

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 620.92

Підвищення ефективності методів акумулювання енергії відновлювальних джерел

Б. В. Косой¹, Б. Г. Грудка²✉, О. В. Зімін³

¹⁻³Одеська національна академія харчових технологій, вул. Дворянська, 1/3, Одеса, 65082, Україна

✉ e-mail: ²bogdangennadievich@gmail.com

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0001-5353-8881>; ²<https://orcid.org/0000-0003-1200-5442>;

³<https://orcid.org/0000-0001-9053-3262>

У даний час зростає інтерес до відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Незважаючи на це, в енергетичних системах високої продуктивності переважно використовуються вугілля, нафта, природний газ, а також енергія, що виробляється гідроелектростанціями та атомними електростанціями. Перші три джерела сформували так звану вуглецеву енергетику, якій притаманні два основні недоліки: обмеженість ресурсів та збільшення викидів CO₂ у навколишнє середовище, незважаючи на вимоги Кіотського протоколу. Більшість ВДЕ характеризуються нерівномірним виробництвом та споживанням енергії, тому необхідно забезпечувати також її зберігання. Можна зауважити, що чим більше виробляється електроенергії вітру і сонця, тим сильніше виявляється потреба в системах накопичення і зберігання цього виду енергії. Сприятливим фактором для впровадження ВДЕ при цьому є різке зниження вартості одиниці встановленої потужності, яка включає в себе експлуатаційні і капітальні витрати. У статті розглядаються відносно нові типи ВДЕ, які дають змогу зберігати енергію у вигляді води (PSHE), компримованого повітря (CAES) та криогенних рідин – повітря та азот (CES). За допомогою цього способу можна реалізовувати всі процеси виробництва, розподілу, зберігання та застосування електричної енергії у різні періоди часу. Розглянуто питання створення ефективного обладнання для тривалого зберігання тепла, що виробляється з електроенергії, яка виробляється сонячними панелями та вітрогенераторами. Тепло, яке отримується у такий спосіб, можна довго зберігати у теплоізольованих контейнерах, що заповнюються базальтовою крихтою. Актуальність цих досліджень підтверджується міжнародним енергетичним агентством: «ВДЕ вже є другим за величиною джерелом електроенергії у світі, але їх використання все ще необхідно прискорювати, якщо ми хочемо досягти довгострокових цілей у галузі клімату, якості повітря та доступу до енергії».

Ключові слова: Енергія; Відновлювальні джерела енергії; Сонячна енергія; Енергія вітру; Криогенні рідини; Базальтова крихта

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v57i3.2168>

© The Author(s) 2021. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Вступ

В останні роки спостерігається зростання інтересу до відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Ці джерела є альтернативою так званій вуглецевій енергетиці. В енергетичних системах високої продуктивності переважно використовуються вугілля,

нафта, природний газ, а також енергія, що виробляється гідроелектростанціями та атомними електростанціями. Запасена в них хімічна енергія була накопичена протягом тисячоліть. Дані з видобутку та використання цих ресурсів показують, що у найближчі століття вони будуть вичерпані.

Академік П.Л. Капіца розглянув закономір-

ності, що визначають розвиток енергетики великих потужностей та пов'язані з існуванням у природі обмежень для щільності потоку енергії [1]. У матеріальному середовищі щільність потоку енергії E характеризується таким виразом:

$$E < v \cdot F,$$

де v – швидкість поширення деформації, зазвичай рівна швидкості звуку; F – щільність енергії, яка є вектором. Його у 1874 р. запропонував використувати до розгляду процесів перетворення енергії відомий фізик М.О. Умов. Десятьма роками пізніше такий самий вектор для опису енергетичних процесів в електромагнітному полі став застосовувати Дж. Пойнтінг. Тому його прийнято називати вектором Умова-Пойнтінга.

Використовуючи вектор Умова-Пойнтінга, П.Л. Капіца проаналізував ще 1975 року можливість того чи іншого виду енергії для великотоннажного її виробництва. Результати дослідження було викладено їм у його доповіді «Енергія та фізика», присвяченій 250-річчю Академії наук СРСР [1]. Дуже важливим у доповіді виявився висновок про те, що в енергетиці великих потужностей доводиться відмовлятися від низки ефективних процесів трансформації енергії. У ті роки він критично розглядав методи генерування енергії, яка у минулому запасена в паливі різного виду. Незважаючи на те, що у доповіді основна увага приділялася атомній та термоядерній енергетиці, також розглядалося виробництво та використання такого виду відновлювальної енергії, як сонячна. Вважалося, що можливе пряме перетворення сонячної енергії на електричну та механічну. Виконані тоді розрахунки показали, що потужність, яка знімається з одного квадратного метра освітленої Сонцем поверхні, в середньому не перевищує 100 Вт. Це означає, що для виробництва 100 МВт потрібно знімати електроенергію з площі один квадратний кілометр. У зв'язку з цим П.Л. Капіца заявив, що пряме використання сонячної енергії у великих масштабах нереальне. Хоча він при цьому зазначив, що для підвищення ефективності виробництва сонячної енергії слід досягати значного зниження витрат.

