

КИРИЛЕНКО

Олександр Васильович — академік НАН України, директор Інституту електродинаміки НАН України, академік-секретар Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України

СНЄЖКІН

Юрій Федорович — академік НАН України, директор Інституту технічної теплофізики НАН України

БАСОК

Борис Іванович — член-кореспондент НАН України, завідувач відділу теплофізичних основ енергоощадних технологій Інституту технічної теплофізики НАН України

БАЗЄЄВ

Євген Трифонович — кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту технічної теплофізики НАН України

ЕНЕРГЕТИКА, НАУКА ТА ІНЖЕНЕРІЯ: СУЧАСНИЙ СТАН І ВИКЛИКИ РОЗВИТКУ

Наведено огляд проблем енергетики України, Європи і світу. Проаналізовано виклики і ризики, які внаслідок російської агресії постали перед соціально-економічною сферою країни, зокрема в галузі енергетики, а також перед академічною фундаментальною наукою. Підкреслено роль науки як інтелектуальної основи соціально-економічної, політичної і воєнної могутності держави. Зазначено, що в Інституті технічної теплофізики НАН України розвивається новий науковий напрям — фундаментальна енергетична інженерія. Розглянуто головні тренди розвитку енергетики Європи і світу в контексті економічних загроз, цінової політики, ресурсної бази, технологій енергоперетворення і кінцевого низьковуглецевого енерговикористання. Акцентовано увагу на початку глобальної енергетичної кризи у світі, запропоновано підходи для пом'якшення її негативного впливу на світову економіку.

Ключові слова: енергетика, глобальна енергетична криза, енергетична гнучкість і стійкість, чиста енергія, фундаментальна енергетична інженерія.

Україна на шляху свого соціально-економічного розвитку неодноразово проходила точки біфуркації, що змінювали сценарії і тренди розвитку країни, — це, наприклад, світова фінансова криза 2007 і 2009 рр., пандемія COVID-19 в 2020—2021 рр. Наразі з'явилася нова жахлива точка біфуркації — у 2022 р. Україна зіткнулася з цивілізаційними викликами та ризиками, породженими нічим не спровокованою і невиправданою війною Росії проти України. Тепер доводиться оцінювати сценарії виживання та в екстремальних умовах переглядати плани мобілізації й подальшого розвитку країни.

У статтях, опублікованих у журналі «Вісник НАН України» за воєнний 2022 рік, провідні вчені представляли концепції і стратегії протидії зовнішнім та внутрішнім загрозам національній безпеці країни. Виклики постали і перед усіма галузями економіки, і перед українською науковою сферою, зокрема й перед академічною наукою. Одним з них є вирішення проблем розвитку паливно-енергетичного комплексу країни.

Фундаментальні наукові основи. Як підкреслено в Національній доповіді «Національна стійкість України: стратегія

відповіді на виклики та випередження гібридних загроз», наука сьогодні «є однією з найбільш конкурентних сфер діяльності та вагомим економічним ресурсом, що визначає рівень інноваційного розвитку держави, показником якого у світі вважають наукомісткість валового внутрішнього продукту та кількість дослідників на 1 млн населення» [1]. У доповіді автори шукають відповіді на гібридні загрози і аналізують феномен національної стійкості як здатності держави «у взаємодії із суспільством зберігати стійкість до зовнішніх та внутрішніх агресивних впливів, оперативно реагувати на асиметричні загрози запровадженням змін та адаптацією без шкоди для основних цінностей суспільства, безперервно функціонувати під час криз, а також відновлюватися від руйнівних наслідків агресивних дій будь-якої природи (самовідновлення)» [1].

Серед дев'яти основних пріоритетів стратегії національної стійкості України є енергетична стійкість як вагома складова економічної стійкості країни. «Енергетична стійкість потребує проведення моніторингу світового і регіональних енергетичних ринків та енергетичної політики держави в контексті усвідомлення актуальних загроз і викликів, а також можливостей протидіяти ним» [1].

Важливою складовою економічної політики воєнного часу має бути розроблення стратегічного плану заходів щодо реконструкції галузевої інфраструктури та відновлення нормального функціонування енергетики в умовах післявоєнного розвитку країни. В енергетичному секторі України воєнного періоду першочерговим завданням є мобілізація та оптимізація використання наявних енергоресурсів для надійного енергопостачання за умови ефективного енергоменеджменту. Енергобезпека, енергостійкість, енергогнучкість, енергоживучість і підвищення енергоефективності стають основними імперативами і пріоритетами політики у світі, особливо в Європі і, безперечно, в Україні. Нагальною потребою є скорочення використання викопного палива і збільшення частки відновлюваних джерел енергії та водню [2, 3]. Децентралізація енергопостачання, зеле-

на енергетика, місцева енергетика — це тренд розвитку, зумовлений і посилений війною. Він доповнює світові зусилля з отримання чистої (низьковуглецевмісної або вуглецевонеїтральної) енергії з метою мінімізації згубних наслідків глобального потепління клімату.

Для України сьогодні вкрай важливою є енергоефективно орієнтована інноваційна модернізація енергетики з проривним тактичним і стратегічним оновленням економіки. Під тактичним оновленням розуміється використання вже розроблених і апробованих на практиці технологій, які гарантують помітний техніко-економічний ефект «уже зараз», а під стратегічним — проведення відповідних фундаментальних досліджень і розроблення за їх результатами нових проривних технологій, зокрема створення інтелектуальних мереж електро-, тепло- і водозабезпечення.

Профільні установи НАН України брали активну участь у вирішенні низки науково-технічних проблем, які постали в процесі підготовки Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України до переходу на синхронну роботу з Європейською мережею операторів систем передачі електроенергії ENTSO-E. Отримані результати дали змогу в складних умовах успішно реалізувати перехід ОЕС України на режим повної синхронізації з європейською енергетичною мережею і здійснити відокремлення від енергетичних систем Росії та Білорусі, що істотно підвищило стійкість енергетичної системи України [4]. Було успішно проведено пробні експортні поставки електроенергії в ЄС, а потім, через дефіцит в Україні електроенергії внаслідок масованих бомбардувань енергетичної інфраструктури, — й імпорتنі поставки з ЄС.

Вплив війни на енергетику України. Наприкінці 2021 р. в Європі сталося економічно невинуватене штучне підвищення цін на російські енергоносії, яке можна було трактувати як енергетичну агресію РФ. 24 лютого 2022 р. Росія розпочала повномасштабну війну проти України з масовим знищенням населення, транспортної та житлової інфраструктури. Станом на 10 серпня 2022 р. було пошкодже-

но або зруйновано 300 об'єктів комунальної теплоенергетики, серед яких — 10 потужних ТЕЦ¹. На авторському фото (рис. 1) можна бачити, як виглядає розбомблений трансформатор електростанції потужної ТЕЦ одного з обласних центрів України.

Восени РФ перейшла до цілеспрямованого руйнування енергетики України. Внаслідок цього енергетичного тероризму з 10 жовтня по 10 листопада 2022 р. пошкоджено або зруйновано третину об'єктів енергетичної інфраструктури (близько 400 одиниць). У листопаді-грудні 2022 р. ракетні удари по об'єктах енергетики стали ще інтенсивнішими. Загалом станом на 10 лютого 2023 р. енергосистема України пережила 14 масштабних ракетних атак і ще більше бомбардувань дронами. Проте найтяжчі, непоправні втрати — це люди. У звіті ВООЗ² зазначено, що внаслідок воєнної агресії станом на січень 2023 р. експертами ООН підтверджено 18 657 жертв серед мирного населення (7 110 загиблих і 11 547 поранених). На жаль, це лише задокументовані випадки, а реальне число жертв може бути набагато більшим. 17,7 млн людей в Україні потребували гуманітарної допомоги; 8 млн змушені були переміститися до Європи, а кілька мільйонів українців стали внутрішньо переміщеними особами, зокрема й через проблеми з теплопостачанням великих міст.

Захоплення військами РФ спочатку Чорнобильської, а потім Запорізької атомних електростанцій створило загрозу не лише для України, а й для всього світу. Такі дії на порушення міжнародного права та основних принципів ядерної безпеки кваліфікуються як ядерний тероризм [5].

За даними Київської школи економіки, станом на грудень 2022 р. Україна зазнала прямих задокументованих збитків від російських атак на інфраструктуру на \$136 млрд, при-



Рис. 1. Зруйнований електротрансформатор ТЕЦ потужність 40 МВт в одному з обласних центрів України. Весна 2022 р. (фото Б.І. Баска)

чому найбільше постраждала енергетика³. За інформацією Мінінфраструктури України, внаслідок російських ракетних обстрілів пошкоджено 592 об'єкти теплопостачання: 444 котельні, 13 ТЕЦ, 7 ТЕС, 128 центральних теплових пунктів. Уже відновлено майже 300 об'єктів теплопостачання. На середину грудня 2022 р. збитки, завдані житловому фонду, досягли \$52,5 млрд. Частка житлового фонду в загальному обсязі збитків становить 38,6 %. У Донецькій області зруйновано 78 700 будинків (\$14,3 млрд), на Київщині зруйновано і пошкоджено 22 800 житлових будинків (\$8,2 млрд), у столиці — 348 будинків, переважна більшість з яких багатоквартирні (\$0,9 млрд). «Це політика знищення українців через створення умов, непридатних для життя. З наближенням зими російське керівництво свідомо позбавляє людей базових речей: води, електрики, тепла. Так само, як свідомо прирікало на голодну смерть під час Голодомору 1932—1933 рр. Це — тероризм і воєнний злочин», — заявив Генпрокурор України⁴.

