в різних сферах енергетики [7, с. 6]: якщо в середині 70-х років минулого століття

[2] Фотоелектрика через сезонні, денні/нічні та навіть погодинні та щохвилинні коливання сонячного випромінювання вносить у роботу енергосистеми суттєві збудження, для компенсації яких потрібні значні маневрові потужності та накопичувачі енергії [8].

домінувала ядерна енергетика із 75 %, то в 2018 р. інвестиції в ядерні дослідження скоротилися до 22 % від загальних. Суттєво зросли інвестиції у НДДКР відновлюваних джерел та енергоефективності – із 2-3 % у 1974 р. до, відповідно, 21 та 23 % – у 2010 р. та 16 і 21 % – у 2018 р. Інвестиції у дослідження викопних палив, які свого максимуму досягли у 80-ті та на початку 90-х років минулого століття (20 %), у 2018 р. скоротилися до 9 %. У 2010-ті роки значне інвестування отримали й дослідження водневої енергетики та паливних комірок (3–5 %).

Слід зазначити, що для України як для держави, що має розвинену ядерну енергетику та всі необхідні ресурси для її розвитку, розв'язання проблеми енергетичної залежності визначальною мірою перебуває саме у площині сталого розвитку ядерної енергетики та промисловості [1]. При цьому атомну енергію слід розглядати як одне з найбільш ефективних джерел низьковуглецевої енергії. Тому детальніше розглянемо міжнародний досвід інновацій саме в ядерній сфері, де нововведення концентруються навкруги трьох напрямів:

- неелектричне застосування (опріснення води, отримання тепла, отримання водню; при цьому два останні застосування можуть використовуватися в ланцюгу накопичення та зберігання енергії) [9];
- малі модульні ядерні реактори [3] (ММР) [10; 11];
- інноваційні ядерні палива, які мають підвищену аварійну стійкість [12].

Для України всі ці напрями можуть становити певний інтерес. Так, частина енергії, що виробляється в реакторі під час «нічного провалу» (коли споживання падає і в енергосистемі є надлишок енергії), може використовуватися для отримання тепла та водню, які, у свою чергу, можуть використовуватися для генерації електроенергії під час денного піку споживання, тим самим покриваючи нестачу маневрових потужностей. Проте перспектива подібного застосування є досить віддаленою, оскільки потребує суттєвої модернізації типової схеми ядерної енергетичної установки (розміщення накопичувачів тепла та водню).

Значно перспективнішим для України можна вважати два останні напрями – малі модульні ядерні реактори та інноваційні ядерні палива. Для України технологія ММР може вважатися найперспективнішою для підтримання частки атомної енергії у балансі електроенергії та розширеного відтворення атомних потужностей [1, с. 5–6].

З іншого боку, напрям виробництва інноваційного ядерного палива, стійкого до аварійних умов, може бути реалізований у рамках створення в Україні власного виробництва ядерного палива, що передбачено Концепцією Державної цільової економічної програми розвитку атомно-промислового комплексу на період до 2020 року (схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 9 листопада 2016 р. № 943-р).

Втім напрям створення новітніх типів ядерних реакторів не обмежується лише ММР. Новітні інноваційні типи реакторів об'єднує підвищена безпека, що ґрунтується на принципах внутрішньої самозахищеності, коли властивості реактора забезпечують його зупинку та розхолодження за будь-яких аварійних ситуацій на основі природних зворотних зв'язків та процесів. Ще однією важливою особливістю цих реакторів є здатність працювати на природному урані чи відпрацьованому ядерному паливі АЕС, що існують.

Бажаною властивістю є й можливість цих реакторів працювати в маневровому режимі (коли потужність реактора може достатньо швидко регулюватися в широких межах). Останнє завдання є найбільш важко здійсненним через те, що при змінах потужності реактора суттєво змінюються й нейтронно-фізичні характеристики його активної зони – відбувається т. зв. «отруєння реактора», чи «йодна яма», що може призвести до втрати керованості ланцюгової реакції поділу [4].