Це стало можливим уже зараз. З рис. 1 можна помітити, що вартість одиниці встановленої потужності, яка включає і експлуатаційні, і капітальні її витрати, за понад 45 років зменшилася майже в 250 разів. Все це вказує на те, що вже зараз мож-

на займатися створенням економічних сонячних установок середньої продуктивності (~100 МВт).

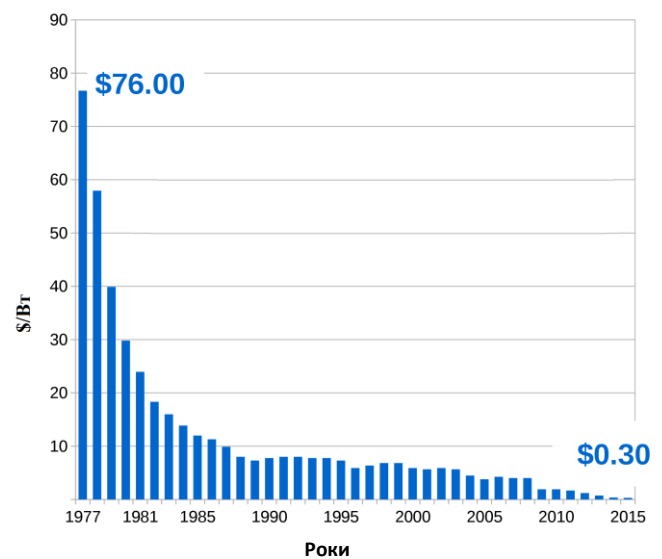


Рисунок 1 – Зменшення вартості одиниці встановленої потужності упродовж 1977-2015 рр.

Що ж до установок, які використовують вуглецеве паливо, їм притаманні два основних недоліки: обмеженість ресурсів, на що вказував П.Л. Капіца, і зростання викидів CO_2 в довкілля, незважаючи на вимоги Кіотського протоколу.

Більшість ВДЕ характеризуються нерівномірним виробництвом та споживанням енергії, тому необхідно забезпечувати також і зберігання енергії. Найбільш освоєно ВДЕ, в яких використовується енергія сонця або вітру [2-4]. Для стимулювання впровадження ВДЕ цього ряду, поперше, удосконалюють створюване обладнання за одночасного зниження його вартості, по-друге, відносять його до «зеленої» енергетики, у зв'язку з чим встановлюють високі тарифи на придбання такої енергії у її виробників.

Можна зауважити, що чим більше виробляється електроенергії вітру та сонця, тим сильніше виявляється потреба у системах накопичення енергії цих видів. Цей взаємозв'язок є невід'ємним у зв'язку з нестабільною погодозалежною генерацією сонячної та вітрової енергії. На підтвердження зростання відновлювальних джерел енергії наведено дані Міжнародного енергетичного агентства (МЕА). Загальна потужність ВДЕ зростає на 1,2 ТВт до 2024 року. Минулого року вона становила 2,5 ТВт у всьому світі, що еквівалентно загальній встановленій поточній потужності електроустановок у США. Причому на частку сонячної енергетики припадатиме майже 60% цього зростання, на вітрову – 25 %. Очікується, що частка

ВДЕ у виробництві електроенергії зросте до 30% у 2024 році, на даний момент – 26%.

Підтвердженням цього є висловлювання Фатіфа Біроля – виконавчого директора МЕА: «ВДЕ вже є другим за величиною джерелом електроенергії у світі, але їх використання все ще необхідно прискорювати, якщо ми хочемо досягти довгострокових цілей у сфері клімату, якості повітря та доступу до енергії».

У статті розглянемо відносно новий тип ВДЕ, у якому застосовуються криогенні рідини (повітря чи азот) [5]. За допомогою цього способу можна досить успішно реалізувати всі процеси виробництва, розподілу, зберігання та застосування електричної енергії у різні періоди часу.