У статті [6] узагальнено проблеми енергетики України, зокрема муніципальної, забезпечення надійного енергопостачання житло-

¹ Підготовка до проходження опалювального періоду в умовах воєнного стану. Матеріали семінару USAID, 12 серпня 2022 р.

² Бюлетень ВООЗ за січень 2023 р.
<https://bit.ly/3LsYh4A>

³ Report of the Kyiv School of Economics.
<https://bit.ly/3ZKfs65>

⁴ Андрій Костін: Обстріли об'єктів електроенергетики — це свідомо політика вбивства українців. Офіс Генерального прокурора України. 24.10.2022.

вих і громадських будівель та споруд в умовах воєнного стану та у післявоєнний період, наведено перелік пріоритетних наукових досліджень та науково-технологічних розробок, спрямованих на створення конкурентоспроможної продукції, необхідної для забезпечення енергетичної безпеки в умовах війни та досягнення енергонезалежності регіонів і країни в цілому.

Досить глибокий аналіз комплексних проблем науки, наприклад співвідношення фундаментальної і прикладної науки, місця і ролі науки в післявоєнному відновленні, значення науки як *інтелектуального фундаменту* економічної, культурної, воєнної могутності держави, наведено в статті [7]. Її автор, академік НАН України В.М. Локтев, ставить низку питань про стан академічної науки і шукає відповіді на них, наголошуючи, що *«саме наука, пізнаючи навколишній світ, відіграла ключову роль у масштабних соціальних змінах, забезпечивши сучасний рівень життя провідних країн світу, які й стали такими завдяки щедрій підтримці науки і науковців»*. На жаль, як зазначає автор, йому не відомий *«проєкт розвитку післявоєнної України, який має визначити шляхи її надзвичайного політико-економічного перетворення, зокрема подальшу демократизацію, лібералізацію, спрощення законодавства, в тому числі й у науковій сфері, різке зменшення ролі і впливу, особливо політичного, олігархів, поступове приборкання корупційних відносин тощо»*. У статті поставлено кардинальне питання: яка наука потрібна Україні саме сьогодні, з огляду на найбільш пріоритетні фундаментальні наукові напрями у світі. А такими, за даними журналу Science, є: *«квантові технології і фотоніка, математичне моделювання і штучний інтелект, перспективні функціональні матеріали, генетика і біомедицина, космічні технології, а також технології стійкого розвитку»*. Серед технологій стійкого розвитку, безумовно, має бути забезпечення енергетичної стійкості, яка є вагомим складовою економічної стійкості, як зазначено в національній доповіді [1].

Сьогодні тренди і ризики розвитку енергетики світу та України доводиться визначати в

умовах важко передбачуваних змін світових та національних реалій.

Фундаментальна енергетична інженерія.

В установах Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України фундаментальні і прикладні розробки інноваційних пропозицій з модернізації та розвитку муніципальної енергетики виконують у межах наукової теми *«методологія організаційно-економічного та інноваційного підвищення енергоефективності будівель з урахуванням їх термомодернізації і тренду використання низьковуглецевих технологій»*. Такий підхід реалізується в тріаді енергетика—економіка—екологія стосовно сучасного технологічного укладу з метою підвищення якості життя. Цей науковий напрям (фундаментальна енергетична інженерія загалом, а для теплоенергетики — фундаментальна теплофізична інженерія) пов'язаний з різними практичними програмами і застосуваннями, зокрема він може бути основою пріоритетних наукових досліджень та науково-технологічних розробок, спрямованих на створення нової конкурентоспроможної науково-технічної і енергетичної продукції, затребуваної в умовах воєнного стану.

Зважаючи на результати досліджень інфраструктури енергопостачання демонстраційного пасивного будинку типу «нуль енергії» (споруджений на території Інституту технічної теплофізики НАН України, площа 300 м²), з метою поглиблення й розширення теорії і практики підвищення енергоефективності будівель та з урахуванням змін клімату на найближчу перспективу визначено головні цілі, предмет, тематику, методи та інструментарій подальших фундаментальних і прикладних досліджень [8, 9].

Роботи в зазначеному напрямі ґрунтуються на всебічному застосуванні технік і технологій високої енергоефективності та системно узгоджуються із заходами з виконання низки законодавчих актів, прийнятих останнім часом у сфері енергетики, зокрема законів *«Про енергетичну ефективність будівель»*; *«Про енергетичну ефективність»*; *«Про Фонд енергоефективності»*; *«Про запровадження нових*

інвестиційних можливостей, гарантування прав та законних інтересів суб'єктів підприємницької діяльності для проведення масштабної енергомодернізації»; «Про внесення змін до деяких законів України щодо усунення бар'єрів для масштабної термомодернізації будівель», а також національних планів: плану дій з енергоефективності до 2030 року; плану з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року; плану дій з охорони навколишнього природного середовища на період до 2025 року; плану збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії. Отже, попри певний спротив фінансово-промислових груп, Україна, як і весь цивілізований світ, обрала подальший шлях свого енергетичного розвитку, пов'язаний з енергоефективністю та енергомодернізацією, використанням відновлюваних джерел енергії, протидією згубним впливам глобального потепління, широким застосуванням науково-технічних інновацій.

Для забезпечення реалізації такого підходу у другій половині 2022 р. було розроблено такі документи, як Довгострокова стратегія термомодернізації до 2050 року; Концепція Державної цільової програми підтримки термомодернізації до 2030 року; Концепція державної цільової програми стимулювання енергетичної модернізації систем централізованого теплопостачання до 2030 року. Наразі опрацьовано Операційний план заходів з виконання завдань першого періоду «Перший середньостроковий план термомодернізації будівель до 2027 року» першого етапу «Відновлення та усунення бар'єрів» на період 2021–2030 роки Довгострокової стратегії термомодернізації будівель на період до 2050 року.

Стан енергетики в Україні. У 2021 р. українські споживачі використали 28,6 млрд м³ газу, в тому числі: населення — 8,6 млрд м³ (31,9 % загального обсягу споживання); теплокомуненерго — 6,3 млрд м³ (23,5 % загального обсягу); промисловість, бюджетні організації та інші побутові споживачі — 11,9 млрд м³ (44,6 % загального споживання). Обсяг виробничо-технологічних витрат та втрат становив

1,8 млрд м³. Споживання забезпечувалося здебільшого внутрішнім видобутком, який за результатами 2021 р. становив 19,78 млрд м³.

На щастя, зима 2022/2023 рр. виявилася досить теплою. Крім того, потреби в газі знизилися через воєнні дії, оскільки багато промислових підприємств вимушено припинили роботу. Тому, хоча на початку зимового періоду до підземних сховищ було закачано лише 14,6 млрд м³ (проти запланованих урядом 19 млрд м³), є всі підстави вважати, що цих обсягів вистачить, щоб нормально завершити поточний опалювальний сезон. Більше того, в Україні з'явилася можливість втілити в життя амбітний план — вперше в історії відмовитися від імпорту природного газу, про що в інтерв'ю агентству Bloomberg⁵ заявив очільник правління НАК «Нафтогаз України» Олексій Чернишов. На його думку, це є цілком реальним, якщо «Укргазвидобування» збільшить видобуток на 8 %, а приватні компанії — на 16 %. Що стосується ядерного палива для АЕС, то на сьогодні Україна позбулася залежності від російських поставок.

Українські енергетики виявили справжній героїзм під час оперативного ремонту пошкоджених ракетними ударами енергетичних мереж та обладнання, набули безцінного досвіду в керуванні ОЕС України, зокрема й в умовах обстрілів та бомбардувань. Незважаючи на безліч проблем, вдалося організувати поставки дефіцитних електротрансформаторів (як тут не згадати фактично доведений до банкрутства Запорізький завод трансформаторів) та пересувних енергогенераторів, а завдяки застосуванню стабілізаційних відключень — забезпечити оптимальний рівень електропостачання. Образно кажучи, на наших очах енергетика стала одночасно і Попелюшкою, і богом вітчизняної воєнної економіки.

Більш детально стан енергетики України проаналізовано в статті [8].

Початок енергетичної кризи. Сьогодні у світі розгортається енергетична криза, яка

⁵ Ukraine Plans to Avoid Gas Imports This Year, Naftogaz CEO Says. *Bloomberg*. 23.02.2023. <https://bloom.bg/3JZvG65>

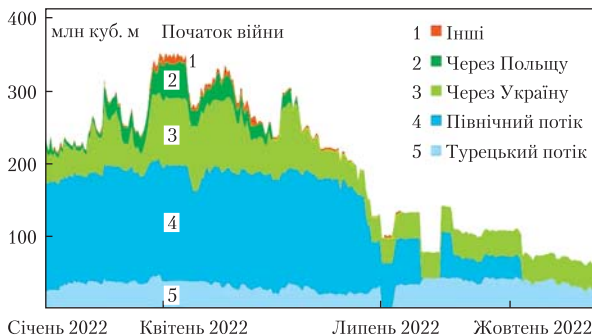


Рис. 2. Добові обсяги постачання трубопровідного газу з Росії в Європу і Туреччину у 2022 р.