На теперішній час вже існують проекти ядерних реакторів, які значною мірою відповідають цим вимогам. Серед них можна виокремити реактор на біжучій хвилі (Traveling Wave Reactor, TWR; в російській інтерпретації – реактор Феоктистова) [13; 14].

[3] *Довідково*: на сьогодні технологія ММР визнана одним із найперспективніших напрямів із розвитку ядерної енергетики, а загальносвітовий ринок ММР після 2025 р. оцінюють приблизно в 1 трлн дол. США. Десять провідних країн світу розробляють понад 50 проектів ММР.

[4] Намагання підняти потужність реактора РВПК-1000 в умовах його «отруєння» поряд із конструктивними особливостями цього реактора призвели до аварії на 4-му енергоблоці Чорнобильської АЕС у 1986 р.

У свою чергу, Офіс ядерної енергії Департаменту енергетики США (DOE) надає перевагу трьом просунутим типам реакторів IV покоління, які рекомендовано взяти до уваги до 2030 р. [15]:

- SFR – реактор на швидких нейтронах з рідкометалевим (натрієвим) теплоносієм;
- VHTR – високотемпературний реактор з газовим розхолодженням;
- MSR – реактор на розплавлених солях.

Ці перспективні типи реакторів найкраще відповідають сучасним вимогам щодо безпеки, надійності, економічності та екологічності. Проте реалізація цих проектів очікується не раніше середини або кінця 2020-х років, а основним проблемним питанням вважається забезпечення їх фінансування з боку держави та приватного сектору.

Тому найбільш прийнятною для реалізації в Україні слід вважати технологію малих модульних реакторів. У розрахунку на 1 кВт встановленої потужності ММР потребують нижчих капітальних витрат (порівняно з реакторами великої потужності). З урахуванням уже наявної інфраструктури та професійних кадрів це зможе забезпечити розширене відтворення атомних потужностей. Окрім того, подібний підхід має низку додаткових переваг, як-от: локалізація виробництва технологічного обладнання ММР в Україні; можливість роботи в маневровому режимі в широкому діапазоні потужностей; перспективу налагодження власного виробництва ядерного палива тощо.

Водночас під час проектування ММР можна передбачити, що частина виробленої енергії може бути використана для отримання водню, який є одним із найперспективніших видів невуглецевого палива на транспорті [16]. До речі, це стосується як автомобільного (у т. ч. вантажного), так і залізничного, морського та авіаційного транспорту. Перспективною є технологія паливних комірок, у яких водень з'єднується з киснем, унаслідок чого виникає електричний струм; струм надходить на електричні двигуни, які приводять транспортний засіб у рух. Наприклад, у Німеччині 2018 р. потяги на водні розпочали регулярні пасажирські перевезення [5].

До недоліків технології можна віднести достатньо високу вартість (як отримання водню, так і самого паливного елемента), нерозвинену інфраструктуру водневих заправок, а також проблеми із забезпеченням безпеки при отриманні, зберіганні, транспортуванні та застосуванні водню. Утім навіть з урахуванням здатності водню створювати вибухонебезпечні суміші, вибухо- та пожежонебезпечність водню зіставна із небезпеками природного газу та бензинів; техніко-економічні проблеми можуть бути розв'язані, а водневий транспорт – стати цілком безпечним і конкурентоспроможним.

Для України водень є перспективним паливом, яке в умовах жорсткого дотримання вимог безпеки може замінити вуглеводневі джерела енергії та зменшити рівень енергетичної залежності країни. Основним завданням на цьому шляху є забезпечення достатньо високої ефективності виробництва та зберігання водню, а також розроблення конкурентоспроможних енергоустановок з його використання. Зважаючи на наявний науковий потенціал [6], ці завдання в Україні можуть бути вирішені вже у ближчій перспективі.

Висновки. Уряди всього світу ставлять перед собою все більш амбітні завдання у протидії зміні клімату та забезпеченні доступної і стійкої енергії для всіх. У багатьох випадках для досягнення цих цілей будуть потрібні технології, які або ще не існують, або не готові до ринку. Технологічні інновації можуть змінити ситуацію на краще в усіх секторах, включно й виробництві електроенергії, промисловості, будівництві та транспорті [17].