Торкнемося також питань створення ефективного обладнання для тривалого зберігання тепла, що виробляється з електроенергії, яка виробляється сонячними панелями та вітрогенераторами. Тепло, яке отримується у такий спосіб, можна довго зберігати в теплоізольованих контейнерах, що заповнюються базальтовою крихтою [6].

2. Успіхи у розвитку «CES»-технологій

В даний час стрімко розвивається технологія акумулювання енергії у вигляді криогенної рідини «CES» (Cryogenic Energy Storage) [7-9]. Вона побудована на застосуванні рідкого азоту або повітря. У зв'язку з цим цю технологію іноді називають «LAES» (Liquid Air Energy Storage).

Повітря може бути отримане в рідкому стані шляхом охолодження його приблизно до 77 К (-196 °С) з використанням стандартного промислового обладнання. При реалізації зворотного процесу та підведення теплоти до 1 м³ рідкого повітря з нього утворюється близько 700 м³ газоподібного повітря. Розширення отриманого повітря може бути корисно використане в турбіні для роботи. Так як температура кипіння рідкого повітря істотно нижча за температуру навколишнього середовища, то відносно просто можна забезпечити теплом регазифікацію рідкого повітря. Крім цього, для підвищення ефективності виконання роботи при регазифікації рідкого повітря доцільно використовувати вторинне низькопотенційне тепло, що утворюється в результаті реалізації інших технологій.

Акумулювання енергії за допомогою «CES»-установок дає можливість вирішувати ряд завдань, пов'язаних із змінним у часі споживанням енергії в

періоди, коли попит на неї вищий за можливості енергетики. Така залежність має не лише сезонний характер, зумовлений тим, що попит на електричну та теплову енергію, як правило, у зимові місяці вищий, ніж влітку.

Створення акумулюючих енергетичних станцій дасть можливість покращити і споживання електричної енергії як у масштабі країни, міста, так і в структурі великих промислових підприємств. Це також дозволить таким структурам бути самодостатніми у виборі енергетичного джерела та управління його потенціалом.

Принцип акумулювання енергії полягає у переведенні однієї форми енергії (первинної) в іншу (вторинну) з подальшим перетворенням останньої (відновленням) в електроенергію у необхідний період часу. До енергії відноситимемо як власне електроенергію, так і теплоту або холод, які за певних обставин можуть бути ціннішими за вироблену електроенергію.

При реалізації криогенних процесів велика кількість холоду втрачається через теплоприпливи крізь ізоляцію, а також внаслідок неефективних процесів теплообміну. Значними виявляються втрати теплоти, спричинені недосконалістю генерації електроенергії. У зв'язку з цим процеси переведення одного виду енергії в іншу взаємопов'язані та характеризуються певною ефективністю. Причому, чим вищий коефіцієнт перетворення енергії, тим ефективніше працює система.

Організація зберігання енергії у «CES»-установках не лише дозволить вирішити проблему «використання електроенергії не в той час», а й підвищити продуктивність системи електрозабезпечення об'єктів загалом.

Одним із важливих показників, що характеризують роботу систем зберігання енергії «CES», є кількість виробленої електроенергії та період часу, протягом якого вона може нею вироблятися. У зв'язку з цим використовується показник «встановлена потужність / вироблена енергія», який, наприклад, записується у вигляді «40кВт / 400кВт·год». З цього подання випливає, що система зберігання енергії «CES» здатна забезпечити споживача потужністю в кількості 40 кВт протягом 10 год. При цьому споживач отримує її в кількості 400 кВт·год.

Слід зазначити, що попит на електроенергію постійно змінюється і неможливо створити одну універсальну глобальну систему зберігання енергії, оскільки вона повинна постачати енергію від

кількох кВт-год до кількох ТВт-год залежно від об'єкта споживання. Це вказує на те, що одночасно повинні розроблятися і застосовуватися різні технології та системи зберігання енергії [20-21], що задовольняють попиту, який постійно зростає на неї.

Розглянемо та проаналізуємо різні технології зберігання енергії та оцінимо ефективність їх роботи.

2.1. Технології зберігання енергії

2.1.1. Зберігання енергії та її виробництво за допомогою гідроакumuлюючих ГЕС

Зберігання енергії за допомогою гідроакumuлюючих ГЕС («PSHE» – Pumped-storage hydroelectric) на сьогоднішній день найбільш відоме. Технологія «PSHE» передбачає зберігання деякого об'єму води у верхньому резервуарі, у який вона перекачується з іншого резервуара, розташованого на нижчому рівні (рис. 2).