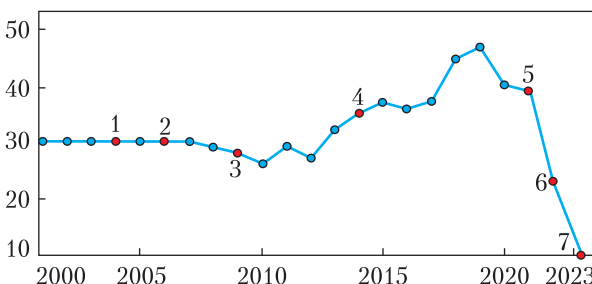


Рис. 3. Частка (%) природного газу в ЄС, що забезпечувалася поставками з РФ, у 2000–2023 рр. Точки збурення: 1 — рекомендації МЕА для ЄС щодо диверсифікації російського газу, 2004 р.; 2 і 3 — істотне зменшення транспортування газу через ГТС України у 2006 і 2009 рр.; 4 — захоплення Росією АР Крим, 2014 р.; 5 — початок створення Газпромом штучного дефіциту газу, 2021 р.; 6 — війна РФ проти України 2022 р.; 7 — стан на січень 2023 р. [12]

справді є глобальною. І хоча простежуються деякі паралелі з нафтовими шоками 1970-х років, вона має дуже важливі відмінності. Сучасна криза стосується всіх видів викопного палива, тоді як у 1970-х роках цінові стрибки здебільшого обмежувалися нафтою, оскільки тоді світова економіка значно більше залежала від нафти і меншою мірою від газу. Наразі світова економіка набагато більше взаємопов'язана, ніж це було 50 років тому, що посилює взаємовплив різних енергоресурсів.

Основні причини зростання цін на газ в Європі у 2021–2022 рр. були такі: російський Газпром, дотримуючись певною мірою своїх

довгострокових контрактів на постачання, значно зменшив частку короткострокових продажів і не поповнював свої орендовані підземні газові сховища в Європі до рівня попередніх років; тривалий штиль на північному морському шельфі Європи призвів до зменшення вітрової електрогенерації; певний час у Європі спостерігалася постійна висока хмарність, що спричинило скорочення обсягів сонячної електрогенерації; у Франції були деякі проблеми з атомною електрогенерацією; на початку опалювального сезону 2021/2022 рр. Газпром неочікувано розпочав профілактично-ремонтні роботи на магістральних газових мережах у Росії; з незрозумілих причин РФ не забирала з ремонту в Канаді потужну газоперекачувальну турбіну фірми «Сіменс»; було призупинено комерційну експлуатацію газопроводу «Турецький потік»; і зрештою останньою ланкою в цьому ланцюгу стало руйнування трьох з чотирьох гілок газопроводів «Північний потік» № 1 і № 2. Деякі із зазначених ситуацій виглядають доволі штучними і далеко не всі обставини подій чітко з'ясовані, але ці чинники спричинили турбулентність на європейському газовому ринку перед початком опалювального сезону, що, відповідно, зумовило значне зростання цін.

На рис. 2 наведено динаміку поставок російського трубопровідного природного газу в 2022 р. в Європу і Туреччину [10]. Зазначимо, що в 2021 р. добовий обсяг транзиту становив від 450 (влітку) до 400 млн м³ (у грудні) [11], а в січні 2022 р., безпосередньо перед широкомасштабним воєнним вторгненням РФ в Україну, різко впав (рис. 3).

Енергетика Європи. Під час воєнних дій енергетика України зазнала прямих пошкоджень та руйнувань, але й енергетика Європи відчула потрясіння, спричинені агресивним російським енергетично-фінансовим шантажем. У 2021 р. чверть усієї спожитої в ЄС енергії надходила з РФ. Після вторгнення в Україну Росія більш ніж удвічі скоротила трубопровідні поставки природного газу до ЄС — зі 140 у 2021 р. до приблизно 60 млрд м³ у 2022 р. За останні місяці Європа пережила,

ймовірно, найгіршу кризу, яка коштувала їй близько \$1 трлн через різке зростання цін на енергоносії⁶. Уряди країн ЄС виділили понад 700 млрд євро прямої допомоги, щоб надати підтримку компаніям і споживачам у подоланні цього шоку. Для порівняння: розмір фонду ЄС з відновлення після COVID-19 становив 750 млрд євро.

Доволі тепла погода, широкий спектр постачальників і заходи з економії газу (приблизно на 50 млрд м³) допомогли, оскільки ціни вже впали до довоєнного рівня. І це при тому, що загальний попит на газ в енергетичному секторі Європи зріс через дуже низький рівень виробництва в гідроенергетиці (низька водність річок) та атомній галузі (певні труднощі в ядерній енергетиці Франції). За даними асоціації Gas Infrastructure Europe, станом на початок лютого 2023 р. підземні газові сховища в ЄС були заповнені на 71,64 % (в них міститься 77,5 млрд м³), що на 19,83 % вище, ніж у середньому в цей час за останні п'ять років, тобто за опалювальний період зі сховищ було відібрано лише 30 млрд м³ газу. Зрештою здоровий прагматизм, жорстка політика і оперативність допомогли в опалювальний сезон скоротити використання природного газу в ЄС у середньому на 15 % (від 13 до 19,3 % у різні періоди).

На сьогодні ЄС більше не імпортує вугілля та сиру нафту з Росії, а поставки газу значно скоротилися. При цьому зросли обсяги поставок газу з Норвегії, зрідженого газу — з Катару, США та інших країн. Німеччині вдалося заповнити сховища на 91 % порівняно з 54 % рік тому, коли Росія вже спустошувала контрольовані нею потужності для зберігання газу. Уряд ФРН націоналізував місцеві підрозділи Газпрому і витратив мільярди євро на поповнення резервів, зокрема на оперативне будівництво двох LNG-терміналів, а в планах — спорудження ще трьох. Німеччина також розглядає проєкт зі створення нових невеликих плавучих заводів (FLNG) зі зрідження природного газу.

⁶ Putin's Energy Gambit Fizzles as Warm Winter Saves Europe. *Bloomberg*. 08.01.2023. <https://bloom.bg/3JMpUnT>

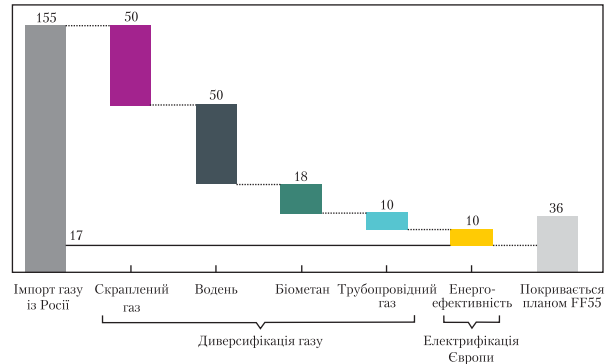


Рис. 4. Схема заміщення російського газу в Європі за планом REPowerEU (під електрифікацією розуміється переважно використання електромобілів і теплових насосів)

У 2022 р. ЄС імпортував понад 130 млрд м³ зрідженого газу, що на 60 % більше, ніж у 2021 р. Так швидко наростити обсяги надходжень зрідженого газу в Європу вдалося внаслідок зменшення на 20 % (понад 20 млрд м³) його імпорту в Китай через уповільнення китайського економічного зростання, спричинене карантинними заходами у боротьбі з поширенням COVID-19. За оцінками фахівців Morgan Stanley, протягом 2023 р. європейське споживання газу очікується приблизно на 16 % нижчим за середній за п'ять років рівень.

Подоланню енергетичної кризи сприяє також збільшення потужностей відновлюваної енергетики. За даними S&P Global, зростання вітрової та сонячної генерації допоможе цього року скоротити виробництво електроенергії на газу на десяти найбільших енергетичних ринках Європи на 39 %. Можливий імпорт російського трубопровідного газу в 2023 р. становитиме лише п'яту частину (близько 27 млрд м³) докризового рівня, і це велике скорочення для ринку ЄС, який споживав у 2021 р. 400 млрд м³. При цьому ціну на природний газ із Росії обмежили значенням не більше 180 євро за 1 МВт-год, а на нафту — не більш як \$60 за барель марки Brent. Успішному подоланню енергетичної кризи в ЄС ефективно сприяв і пакет Fit for 55 (скорочення викидів парникових газів у ЄС до 2030 р. на 55 %) [13] та оперативно прийнятий у березні 2022 р.