Проте навряд чи яка-небудь окрема країна зможе вирішити всі свої енергетичні та кліматичні проблеми самотужки. Міжнародна співпраця може допомогти країнам прискорити інноваційні процеси шляхом визначення спільних пріоритетів і проблем, усунення наявних прогалин в інноваціях, обміну прогресивним досвідом для впровадження технологій чистої енергії. МЕА рекомендує зосередитися на впровадженні провідних принципів співробітництва [17]: 1) розширення співпраці в рамках багатосторонніх ініціатив, які існують; 2) фокусування на ринках, що розвиваються; 3) зміцнення державно-приватного партнерства. При цьому важливо забезпечити політичну підтримку

[5] Водневий потяг – європейський технологічний прорив із застереженнями. URL: https://p.dw.com/p/355ca (дата звернення: 07.10.2019).

[6] Українські дослідницькі лабораторії, що працюють над водневими проектами. URL: http://uahe.net.ua/ukrainian-projects/346-ukrajinski-doslidnitski-laboratoriji-shcho-pratsyuyut-nad-vodnevimi-proektami.html (дата звернення: 07.10.2019).

новітніх технологій на всіх стадіях інноваційного циклу.

Україна має значний потенціал ядерної та відновлюваної енергетики [8]. Ураховуючи інноваційні прогалини, визначені МЕА, Україні (як на державному, так і корпоративному рівнях) у межах міжнародної співпраці доцільно забезпечити підтримку інноваційних проектів щодо малих модульних реакторів, у т. ч. використання ММР для отримання водню та забезпечення маневреності не за рахунок зміни режимів роботи реактора, а за рахунок водневої енергетики; водневих паливних комірок та інноваційного ядерного палива для ММР, стійкого до аварій. Зазначене надасть змогу забезпечити інноваційний розвиток економіки країни та досягти встановлених як політичних (енергетична незалежність), так і глобальних (боротьба зі зміною клімату) цілей.