Рисунок 2 – Принципова схема гідроакumuлюючої ГЕС

Під час періодів високого попиту на електроенергію потужність генерується шляхом вивільнення води, що зберігається через турбіни таким же чином, як здійснюється робота звичайної ГЕС.

У періоди низького попиту на електроенергію, коли її виробляють у надлишку чи доступна дешева електроенергія, обумовлена низькими тарифами, верхній резервуар наповнюють водою.

Звичайно, при реалізації таких процесів втрачається енергія неминучі. Але цей спосіб гідроакumuлювання енергії має відносно високий коефіцієнт перетворення електроенергії, що перевищує 80%. Крім цього, дана технологія є добре перевіреною,

надійною та доступною, а також має найвищий потенціал зберігання енергії. У світі станом на 2009 рік гідроакumuлюючими ГЕС вироблялося понад 100 ГВт електричної потужності. Хоча стосовно споживаної електроенергії ця величина становить не більше 2%, що свідчить про малий обсяг рекуперованої енергії.

До переваг «PSHE»-систем зберігання енергії можна віднести не тільки їх відносно високий коефіцієнт перетворення енергії. Важливим їх показником є можливість великомасштабного зберігання енергії при використанні води в якості робочого середовища. Недоліком є потреба в пошуку гірських районів для того, щоб створити відповідний перепад висот і мати водосховище великої місткості. Це зумовлює високі проектні та капітальні витрати при створенні гідроакumuлюючих ГЕС.

2.1.2. Зберігання енергії у вигляді компримованого повітря

Зберігання енергії у вигляді компримованого повітря (CAES – Compressed Air Energy Storage) здійснюється в період наявності надлишкової енергії для стиснення атмосферного повітря до певного тиску і потім подальшого зберігання його, як правило, в підземних печерах під тиском 70 бар. У період, коли попит на електроенергію збільшується, стиснене повітря відбирається зі сховища назад і розширюється в турбінах, генеруючи при цьому електроенергію (рис. 3).

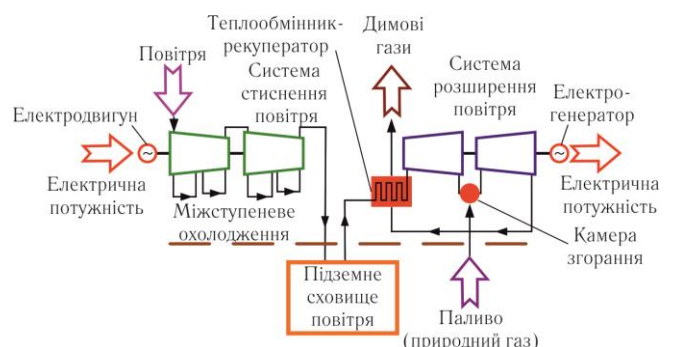


Рисунок 3 – Принципова схема зберігання енергії у вигляді компримованого повітря у підземних сховищах

Підземні системи зберігання «CAES» є найбільш економічно ефективними з емністю для зберігання повітря, еквівалентною виробництву до 10 ГВт-год електричної потужності. Створення наземних сховищ повітря, по-перше, дорожче, по-друге, обмежене місткістю судин високого тиску.

Граничне наземне сховище має ємність, еквівалентну виробництву близько 60 МВт·год електричної енергії.

Існують два діючі сховища першого покоління «CAES»: одне – у Huntorf (Німеччина) потужністю 110 МВт, здатне працювати протягом 26 год і видавати споживачу електричну енергію в кількості 2860 кВт·год, інше – у McIntosh (Alabama, США) потужністю 290 МВт, розраховане працювати протягом 3 год для виробництва 870 кВт·год енергії [12].

Основним недоліком системи «CAES» є необхідність відведення та підведення значної кількості тепла в процесах компримування та подальшого розширення повітря, які в часі не збігаються. Для цього в системі стиснення передбачено міжступеневе охолодження турбокомпресорів, а в системі розширення — камера згорання і рекуператор тепла викидних димових газів, які дозволяють підвищити ефективність генерування енергії (рис. 3).

Однак втрати тепла при стисненні повітря можна компенсувати, якщо їх безпосередньо передавати повітрю високого тиску перед його розширенням. Для цього розробляються термічні сховища для акумулювання тепла, яке зберігається окремо з подальшим використанням для нагрівання повітря перед турбінами. Це дозволяє знизити витрати природного газу і, відповідно, емісію CO₂ у довкілля на 40...60 %. Ефективність перетворення енергії за допомогою «CAES»-систем становить 42%, а за наявності додаткового термічного сховища – 55%.