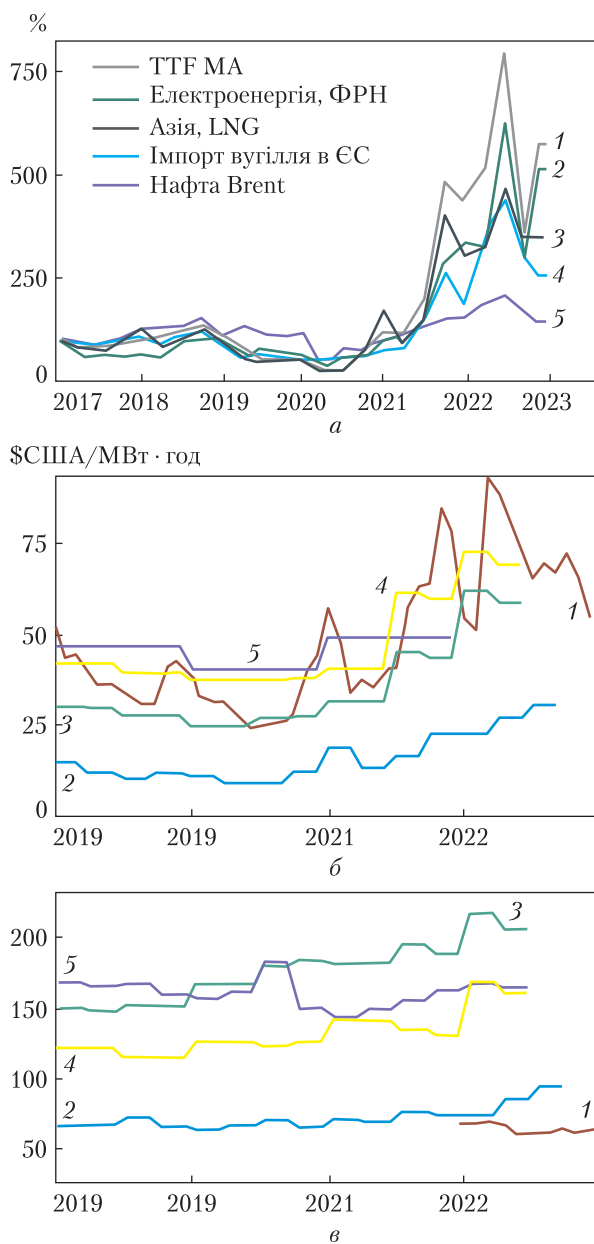


Рис. 5. Зростання осереднених цін: *a* – на енергоресурси (LNG – скраплений газ; TTF MA – спотові ціни на природний газ на нідерландському хабі; ціни є середніми квартальними значеннями, проіндексованими за даними на початок 2017 р.); *б* – на природний газ; *в* – на електроенергію (1 – Китай; 2 – США; 3 – Німеччина; 4 – Франція; 5 – Японія)

план REPowerEU (усунення залежності від російських енергоресурсів) [14], який передбачає заміну 155 млрд м³ російського газу. Значну роль у цьому мають відігравати біометан і зелений водень (рис. 4). На 2020 р. ЄС виробляв 3 млрд м³ біометану та 17 млрд м³ біогазу. Крім того, вже 1 березня 2022 р. Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) розробило для ЄС план зі зменшення залежності від поставок російського газу [15]. У грудні 2022 р. МЕА запропонувало Україні робочу програму з відновлення енергетики [16].

У жовтні 2022 р. Єврокомісія прийняла план дій щодо цифровізації енергетичного сектору [17], який має сприяти досягненню цілей енергетичної політики ЄС завдяки підтримці розвитку сталого, кібербезпечного, прозорого та конкурентоспроможного ринку цифрових енергетичних послуг, а також інвестиціям у цифрову енергетичну інфраструктуру.

Енергетика світу. Що стосується трендів розвитку світової енергетики, то дві кризові біфуркації – пандемія COVID-19 і вторгнення Росії в Україну – призвели до зростання цін на енергію і супутні їй енергоресурси та серйозних збоїв у глобальних ланцюгах забезпечення енергією та новими технологіями її виробництва. Подолати ці проблеми можна лише за допомогою фундаментальної енергетичної науки, інженерії та енергетичної економіки, реалізуючи відповідну енергетичну, кліматичну й індустріальну політику і забезпечивши енергетичну безпеку, стійкість, гнучкість та живучість [18].

Світові ринки пережили рекордні стрибки цін на енергетичні товари (рис. 5). Спотові ціни на природний газ у Європі регулярно піднімалися вище \$40/MBtu (мільйон британських теплових одиниць), що більш ніж удвічі перевищує ціну на нафту в однаковому енергетичному еквіваленті. Це викликало занепокоєння щодо впливу цінової ситуації на запланований перехід з вугілля на газ, хоча навіть у сценаріях, розроблених до енергетичної кризи, зокрема в кліматичному пакті Глазго, не було чітко визначено роль цієї стратегії у скороченні викидів. Світові ціни на вугілля дося-

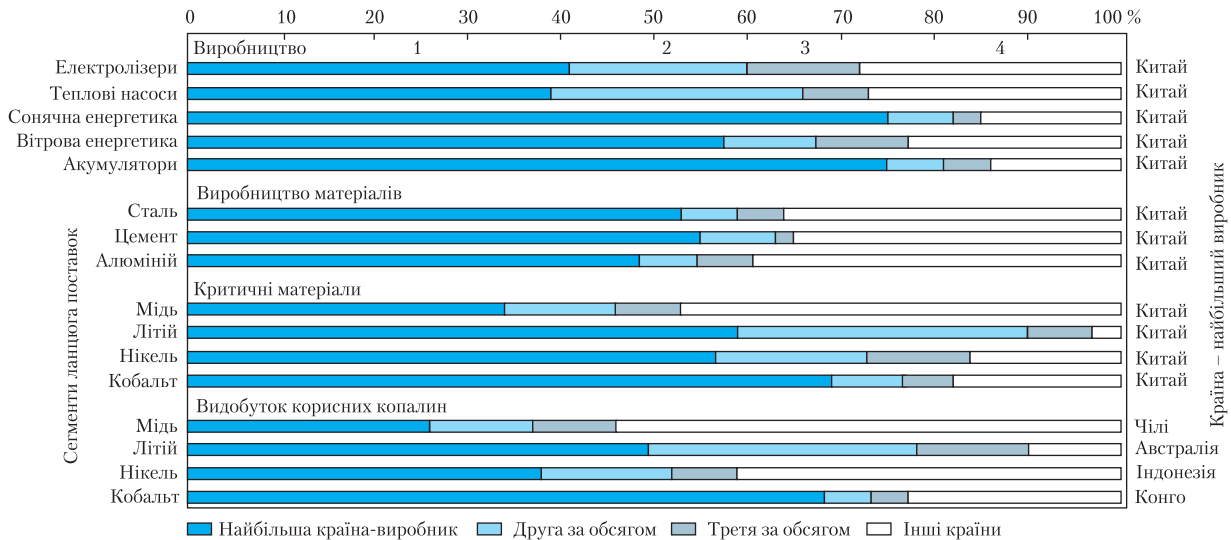


Рис. 6. Географічна концентрація за сегментами ланцюга поставок матеріалів, обладнання та корисних копалин

гли безпрецедентно високого рівня – в середньому понад \$300/т, більш ніж утричі перевищивши середню ціну 2010-х років. Однак при цьому в багатьох країнах зросло використання вугілля в електроенергетиці у відповідь на ажіотажний попит і високі ціни на природний газ, але очікується, що це тимчасово. Ці чинники, відповідно, призвели до зростання цін на електроенергію.

Ціна на природний газ на нідерландському хабі TTF на початку травня 2022 р. зросла в 10 разів відносно ціни на червень 2021 р., тоді як ціна на азійський скраплений газ збільшилася в 6,5 раза, а на північноамериканському хабі Henry зросла лише втричі, тобто регіональні ціни були різними, і на американських ринках спостерігалися в рази менші цінові коливання, ніж в Азії й тим паче в Європі [19]. І лише на початку березня 2023 р. ціни на газ на нідерландському хабі TTF вперше з липня 2021 р. наблизилися до позначки \$450 за тисячу кубометрів.

Монополія на матеріали і концентрація виробництва. Нинішня світова енергетична криза спонукає до більш ретельного і комплексного розгляду перспектив усього широкого життєвого циклу енерговикористання, зокрема й з огляду на можливі майбутні загрози.

Енергія є вагомим компонентом витрат на виробництво товарів, особливо у важкій промисловості. Природний газ та електроенергія – це два основні джерела енергії для виробників матеріалів і технологій, ціни на які різняться залежно від географії походження і виробника. Як видно із графіків (рис. 5б і 5в), ціни в США дещо менші, ніж загалом у світі, тому місцеві виробники мають структурну перевагу у випуску енергомісткої продукції. Щодо технологій масового виробництва устаткування для отримання чистої енергії, такого як вітроагрегати, електроакумулятори, електролізери, сонячні батареї, теплові насоси, то 70 % виробничих потужностей припадає на три країни, причому Китай домінує в усіх цих категоріях (рис. 6) [18].