Список використаних джерел

1. Роль та місце атомно-промислового комплексу України в контексті забезпечення енергетичної незалежності та суверенітету держави : аналіт. записка. Київ : Національний інститут стратегічних досліджень, 2019. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2019-08/ANALIT%20BOBRO%20NATIONAL%20SECURITY%20%23%202%202019.pdf (дата звернення 30.09.2019).
2. Innovation / The International Energy Agency. URL: https://www.iea.org/topics/innovation/ (дата звернення: 30.09.2019).
3. Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations / The International Energy Agency. URL: http://www.acs-giz.si/resources/files/Energy_technology_perspectives.pdf (дата звернення: 30.09.2019).
4. Наукометричний та патентний аналіз сфери «Енергетика, енергоефективність»: основні світові тренди, співвідносність з ними українських інноваційних пріоритетів та місце України на відповідному світовому ринку інтелектуальної власності : аналіт. матер. // Наука. Інноваційна діяльність та трансфер технологій / М-во освіти і науки України. URL: https://mon.gov.ua/storage/app/media/innovatsii-transfer-tehnologiy/ta-patentniy-analizenergetika-energoefektivnistosnovni-svitovi-trendi-ta-mistse-ukraini.pdf (дата звернення 30.09.2019).
5. Sustainable Development Scenario. A cleaner and more inclusive energy future / The International Energy Agency. URL: https://www.iea.org/weo/weomodel/sds/ (дата звернення: 30.09.2019).
6. Innovation gaps / The International Energy Agency. URL: https://www.iea.org/topics/innovation/innovationgaps/ (дата звернення: 30.09.2019).
7. IEA Energy Technology RD&D Budgets (2019 first edition) / The International Energy Agency. URL: https://webstore.iea.org/download/direct/2776?fileName=Energy_Technology_RDD_2019_Overview.pdf (дата звернення: 30.09.2019).
8. Розвиток низьковуглецевої енергетики як ключовий елемент сталого розвитку країни : аналіт. записка. Київ : Національний інститут стратегічних досліджень, 2018. URL: http://old2.niss.gov.ua/content/articles/files/Bobro-fbf25.pdf (дата звернення30.09.2019).
9. Coupling reactors with non-electric applications / The International Energy Agency. URL: https://www.iea.org/topics/innovation/power/gaps/coupling-reactors-with-non-electric-applications.html (дата звернення: 30.09.2019).
10. Small Modular Reactors and advanced reactor demonstration / The International Energy Agency. URL: https://www.iea.org/topics/innovation/power/gaps/small-modular-reactors-and-advanced-reactor-demonstration.html (дата звернення: 30.09.2019).
11. Small Modular Reactors: Adding to Resilience at Federal Facilities / U.S. Department of Energy. December 2017. URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/01/f47/Small%20Modular%20Reactors%20-%20Adding%20to%20Resilience%20at%20Federal%20Facilities%20.pdf (дата звернення: 30.09.2019).
12. Innovative fuels for nuclear power / The International Energy Agency. URL: https://www.iea.org/topics/innovation/power/gaps/innovative-fuels-for-nuclear-power.html (дата звернення: 30.09.2019).
13. Gilleland John, Petroski Robert, Weaver Kevan. The Traveling Wave Reactor: Design and Development. URL: https://www.researchgate.net/publication/301827955_The_Traveling_Wave_Reactor_Design_and_Development/fulltext/57dca79708ae5292a379bfed/301827955_The_Traveling_Wave_Reactor_Design_and_Development.pdf?origin=publication_detail (дата звернення: 30.09.2019).
14. TWR Technology: Preparing Nuclear Energy for Global Growth. *TerraPower*. URL: http://terrapower.com/technologies/twr (дата звернення: 30.09.2019).
15. 3 Advanced Reactor Systems to Watch by 2030 / U.S. Department of Energy. URL: https://www.energy.gov/ne/articles/3-advanced-reactor-systems-watch-2030 (дата звернення: 30.09.2019).
16. The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities / The International Energy Agency. URL: https://webstore.iea.org/download/direct/2803?fileName=The_Future_of_Hydrogen.pdf (дата звернення: 30.09.2019).

17. Commentary: Three priorities for energy technology innovation partnerships / The International Energy Agency. URL: https://www.iea.org/newsroom/news/2019/august/three-priorities-for-energy-technology-innovation-partnerships.html?utm_campaign=IEA%20newsletters&utm_source=SendGrid&utm_medium=Email (дата звернення: 30.09.2019).