Міжнародний консорціум на чолі з німецькою енергетичною компанією RWE працює над створенням адіабатної системи зберігання енергії, яка дозволить повністю відмовитися від використання природного газу для нагрівання повітря. Такий проект «CAES» отримав назву «ADELE» (der Adiabate Druckluftspeicher fuer die ELEktrizitatsversorgung). У 2018 році компанія ввела в експлуатацію експериментальну «CAES»-установку типу «ADELE», ефективність перетворення енергії в якій знаходиться на рівні 70%.

До переваг «CAES»-систем можна віднести наявність накопиченого досвіду роботи, загальнодоступність робочого тіла, яким є повітря, стандартність матеріалів і турбомашин. До недоліків – наявність великих підземних геологічних формацій або соляних шахт у місцях безпосередньої близькості від споживачів електроенергії, що не

завжди можливо, а також відносно низький коефіцієнт перетворення енергії 42%.

2.1.3. Зберігання енергії у вигляді криогенної рідини

Технологія зберігання енергії у вигляді криогенної рідини отримала назву «CES» (Cryogenic Energy Storage). Як криогенну рідину в системах «CES» використовують рідке повітря або азот, які можуть зберігатися у великих обсягах при атмосферному тиску [13]. Для отримання повітря у рідкому вигляді необхідно його скраплювати при криогенних температурах. У зв'язку з цим цю технологію іноді називають «LAES» (Liquid Air Energy Storage). Унікальність такої системи полягає в тому, що для регазифікації зрідженого повітря можна використовувати низькопотенційне тепло, що утворюється під час реалізації спільних процесів, тим самим підвищуючи ефективність перетворення енергії.

Технологія «CES» базується на застосуванні відомих стандартних матеріалів, машин та процесів, що реалізуються в енергетиці, газовій промисловості та криогенній техніці, особливо при створенні повітророздільних установок.

Як приклад для демонстрації роботи «CES»-системи можна навести установку компанії Highview Power Storage (рис. 4), розташовану в Slough (Великобританія) з параметрами 300 кВт / 2,5 МВт·год, яка експлуатується з 2011 р.



Рисунок 4 – Зовнішній вигляд «CES»-установки компанії Highview Power Storage

Перша промислова установка показала добрі результати під час випробувань. Протягом 2,5 хв установка могла повністю виходити на робочий режим для додаткової кількості електроенергії за

рахунок регазифікації та розширення рідкого повітря. Це випробування підтвердило потенційні можливості установки з накопичення та швидкого повернення енергії. Установка може видавати зовнішньому споживачу 300 кВт електричної енергії протягом 8 годин роботи. Ефективність перетворення енергії у такій установці становить 60 %.

Крім існуючої установки компанією у Viridor (Великобританія) реалізується новий демонстраційний проект «CES»-установки з параметрами 5 МВт / 15 МВт·год. Задля її роботи необхідно виробляти 300 т/добу рідкого повітря.

Коротко розглянемо основні етапи, що реалізуються в «CES»-установках (рис. 5).

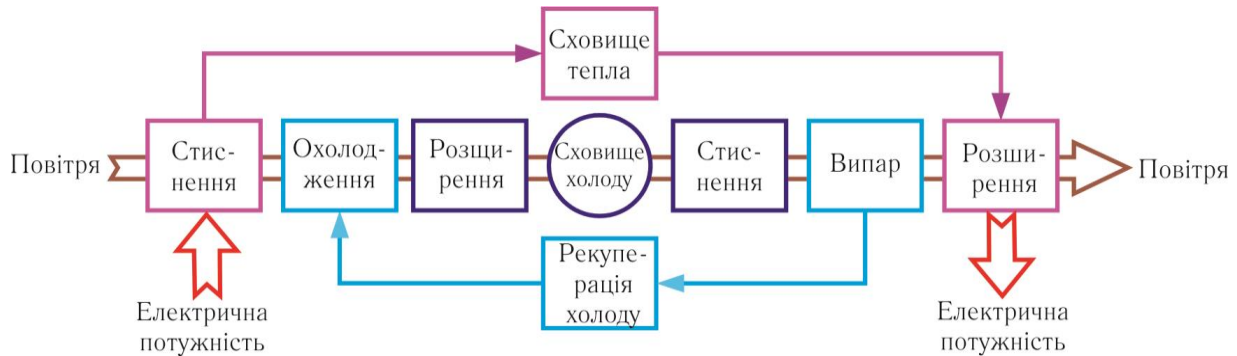


Рисунок 5 – Принципова схема «CES»-установки

Перший – заповнення криогенного сховища рідким повітрям. Для цього використовується зріджувач повітря (рис. 6), який входить у роботу тоді, коли з'являється надлишок виробленої електроенергії, тобто у не піковий період часу. Повітря з довілля попередньо очищають, стискають і охолоджують за рахунок часткового його розширення в турбодетандері. Після цього повітря дроселюють в сепаратор, з якого рідке повітря, що утворилося, відводиться в сховище, а пари повертаються на всмоктування в компресор. Зберігати енергію у вигляді рідкого повітря в 4...6 разів вигідніше порівняно із зберіганням її у вигляді компримованого повітря при тиску 200 бар.