Територіальний розподіл найважливіших корисних копалин пов'язаний із запасами ресурсів, подекуди значна їх частина концентрується в одній країні. Зокрема, Конго виробляє 70 % світового кобальту, лише три країни виробляють понад 90 % світового обсягу літію. При цьому варто зазначити, що ціни на фотоелектричний полікристалічний кремній, сталь і мідь між першою половиною 2020 р. і тим самим періодом 2022 р. приблизно подвоїлися. Середня ціна на літій у 2022 р. була майже в

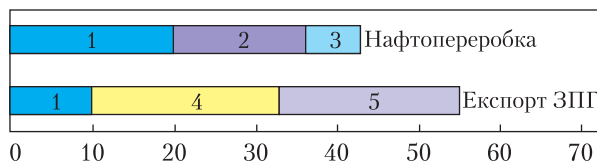


Рис. 7. Географічна концентрація за сегментами ланцюга поставок викопного палива на 2021 р.: 1 – США; 2 – Китай; 3 – Росія; 4 – Катар; 5 – Австралія

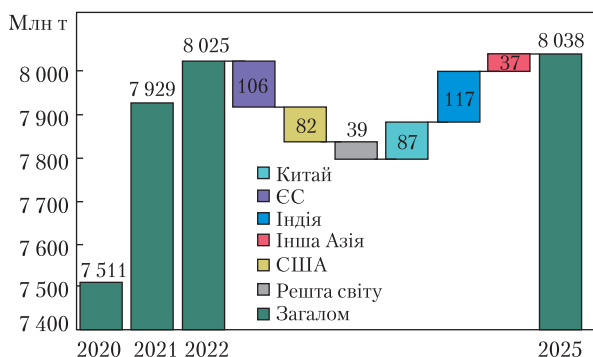


Рис. 8. Динаміка обсягів світового видобутку вугілля (млн фізичних т) і внесок основних країн та регіонів

4 рази вищою, ніж у 2019 р., вдвічі зросли ціни на кобальт і нікель. Це зумовило підвищення цін на фотоелектричні модулі на 25 %, а на вітрові турбіни за межами Китаю – на 20 %. Наведені дані свідчать про певні вразливості і навіть ризики стійкого світового енергопереходу на низьковуглецеву енергетику. Найяскравішим прикладом цього є ціновий шантаж Росії з поставками природного газу в Європу в ІV кварталі 2021 р. Інший приклад – недавня криза виробництва електронних чипів і мікросхем, яка була спричинена нестачею рідкісноземельних матеріалів.

На Китай припадає більшість оголошених планів з розширення до 2030 р. потужностей для виробництва сонячних фотоелектричних компонентів (близько 85 % для елементів і модулів, 90% для фотоповерхонь); компонентів шельфових вітроагрегатів (близько 85 % для лопатей і майже 90 % для гондол і башт); компонентів акумуляторів електромобілів (98 % для матеріалу анода і 93 % для матеріалу катода).

Що стосується водневих електролізерів, то близько чверті оголошених виробничих потужностей, які заплановано ввести в дію до 2030 р., припадає на Китай і ЄС, ще 10 % – на США (рис. 6). Характерно, що видобуток руд для виробництва критичних матеріалів контролюють різні країни, а вже наступний крок ланцюга поставок, тобто критичні матеріали з більшою доданою вартістю, повністю підконтрольний Китаю. Китай виробляє близько половини й більше матеріалів і впевнено домінує в кінцевому виробництві устаткування для чистої енергетики. Так, його частка у світовому виробництві електролізерів становить 41 %, теплових насосів – 39 %, електроакумуляторів – 75 %, обладнання для сонячної фотовольтаїки – 75 %, для вітрової енергетики – 58 % (рис. 6).

Критичні матеріали, такі як мідь, літій, кобальт і нікель, змінюють парадигму енергетичної безпеки. Для виготовлення електромобіля типового розміру цих матеріалів потрібно в 5 разів більше, ніж для звичайного автомобіля. Останнім часом Китай послідовно і рішуче стає важливим гравцем у світовій енергетиці та близьких до неї сферах економіки. Саме цим зумовлене доволі високе значення обмеженої ціни на природний газ із РФ – 180 євро за МВт-год (або трохи більше \$2100/тис. м³). Більш того, Китай, який є найбільшим світовим емітентом викидів парникових газів, демонструє досить оригінальне ставлення до Кіотського протоколу.

Щодо викопного палива, то три країни (США, Китай, РФ) забезпечують 44 % світової нафтопереробки, три країни (США, Катар, Австралія) – 55 % поставок зрідженого природного газу (рис. 7), а один лише Китай видобуває трохи більше половини всього світового обсягу вугілля.

Така ситуація непокоїть світову енергетичну спільноту і ставить багато питань до енергетичної безпеки в більш широкому розумінні, яка визначається, зокрема, станом сфери критичних матеріалів і територіальною локалізацією супутніх виробництв. Найголовніші виклики для світової енергетики пов'язані з

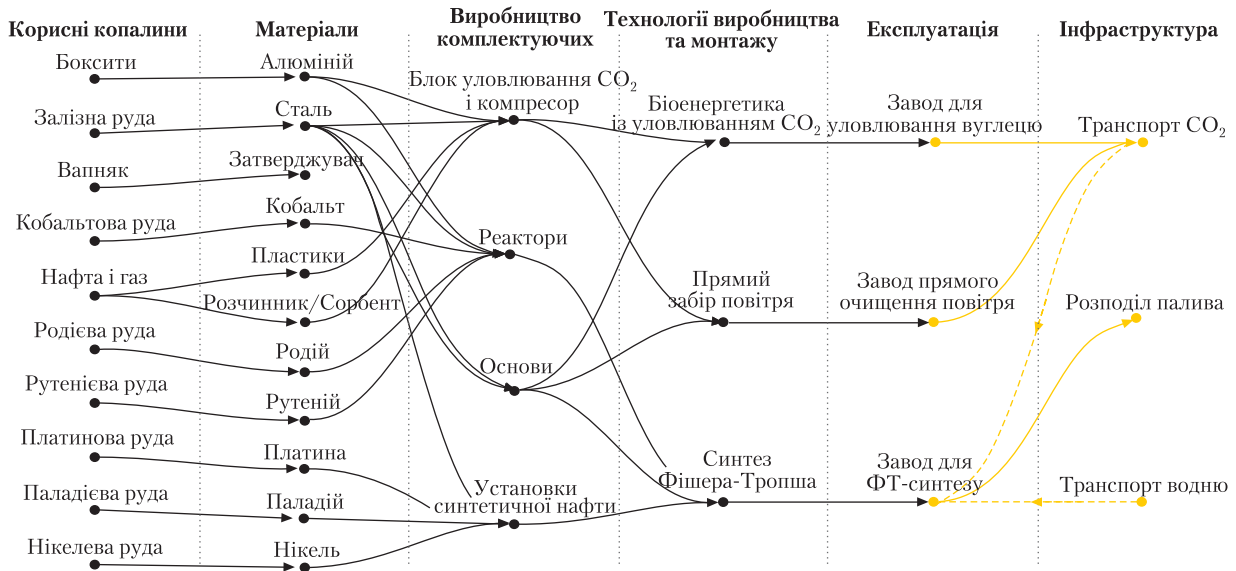


Рис. 9. Ключові елементи для кожного кроку в інженерному ланцюгу виробництва та використання синтетичного вуглеводневого палива з низьким рівнем викидів CO_2

відсутністю диверсифікації виробництв, високою географічною концентрацією видобутку і переробки первинних матеріалів та ресурсів, проявами монополізму в окремих виробництвах і технологіях.

Слід зазначити, що вплив Росії на світовий енергетичний сектор не вичерпується лише нафтою та газом, РФ була найбільшим джерелом імпорту вугілля в Європі, видобуває близько 20 % світового обсягу нікелю (який потрібен для виробництва акумуляторів), володіє понад 40 % світових потужностей зі збагачення урану. Крім того, Росія — другий у світі виробник кобальту та алюмінію, четвертий за обсягами виробник графіту [10].

Світовий попит на вугілля у 2021 р. значно зріс (до 5,64 млрд т вугільного еквіваленту (Mtce)). Це пов'язано з тим, що економіка оговталася після пандемії, а виробництво електроенергії на вугіллі досягло історичного максимуму [20]. І Китай, і Індія збільшили інвестиції у внутрішнє виробництво вугілля, але світове виробництво не встигало за збільшенням попиту, що призвело до різкого зростання цін на вугілля. У 2022 р. глобальне споживання вугілля зросло на 1,2 %, вперше перевищивши

8 млрд т — попередній рекорд, встановлений у 2013 р. У 2023 р. також передбачається незначне зростання світових обсягів видобутку вугілля (рис. 8) [21].

Очевидно, на такі тенденції світової вугільної галузі слід звернути увагу в проєкті Національного плану відновлення України, в якому наразі заплановано істотне скорочення (у 8 разів порівняно з 2019 р.) використання вугілля до 2032 р. І це при тому, що в енергетичному балансі країни частка вугільної електрогенерації суттєва — близько 25 %, включно з вкрай необхідними маневровими потужностями.

Очікується, що критичний попит на корисні копалини, пов'язані з сектором електроенергетики, має зрости з 7 млн т на рік у 2021 р. до 11 млн т у 2030 р. і 13 млн т у 2050 р. Мідь для електромереж, кремій для сонячної фотоелектричної енергії, рідкісноземельні елементи для двигунів вітрових турбін, літій для акумуляторів будуть ключовими матеріалами. Оскільки критично важливі корисні копалини є базовим компонентом ландшафту електроенергетичної безпеки, потрібні додаткові дослідження та розробки, щоб зменшити інтенсивність використання корисних копалин і забезпечити їх