References

1. Rol ta mistse atomno-promyslovoho kompleksu Ukrainy v konteksti zabezpechennia enerhetychnoi nezalezhnosti ta suverenitetu derzhavy [The role and place of Ukraine's nuclear industry in the context of ensuring energy independence and state sovereignty]. (2019). Kyiv: NISS. *www.niss.gov.ua*. Retrieved from https://www.niss.gov.ua/sites/default/files/2019-08/ANALIT%20BOBRO%20NATIONAL%20SECURITY%20%23%202%202019.pdf (viewed 30.09.2019) [in Ukrainian].
2. Innovation. (n. d.). *The International Energy Agency. www.iea.org*. Retrieved from https://www.iea.org/topics/innovation/ (viewed 30.09.2019) [in English].
3. Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations. (n. d.). *The International Energy Agency. www.acs-giz.si*. Retrieved from http://www.acs-giz.si/resources/files/Energy_technology_perspectives.pdf (viewed 30.09.2019) [in English].
4. Naukometrychnyi ta patentnyi analiz sfery «Enerhetyka, enerhoefektyvnist»: osnovni svitovi trendy, spivvidnosnist z nymy ukrainskykh innovatsiinykh priorytetiv ta mistse Ukrainy na vidpovidnomu svitovomu rynku intelektualnoi vlasnosti [Scientific and patent analysis of the sphere "Energy, energy efficiency": main world trends, correlation with them of Ukrainian innovation priorities and place of Ukraine in the relevant world market of intellectual property]. (n. d.). *mon.gov.ua*. Retrieved from https://mon.gov.ua/storage/app/media/innovatsii-transfer-tehnologiy/ta-patentniy-analizenergetika-energoefektivnistosnovni-svitovi-trendi-ta-mistse-ukraini.pdf (viewed 30.09.2019) [in Ukrainian].
5. Sustainable Development Scenario. A cleaner and more inclusive energy future. (n. d.). *The International Energy Agency. www.iea.org*. Retrieved from https://www.iea.org/weo/weomodel/sds/ (viewed 30.09.2019) [in English].
6. Innovation gaps. (n. d.). *The International Energy Agency. www.iea.org*. Retrieved from https://www.iea.org/topics/innovation/innovationgaps/ (viewed 30.09.2019) [in English].
7. IEA Energy Technology RD&D Budgets (2019 first edition). (n. d.). *The International Energy Agency. webstore.iea.org*. Retrieved from https://webstore.iea.org/download/direct/2776?fileName=Energy_Technology_RDD_2019_Overview.pdf (viewed 30.09.2019) [in English].
8. Rozvytok nyzkovuhletsevoi enerhetyky yak kliuchovyi element staloho rozvytku krainy [The development of low carbon energy as a key element in the country's sustainable development]. (2018). Kyiv: NISS. *old2.niss.gov.ua*. Retrieved from http://old2.niss.gov.ua/content/articles/files/Bobro-fbf25.pdf (viewed 30.09.2019) [in Ukrainian].
9. Coupling reactors with non-electric applications. (n. d.). *The International Energy Agency. www.iea.org*. Retrieved from https://www.iea.org/topics/innovation/power/gaps/coupling-reactors-with-non-electric-applications.html (viewed 30.09.2019) [in English].
10. Small Modular Reactors and advanced reactor demonstration. (n. d.). *The International Energy Agency. www.iea.org*. Retrieved from https://www.iea.org/topics/innovation/power/gaps/small-modular-reactors-and-advanced-reactor-demonstration.html (viewed 30.09.2019) [in English].
11. Small Modular Reactors: Adding to Resilience at Federal Facilities. *U.S. Department of Energy*. December 2017. *www.energy.gov*. Retrieved from https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/01/f47/Small%20Modular%20Reactors%20-%20Adding%20to%20Resilience%20at%20Federal%20Facilities%20.pdf (viewed 30.09.2019) [in English].
12. Innovative fuels for nuclear power. (n. d.). *The International Energy Agency. www.iea.org*. Retrieved from https://www.iea.org/topics/innovation/power/gaps/innovative-fuels-for-nuclear-power.html (viewed 30.09.2019) [in English].
13. Gilleland, John, Petroski, Robert, & Weaver, Kevan. The Traveling Wave Reactor: Design and Development. (n. d.). *www.researchgate.net*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/301827955_The_Traveling_Wave_Reactor_Design_and_Development/fulltext/57dca79708ae5292a379bfed/301827955_The_Traveling_Wave_Reactor_Design_and_Development.pdf?origin=publication_detail (viewed 30.09.2019) [in English].
14. TWR Technology: Preparing Nuclear Energy for Global Growth. (n. d.). *TerraPower. A nuclear innovation company. terrapower.com*. Retrieved from http://terrapower.com/technologies/twr (viewed 30.09.2019) [in English].
15. 3 Advanced Reactor Systems to Watch by 2030. (n. d.). *U.S. Department of Energy. www.energy.gov*. Retrieved from https://www.energy.gov/ne/articles/3-advanced-reactor-systems-watch-2030 (viewed 30.09.2019) [in English].
16. The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. (n. d.). *The International Energy Agency. webstore.iea.org*. Retrieved from https://webstore.iea.org/download/direct/2803?fileName=The_Future_of_Hydrogen.pdf (viewed 30.09.2019) [in English].
17. Commentary: Three priorities for energy technology innovation partnerships. (n. d.). *The International Energy Agency. www.iea.org*. Retrieved from https://www.iea.org/newsroom/news/2019/august/three-priorities-for-energy-technology-innovation-partnerships.html?utm_campaign=IEA%20newsletters&utm_source=SendGrid&utm_medium=Email (viewed 30.09.2019) [in English].