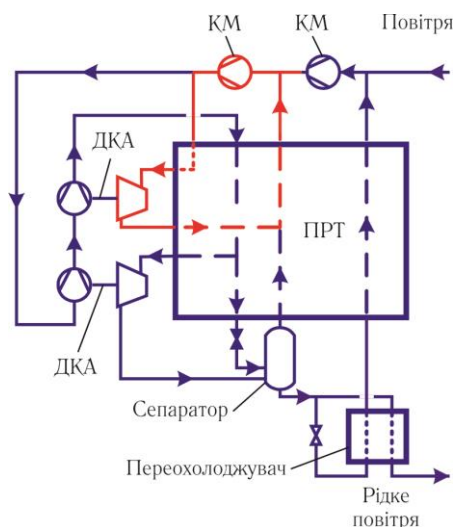


Рисунок 6 – Схема зріджувача повітря:

КМ – компресори; ДКА – детандерно-компресорні агрегати; ПРТ – пластинчасторебристий теплообмінник

Другий – зберігання рідкого повітря. З цією метою використовують два типи криогенних сховищ. До першого відносяться горизонтальні або вертикальні ємності з вакуумною ізоляцією, до другого – плоскодонні резервуари з великою місткістю. Перевага ємностей з вакуумною ізоляцією – можливість їх експлуатації при будь-якому тиску, який потрібний для технології. Однак економічна доцільність створення баз зберігання криогенних рідин на основі ємностей із вакуумною ізоляцією обмежена об'ємом не більше ніж 300 м³.

Для зберігання рідких криопродуктів у кількості, що перевищує 500 м³, застосовуються плоскодонні резервуари з перлітовою ізоляцією, які працюють при тиску, що відрізняється від атмосферного лише на 30...100 мбар.

Втрати криопродуктів від випаровування у таких сховищах становлять 0,1...0,2 % на добу. У великих резервуарах випаровуваність може бути менше 0,1% (наприклад, 0,07%).

Криогенні сховища великого обсягу широко використовуються для зберігання рідких ЗПГ, азоту та кисню. Резервуарний парк сховищ має місткість по рідких продуктах від 2 до 100 тис. т, що еквівалентно збереженій електричній потужності у кількості від 200 МВт·год до 10 ГВт·год.

Третій етап – вилучення рідкого повітря зі сховищ. У період часу, коли спостерігається підвищений попит на електроенергію, рідке повітря (азот) подається зі сховищ за допомогою насосів, що стискають його до високих тисків, після чого газифікується за рахунок теплоти нав-

колишнього середовища. Після цього повітря розширюється в турбодетандерах, які оснащені електрогенераторами. В результаті виробляється електрична енергія, яка видається споживачу.

Четвертий — пов'язаний із підвищенням ефективності роботи «CES»-установки. Для цього холод регазифікації рідкого повітря, що отримується на третьому етапі, корисно використовується для охолодження та зрідження повітря на першому етапі в зріджувачі повітря. Це знижує енергоспоживання у процесі зрідження повітря. Крім цього, рекуперація низькопотенційного тепла (~120 °C) на стадії компримування повітря (перший етап), що використовується для підігріву повітря високого тиску перед енергетичними тур-

бінами (третій етап), дозволяє збільшити кількість електроенергії, що виробляється. Завдяки інтеграції теплових потоків в «CES»-установці ефективність перетворення енергії в ній може досягати 60 ... 70%.

2.2. Порівняння і оцінка різних систем акумулювання енергії

Інтерес викликає економічна складова різних систем зберігання енергії, що становить оцінку вартості капітальних витрат за встановлені потужності і виробництво 1 кВт·год електричної енергії [14-19]. У таблиці наводяться орієнтовні дані лише по основним системам зберігання енергії.