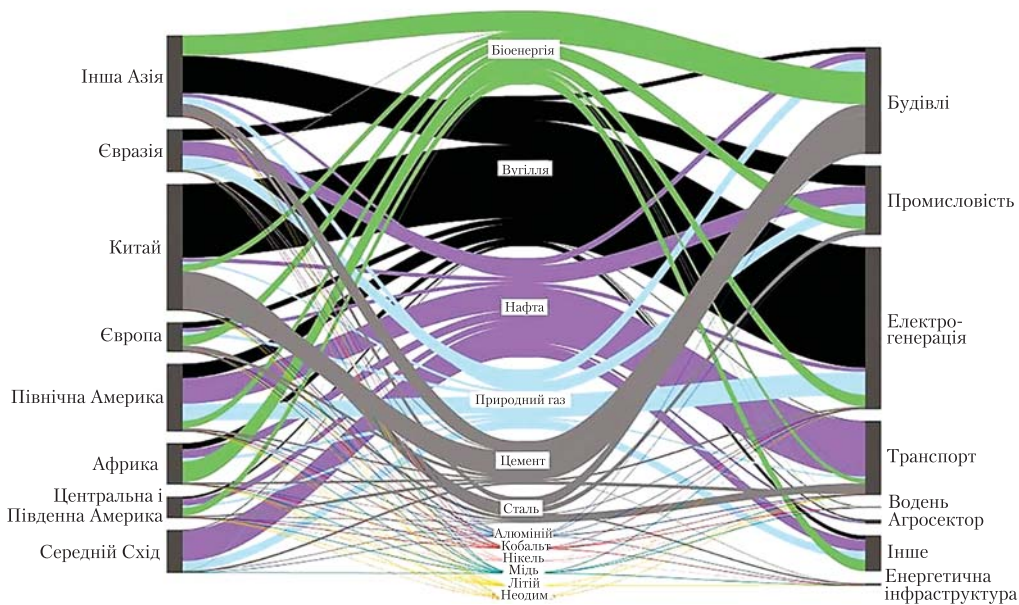


Рис. 10. Глобальна географія енергоресурсів, розподіл енергії за галузями світової економіки станом на 2021 р. та обсяги фізичних масових потоків палива і матеріалів в енергетичній системі (млн т)

заміну в основних сферах застосування, разом із переробкою, повторним використанням акумуляторів електромобілів і заходами з енергоефективності для кінцевих користувачів [22].

Як приклад взаємозв'язку вхідних матеріалів, енергії, устаткування, процесів і технологій на рис. 9 наведено схему виробництва синтетичного рідкого палива і вуглекислого газу. Композиція такої схеми визначається фундаментальними підходами і співвідношеннями енергетичної інженерії. Якщо для процесів і технологій виробництва теплової чи електричної енергії є багато варіантів реалізації, то для моторно-транспортних палив таких альтернатив менше. Тому розроблення перспективних транспортних палив украй важливе для майбутнього. Під низькоемісійним синтетичним паливом розуміють переважно водень, рідкі відновлювані палива біоенергетики та палива, отримані в процесі уловлення, утилізації та зберігання CO₂. Наведена схема є інноваційною, і її вже починають впроваджувати в практику, особливо зважаючи на подорожання рідких палив з викопної нафти. Принагідно зазначимо, що наразі спостерігається активізація робіт з широкого використання аміаку як енергоносія [23].

Рідке синтетичне паливо на основі водню з низьким рівнем викидів є альтернативою на-

фті, однак сьогодні витрати на його виробництво високі, а інфраструктура обмежена. Розгортання нових проєктів протягом наступного десятиліття сприятиме зниженню витрат і підвищенню продуктивності виробництва, а отже, у майбутньому ці види палива зможуть відігравати значну роль. Передбачається, що у 2030 р. за технологією, наведеною на рис. 9, отримуватимуть до 3 млрд л палива на рік, а в 2050 р. — до 110 млрд л.

Щоб досягти безпечності, гнучкості та стійкості такого ланцюга виробництва, потрібен комплексний скоординований підхід. Налагодження виробництва рідких транспортних палив на шляху до нульового рівня викидів парникових газів означає своєчасне вжиття заходів для забезпечення поставок, які можуть пристосовуватися до змін, відновлюватися після короткострокових потрясінь, адаптуватися до довгострокових змін у постачанні, пов'язаних, зокрема, з періодичною нестачею матеріалів, впливами кліматичних змін, стихійних лих, екстремальних станів та з іншими потенційними збоями на ринку.

Ресурси світової енергетики. У 2022 р. світові інвестиції в чисту енергію досягли \$1,4 трлн, що на 10 % більше, ніж у 2021 р., і являє собою 70 %-ве зростання загального

обсягу інвестицій у енергетичний сектор. Незважаючи на цей важливий прогрес, викопне паливо все ще залишається основним — 80 % усіх первинних енергоресурсів (рис. 10) [18]. Зростання постачання чистої енергії з 2000 р. було нижчим, ніж енергії, отриманої з нафти, газу та вугілля, особливо в країнах, що розвиваються. У цих країнах частка викопного палива в загальному обсязі первинної енергії зростає з 77 % у 2000 р. до 80 % у 2021 р., насамперед через збільшення обсягів використання вугілля, які за рік зросли з 27 до 35 %. У розвинених країнах за той самий період частка викопного палива впала з 82 до 77 %. У результаті загальна частка викопного палива в глобальному енергетичному балансі майже не змінилася і перебуває на рівні близько 80 %.

Нафта залишається найбільшим джерелом первинної енергії, її частка в загальному обсязі енергопостачання у 2021 р. становила 29 % (для порівняння: у 2000 р. — 37 %); вугілля — 26 % (у 2000 р. — 23 %); природного газу — 23 % (у 2000 р. — 21 %). Найбільшим джерелом невикопної енергії є біоенергія, на яку в 2021 р. припадало близько 10 % загального споживання первинної енергії, з яких понад третина — це частка традиційної біомаси. Атомна енергія становить 5 % загального обсягу поставок, гідроенергія — близько 2 %, а сонячна та вітрова енергія — лише 2 %. Хоча за останні два десятиліття електрифікація прискорилася, викопне паливо все ще домінує і в кінцевому споживанні енергії, на нього припадає близько 35 % загального споживання енергії в будівлях і 95 % на транспорті.

Перспективи декарбонізації енергетики.

Глобальний перехід до чистої енергії з майже нульовими викидами CO₂ (сценарій чистого нульового викиду до 2050 р. — NZE) найближчим часом має прискоритися завдяки поєднанню енергетичної політики, технологічних та економічних змін. На тлі все більш вражаючих доказів глобальної зміни клімату, сьогодні у світі вже склався консенсус щодо необхідності термінового різкого скорочення викидів парникових газів, що відображається у дедалі амбітніших національних цілях. Глобальна

енергетична криза, яка виникла через війну Росії в Україні, посилила занепокоєння щодо енергетичної безпеки, насамперед постачання традиційних видів палива, таких як нафта та природний газ, і підтвердила необхідність політичної підтримки розвитку чистих енергетичних технологій. Наприкінці листопада 2022 р. 87 країн світу та Європейський Союз оголосили про зобов'язання скоротити до нуля викиди CO₂ ще в цьому столітті. Проголошені цілі охоплюють понад 85 % світових викидів і 85 % світового ВВП. Китай заявив про мету досягти вуглецевої нейтральності до 2060 р., Індія — до 2070 р., Індонезія — до 2060 р. Якщо всі ці амбітні цілі будуть реалізовані вчасно і в повному обсязі, їх буде достатньо, щоб утримати підвищення глобальної температури на рівні приблизно 1,7 °C у 2100 р. [18]. Запорукою цього є закон про скорочення інфляції в США, пакет Fit for 55 і план REPowerEU в ЄС, японська програма «Зелена трансформація», законопроект про зміну клімату в Австралії, схема стимулювання виробництва в Індії. Китай працює над досягненням і навіть перевищенням цілей свого поточного п'ятирічного плану. В 2023 р. Китай планує відновитися після рецесії, пов'язаної з довготривалою в цьому регіоні пандемією COVID-19. Очікуване річне зростання китайського ВВП на 5 % (а ймовірно, й більше) може привести до збільшення використання зрідженого природного газу і, відповідно, підвищення цін на енергетичних ринках Європи.

Останні події свідчать, що надійність постачання електроенергії має ключове значення як для гарантування енергетичної безпеки, так і для реалізації низьковуглецевого переходу, оскільки за сценарієм NZE її частка в кінцевому споживанні має зрости з 20 до 50 %. Мінливість пропозиції та попиту на електроенергію означає, що вимоги до гнучкості будуть посилюватися. Системи електроакумуляції та відповідна реакція з боку попиту стають дедалі важливішими. Тому інвестиції в гнучкість — це новий лозунг безпеки в електроенергетиці.