Орієнтовні витрати на створення систем зберігання енергії

Система зберігання енергії	Вартість		Ефективність %
	US \$/кВт	US \$/кВт·год	
«PHES»	1500 ... 4300	250...430	76...85
«CAES» (підземна)	1000 ... 1250	60...125	42...48
«CAES» (наземна)	1950 ... 2150	390...430	46...55
«CES» («LAES»)	900...2000	260 ... 530	60...70

З таблиці видно, що за однакової вартості виробленої електричної потужності в діапазоні 250...530 US \$/кВт·год, капітальні витрати на будівництво «CES»-установки будуть вдвічі нижчими порівняно з «PHES»-установкою. Крім цього, за ефективністю виробництва електроенергії «CES»-установки посідають друге місце після «PHES»-установок, що зумовлює широке їх застосування.

Основним недоліком «LAES»-технології, що ґрунтується на використанні рідкого повітря, є можливість його збагачення киснем у період тривалого зберігання. Однак у разі відносно коротких періодів накопичення та споживання рідке повітря безпечно. Один із недоліків рідкого азоту в порівнянні з рідким повітрям – непридатність його для дихання людини. Тому потрібен постійний моніторинг газового середовища у замкнутих приміщеннях.

Перевага криогенних систем акумулювання енергії – відсутність викидів в атмосферу таких шкідливих речовин, як CO₂, NO_x та SO_x. Що ж до системи «електростанція — «LAES», то емісія цих газів зменшується завдяки тому, що споживання електроенергії здійснюється в період зниженого на неї попиту. Найбільш перспективним напрямом створення екологічно чистих систем є використання енергії вітру (вітрогенераторів) для приводу

«LAES»-установок.

Слід зазначити, що для розміщення «LAES»-установки потужністю 10 МВт потрібна площа близько 4000 м². Крім цього «LAES»-установка має у своєму складі обладнання (холодний блок), яке має високі габаритні розміри. У зв'язку з цим нині технічно та економічно виправданим є застосування «LAES»-установок потужністю 3 МВт і менше. Однак меншої продуктивності поки що досягти не вдається, тому що потрібна розробка повітряних зріджувачів малої продуктивності, що в свою чергу призведе до більших питомих енерговитрат і більш низької ефективності їх роботи.

Найбільш перспективним напрямком є інтеграція «LAES»-установок до складу енергетичних комплексів або терміналів прийому та використання зрідженого природного газу (ЗПГ) [20]. У першому випадку буде корисно утилізуватися низькопотенційна теплота димових газів, у другому — холод регазифікації ЗПГ.

На основі технології «CES» («LAES») вже зараз можна створювати так звану криогенну віртуальну трубу, що дозволяє розширити застосування «LAES»-установок як резервних генераторів енергії. В даному випадку в комплект постачання установки буде входити лише резервуар зберігання, теплообмінник та генератор, тобто без модуля

зрідження повітря. Рідке повітря або азот можуть бути доставлені кріогенними напівпричепами від виробників. Таке резервування енергії призначене для тих випадків, коли генератор планується використовувати надто рідко. У зв'язку з цим купівля кріогенного зріджувача у складі установки є економічно недоцільною.

Крім дизельних і газових генераторів «CES»-установки можуть використовуватися багатьма компаніями для забезпечення резервування енергії та споживання її в короткі проміжки часу при відключенні електроживлення або сплеску попиту на електроенергію. Таке застосування «CES»-генераторів отримало назву «STOR» (Short Term Operating Reserve). Перевагою таких систем є те, що при генеруванні енергії відсутні викиди CO₂ у навколишнє середовище.

3. Електротермічні накопювачі енергії

Розробки, що виконуються зараз, показують, що інноваційні технології дають можливість економічно зберігати великі обсяги енергії, домагаючись ефективного поділу в часі її виробництва та використання. З цією метою унікальний проект реалізує в Німеччині компанія Siemens Gamesa Renewable Energy (SGRE). Вперше у світі фахівці «SGRE» розпочали експлуатацію створеної ними системи накопичення електричної та теплової енергії «ETES» (Electric Thermal Energy Storage).

Створена компанією «Siemens» теплова енергонакопичувальна система вміщує близько 1000 т вулканічної породи, яка є середовищем, що накопичує тепло. Система живиться електричною енергією, трансформованою в гаряче повітря, яке за допомогою резистивного нагрівача та повітродувки нагріває породу до 750 °С. Коли попит на електроенергію досягає піку, система запускає парову турбіну для реелектрифікації теплової енергії, що зберігається.