Декарбонізація енергетики, як це передбачено у сценарії NZE, спирається на вісім

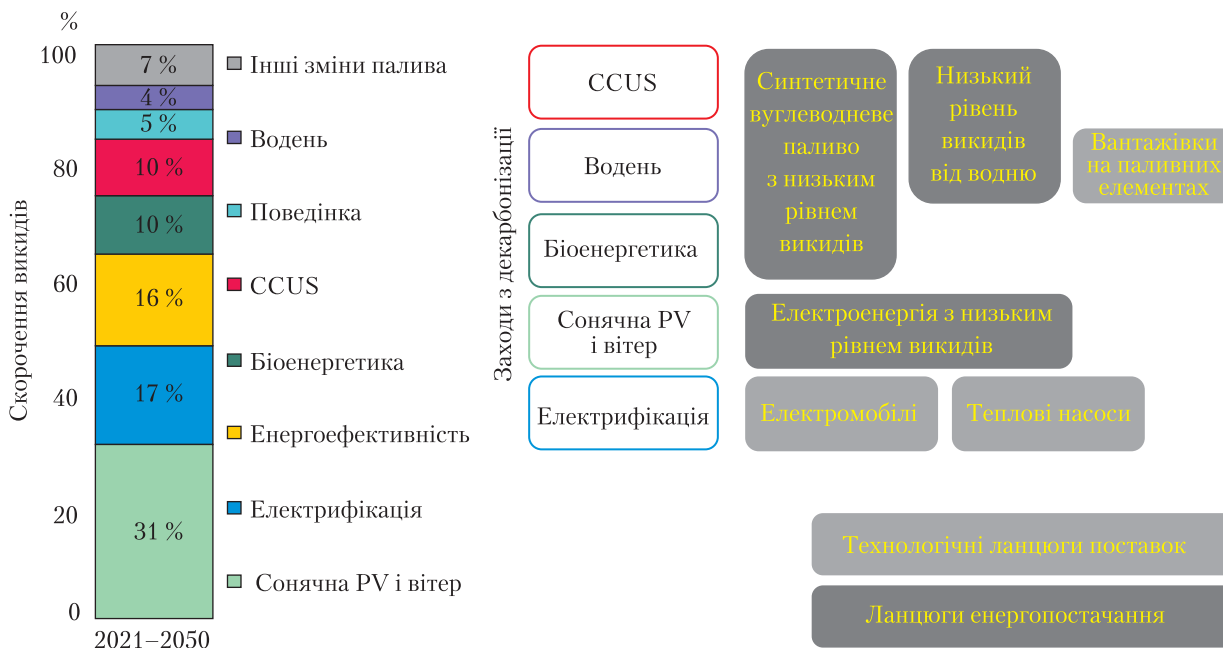


Рис. 11. Глобальне кумулятивне скорочення викидів CO₂ у світовій енергетиці завдяки декарбонізації та ланцюги постачання чистої енергії і технологій [18]

основних чинників: 1) зміна поведінки та зменшення попиту; 2) енергоефективність; 3) використання водню; 4) електрифікація; 5) біоенергетика; 6) вітрова та сонячна енергія; 7) CCUS (carbon capture, utilization and storage) – уловлення, зберігання та використання CO₂; 8) інші види палива (перехід з вугілля та нафти на газ, атомна енергетика, гідроенергетика, геотермальна, концентрована сонячна енергія та морська енергія).

Змінення поведінки та підвищення енергоефективності не потребують фундаментальних змін у наявних енергетичних системах, проте інші складові, на які припадає понад 70 % загального скорочення сукупних викидів протягом 2021–2050 рр., вимагають масового розгортання нових типів обладнання та інфраструктури. Для цього в [18] пропонуються ключові енергетичні технології (рис. 11) – низькоемісійне синтетичне вуглеводневе паливо; низькоемісійний водень; паливні елементи для вантажних автомобілів; низькоемісійна електрогенерація на ВДЕ; теплонасосні технології та електромобілі. Разом ці техноло-

гії можуть забезпечити майже 50 % загального скорочення сукупних викидів. Деякі енергетичні й технологічні ланцюги постачання є специфічними, наприклад електромобілі та теплові насоси, вантажівки на паливних комірках для водню або сонячні фотоелектричні та вітрові агрегати.

«Поведінка» означає зміни попиту на енергетичні послуги внаслідок рішень користувача (наприклад, щодо зміни температури опалення), а також зменшення попиту на енергетичні послуги, зумовлене його зміною у результаті розвитку технологій (наприклад, завдяки цифровізації енергетики).

Основні тренди. За останнє десятиліття стрімко прискорилося впровадження чистих енергетичних технологій і постачання енергії з невикопних джерел, зокрема з відновлюваних джерел енергії. У 2022 р. на відновлювані джерела енергії припадало 30 % світового виробництва електроенергії (у 2010 р. – менш ніж 20 %) з помітним збільшенням виробництва сонячної фотоелектричної, вітрової, гідроенергії та біоенергії [18]. Електрифікація при-

скорюється в усіх секторах кінцевого використання, зокрема у теплозабезпеченні будівель. У сфері транспорту продажі електромобілів у 2022 р. становили понад 10 млн одиниць, або 13 % світового автомобільного ринку, в результаті чого їх загальна кількість на дорогах перевищила 25 млн. У 2021 р. у світі працювало понад 1000 ГВт теплових насосів (у 2010 р. — 500 ГВт), а продажі зросли на 13 % порівняно з 2020 р. Аналіз показує, що світовий ринок ключових екологічно чистих енергетичних технологій до 2030 р. становитиме приблизно \$650 млрд на рік (що більш ніж утричі перевищує сьгоднішній рівень), якщо країни світу повністю виконають проголошені обіцянки щодо енергетики та клімату. Пов'язані з цим робочі місця у виробництві чистої енергії зростуть більш ніж удвічі з 6 млн сьогодні до майже 14 млн до 2030 р. В наступні десятиліття очікується також швидке зростання промисловості та зайнятості.

Оптимальне рішення щодо залучення в енергобаланс різних енергоресурсів і енергоносіїв та технологій енерговикористання полягає не в протиставленні їх одне одному, а в розумному техніко-економічно та екологічно обґрунтованому поєднанні, що потребує поглиблення та розширення наукових основ теорії і практики проведення техніко-економічного аналізу енергетичних технологій з урахуванням сучасних інтелектуальних та інформаційних можливостей в інноваційній цифровій економіці. Безумовно, всі інновації реалізуються на основі фундаментальної інженерії. Особливо важливим у воєнний час є врахування реалій і проведення ретельних розрахунків можливих сценаріїв розвитку енергетики з дотриманням балансу між національними (безпековими, економічними тощо) інтересами і світовою політикою у сфері поліпшення стану довкілля.

Висновки. Попри обґрунтовані побоювання й тривоги осені 2022 р., постійні ракетні атаки та бомбардування дронами, труднощі воєнного часу і велику кількість різних проблем, Україні загалом вдалося пройти опалювальний період 2022/2023 рр. І цей результат був забезпече-

ний героїчними зусиллями газовиків, тепловиків, електриків, працівників ДСНС, транспорту і логістики. Енергетика встояла, хоча й високою ціною — на жаль, були жертви серед ремонтників, експлуатаційного персоналу та інженерного складу, не кажучи вже про пошкоджену та зруйновану інфраструктуру. Знекровлену централізовану електроенергетику доповнили великою кількістю малої електрогенерації, створивши стійку і гнучку систему розподіленої, розосередженої, автономної та індивідуальної генерації. Важливою і своєчасною була допомога демократичного світу. Індивідуально-побутовий сектор у сільській місцевості оперативно й успішно адаптувався до воєнних умов, перейшовши на місцеві види палива, комунальна теплоенергетика і міське населення пристосувалися до переривчастого режиму електропостачання, опалення і гарячого водопостачання. Певною мірою посприяла подоланню цього складного періоду і доволі м'яка зима.

Набутий досвід обов'язково слід урахувати в реалізації нинішньої і повоєнної політики термомодернізації наявних будівель та новобудов, що передбачено в національній програмі відновлення. Зокрема, в нормативно-технічній базі модернізації чи відновлення інженерних систем енергозабезпечення будівель потрібно закласти комплектування системами (поквартирними чи будинковими) електроакумулявання необхідної потужності та ємності, як це вже реалізується в деяких країнах ЄС. Такі power bank-системи забезпечать тимчасове мінімальне електрозабезпечення в аварійних чи екстремальних ситуаціях, а також поліпшать керування навантаженням в ОЕС України.

Стосовно світової енергетики, незважаючи на велику кількість невизначеностей і наявну в ній напруженість, можна зробити деякі узагальнення [24–26].

Спростовано три свідомо і настирливо насаджувані світові міфи. Це твердження, що Росія виграє енергетичну битву; помилкове судження, що нинішня енергетична криза є кризою чистої енергії; наратив про те, що криза знівелює зусилля, спрямовані на боротьбу зі згубними

змінами клімату. Нічого цього не сталося [25]. Глобальна енергетична криза, спричинена війною Росії в Україні, має далекосяжні наслідки для світової економіки, спонукаючи країни до глибшої дискусії щодо способів зменшення ризику майбутніх збоїв і сприяння посиленню енергетичної безпеки. Це глобальна криза, але Європа зараз є головним театром енергетичної битви [25].

Нинішня енергетична криза має певні паралелі з шокowymi коливаннями цін на нафту у 1970-х роках, але тоді основні події розгорталися на нафтових ринках. Сьогодні ж криза має глобальний характер, поширюється на всі види викопного палива і безпосередньо позначається на цінах на електроенергію, що є попереджувальними ознаками її більш широкого економічного впливу [10]. Більше того, фактично вперше енергетику неприховано було використано як зброю у війні. Події 2021–2022 рр. засвідчили, що крім суто енергетичної, ексергетичної і соціальної цінності енергія набуває ще й великої політичної і навіть воєнно-політичної ваги.

Високі ціни на енергоносії спричиняють величезний перетік фінансів від споживачів до виробників, повертаючись до рівнів 2014 р. для нафти, тоді як для природного газу склалася абсолютно безпрецедентна ситуація. Високі ціни на паливо зумовлюють зростання середніх витрат на виробництво електроенергії в усьому світі, і частка природного газу в цьому процесі — понад 50 %. Ціни на нафту перестали бути орієнтиром і критерієм для встановлення цін на газ. Витрати на відновлювані джерела енергії відіграли незначну роль, лише підкреслюючи, що в цій кризі перехід на чисту енергію є не проблемою, а нагальним рішенням.

Залишається велика невизначеність щодо того, як розвиватиметься далі ця енергетична криза, як довго ціни на викопне паливо залишатимуться високими і коли ризику подальшої турбулентності та геополітичної фрагментації в енергетиці стануть меншими.

Криза сприяє короткочасному підвищенню попиту на нафту та вугілля, оскільки споживачі намагаються знайти альтернативу доро-

гому газу, але довготривалі вигоди від кризи матимуть джерела з низьким рівнем викидів, переважно відновлювані джерела енергії, а в деяких випадках і атомна енергетика. Криза також пришвидшує прогрес у сфері енергоефективності та електрифікації. Наприклад, зростання кількості теплових насосів у ЄС сприятиме зниженню попиту на природний газ на 40 % (на 180 млрд м³) в період між 2021 і 2030 рр. Щорічні інвестиції в теплові насоси на рівні \$65 млрд з часом компенсуються меншими витратами на імпорту газу.

Протягом останніх років світ недостатньо інвестував в енергетику, внаслідок чого енергетична система виявилася доволі вразливою до потрясінь. Плавний і безпечний перехід до низьковуглецевої енергетики вимагатиме значного зростання обсягів інвестицій у чисту енергію. Для досягнення сценарію NZE необхідно втричі збільшити витрати на чисту енергію та інфраструктуру до 2030 р. разом зі зрушенням у бік значно більших інвестицій у ринки і економіки, що розвиваються.

Прогнозується, що нинішні надзвичайно високі ціни на викопне паливо зменшаться зі сповільненням економіки та відновленням балансу на ринках, а на ринку природного газу напруження триватиме ще кілька років, оскільки Європа конкурує з Китаєм за доступні обсяги зрідженого газу, щоб компенсувати скорочення поставок з Росії.

Високі й нестабільні ціни на критичні корисні копалини та географічно висококонцентровані ланцюжки поставок можуть затримати перехід на чисту енергію або зробити його дорожчим. Зведення цього ризику до мінімуму потребує розширення та диверсифікації поставок разом із переробкою та іншими заходами, які сприятимуть помірному зростанню попиту.

Гнучкість енергосистеми є наріжним каменем безпеки електроенергетики. Сьогодні вона забезпечується переважно вугіллям, природним газом і гідроенергією, але системи завтрашнього дня все більше покладатимуться на енергоакумуляцію, реагування на попит, біоенергію та інші відновлювані джерела енер-

гії, викопне паливо з уловлюванням вуглецю, а також на водень і аміак.

Наразі світова енергетична криза ще не закінчилася, тому вкрай необхідна консолідація зусиль усього цивілізованого світу для уникнення можливих негативних біфуркацій у подальшому розвитку ситуації, зокрема не-

допущення варіантів і станів, за яких ця криза може перерости в загальносвітову політичну кризу.

Для України важливо враховувати тренди розвитку енергетики світу та Європи і орієнтуватися на децентралізовану і розподілену «зелену» енергетику.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

- Pyrozhkov S.I. About the National Report of the NAS of Ukraine «National resilience of Ukraine: hybrid threats challenge response and prevention strategy». *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2022. (5): 45–55. <https://doi.org/10.15407/visn2022.05.045>
[Пирожков С.І. Про національну доповідь НАН України «Національна стійкість України: стратегія відповіді на виклики та випередження гібридних загроз». *Вісник НАН України.* 2022. № 5. С. 45–55.]
- Heyets V.M. On the assessment of Ukraine's economic losses due to the armed aggression of the Russian Federation. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2022. (5): 30–38. <https://doi.org/10.15407/visn2022.05.030>
[Гець В.М. Про оцінку економічних втрат України внаслідок збройної агресії РФ. *Вісник НАН України.* 2022. № 5. С. 30–38.]
- From the Conference Hall of the Presidium of the NAS of Ukraine, March 30, 2022. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2022. (5): 7–11.
[Із зали засідань Президії НАН України 30 березня 2022 р. *Вісник НАН України.* 2022. № 5. С. 7–11.]
- Kurylenko O.V. Characteristics of the work of the United Power System of Ukraine in synchronous mode with the Continental European Power System. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2022. (5): 39–44. <https://doi.org/10.15407/visn2022.05.039>
[Кириленко О.В. Особливості роботи Об'єднаної енергетичної системи України в синхронному режимі з європейською континентальною енергетичною системою. *Вісник НАН України.* 2022. № 5. С. 39–44.]
- Nosovskyi A.V. On the consequences of the temporary occupation of the Chernobyl Exclusion Zone. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2022. (6): 65–71. <https://doi.org/10.15407/visn2022.06.065>
[Носовський А.В. Щодо наслідків тимчасової окупації території зони відчуження Чорнобильської АЕС. *Вісник НАН України.* 2022. № 6. С. 65–71.]
- Kurylenko O.V., Snezhkin Y.F., Basok B.I., Bazyeev Y.T. Ukraine's energy: probable scenarios of recovery and development. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2022. (9): 22–37. <https://doi.org/10.15407/visn2022.09.022>
[Кириленко О.В., Снежкін Ю.Ф., Басок Б.І., Базєєв Є.Т. Енергетика України: ймовірні сценарії відновлення та розвитку. *Вісник НАН України.* 2022. № 9. С. 22–37.]
- Loktev V.M. Science and victory, or war as a *casus belli* of scientific reform. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2022. (6): 26–39. <https://doi.org/10.15407/visn2022.06.026>
[Локтев В.М. Наука і перемога, або війна як *casus belli* наукових реформ. *Вісник НАН України.* 2022. № 6. С. 26–39.]
- Basok B.I., Bazyeev Ye.T., Kuraieva I.V. Adaptation of municipal heat energy to climate change. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2021. (4): 60–75. <https://doi.org/10.15407/visn2021.04.060>
[Басок Б.І., Базєєв Є.Т., Кураєва І.В. Адаптація комунальної теплоенергетики до змін клімату. *Вісник НАН України.* 2021. № 4. С. 60–75.]
- Basok B.I. The energy sector and environmental pollution. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2022. (3): 30–36. <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.030>
[Басок Б.І. Енергетика і забруднення навколишнього середовища. *Вісник НАН України.* 2022. № 3. С. 30–36.]
- World Energy Outlook. IEA. 2022. <https://bit.ly/3YTEMVR>
- Natural Gas in Europe: The Potential Impact of Disruptions to Supply. International Monetary Fund Working Papers. WP/22/145. <https://bit.ly/40b3aDC>
- Russia's War on Ukraine. Analysing the impacts of Russia's invasion of Ukraine on global energy markets and international energy security. <https://www.iea.org/topics/russias-war-on-ukraine>

13. 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality. COM(2021) 550. 14.7.2021, Brussels. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0550&from=EN>
14. Action plan for implementing REPowerEU. 2022. <https://bit.ly/3lkIBpo>
15. A 10-Point Plan to Reduce the European Union's Reliance on Russian Natural Gas. <https://bit.ly/42i713E>
16. IEA and Ukraine deepen bilateral cooperation with new joint work programme. <https://bit.ly/3FAqlzh>
17. Digitalising the energy system - EU action plan (COM(2022) 552 final). <https://bit.ly/402aWjG>
18. Energy Technology Perspectives (IEA 2023). <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives>
19. Global Energy Crisis. IEA. 2022. <https://www.iea.org/topics/global-energy-crisis>
20. Outlook for solid fuels. <https://bit.ly/3YQG448>
21. Coal 2022. Analysis and forecast to 2025. December 2022. IEA. <https://bit.ly/3mW51hb>
22. Outlook for electricity. IEA. 2022. <https://bit.ly/3n3BuIE>
23. Akaev A.A. Technological and economic barriers to the growth of hydrogen energy. *Vestnik RAN*. 2022. (12): 1113–1144. <https://doi.org/10.31857/S0869587322100024>
[Акаев А.А. Технологические и экономические барьеры роста водородной энергетики. *Вестник РАН*. 2022. № 12. С. 1113–1144.]
24. Birol F. Where things stand in the global energy crisis one year on. <https://bit.ly/40dRAHO>
25. World Energy Outlook 2022. Key findings. <https://bit.ly/3YTqxAp>
26. World Energy Outlook 2022. The global energy crisis. <https://bit.ly/40mQiul>

Olexandr V. Kyrylenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3610-7670>

Yuriy F. Snezhkin

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9049-3392>

Boris I. Basok

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8935-4248>

Yevgeniy T. Baseyev

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4292-1505>

ENERGY, SCIENCE AND ENGINEERING: CURRENT STATE AND DEVELOPMENT CHALLENGES

An overview of energy problems of Ukraine, Europe and the world is presented. The challenges and risks faced by the socio-economic sphere of the country, in particular in the field of energy, as well as by the academic fundamental science as a result of Russian aggression, are analyzed. The role of science as the intellectual basis of the socio-economic, political and military power of the state is emphasized. It is noted that the Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine is developing a new scientific direction – fundamental energy engineering. The main trends of energy development in Europe and the world are considered in the context of economic threats, price policy, resource base, energy conversion technologies and final low-carbon energy use. Attention is focused on the beginning of the global energy crisis in the world, and approaches to mitigating its negative impact on the world economy are proposed.

Keywords: energy, global energy crisis, energy flexibility and sustainability, clean energy, fundamental energy engineering.

Cite this article: Kyrylenko O.V., Snezhkin Y.F., Basok B.I., Baseyev Ye.T. Energy, science and engineering: current state and development challenges. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. (4): 3–20. <https://doi.org/10.15407/visn2023.04.003>