Пілотна система, споруджена «Siemens», дозволяє накопичувати до 130 МВт·год енергії на тиждень. Як показали дослідження характеристик системи, сміність сховища залишається незмінною незалежно від кількості циклів закачування та використання енергії, на відміну від інших акумуляючих технологій. Розробники найближчим часом планують розвинути систему накопичення енергії в обсязі кількох гігаватів годин.

На рис. 7 показаний загальний вигляд «ETES» (без теплоізоляції та магматичної породи). Надпис

на корпусі системи, що зберігає енергію в камені, говорить: «Ласкаво просимо до нового кам'яного століття».



Рисунок 7 – «Ласкаво просимо до нового кам'яного віку». Це надпис на корпусі установки, який зберігатиме енергію в камені, а точніше – у магматичних породах.

«Siemens Energy», – підрозділ німецького промислового гіганта «Siemens», – оголосив про довгострокове партнерство з норвезькою технологічною компанією «Energy Nest». Стартап «Energy Nest» є розробником систем накопичення енергії (СНЕ) у вигляді високотемпературного тепла.

Нове партнерство утворене з метою спільного створення модульних та стандартизованих систем зберігання енергії для промислових споживачів, які використовують тепло. Накопичувачі енергії можуть заряджатися за рахунок відновлювальної енергії або відпрацьованого побічного тепла. Крім цього, їх цілком можливо застосовувати для видачі пари, що повністю відновлюється, на підприємствах замовників. Таким чином, накопичувачі будуть знижувати потребу в викопному паливі для виробництва тепла, з одного боку, і підвищувати гнучкість енергетичної системи, з іншого.

«Energy Nest» вже має два комерційні проекти: накопичувач енергії для італійської енергетичної компанії «Eni SpA»; система перетворення відпрацьованого тепла на первинну енергію для австрійського виробника цеглини «Senftenbacher». Ще один проект розробляється в Нідерландах, де він орієнтується на використання надмірної відновлюваної електроенергії для заміни нею природного газу.

Після трирічної підготовки компанія «SGRE» розпочала будівництво термального накопичувача для зберігання вітрової електроенергії на території алюмінієвого заводу Trimet на південний захід від Гамбурга. Відповідно до проекту, названого «Future Energy System», енергія, що виробляється

вітровою електростанцією, буде перетворюватися на теплову і зберігатися в кам'яному осипу масою приблизно 1000 т при температурі 600 °С [22]. Уявлення про принцип роботи системи «ETES» дає рис. 8. З високотемпературним накопичувачем та паровим циклом великомасштабне зберігання та використання енергії буде ефективним та економічним.

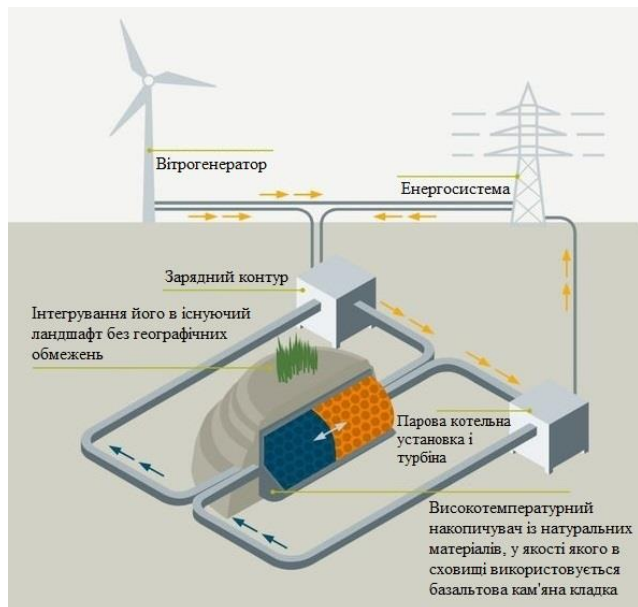


Рисунок 8 – Технологічна схема вітрової електростанції Siemens «Future Energy Solution»

Вказаний обсяг каменів, нагрітих до 600 °С, дозволить запасати приблизно 30 МВт·год електроенергії. Після цього електроенергія вироблятиметься за допомогою парової турбіни. Система «ETES» потужністю 1,5 МВт здатна виробляти електроенергію протягом 24 годин на добу.



Рисунок 9 – Кількість побутових накопичувачів

При розгляді особливостей системи «ETES» акцент робиться на великотоннажні вітрові електростанції. Паралельно розвивається ринок домашніх накопичувачів енергії невеликої продуктивності, до складу яких входять сонячні електро-

станції в сегменті 3 ... 10 кВт потужності. З рис. 9 видно, що у 2019 році в Німеччині було встановлено близько 65 000 нових домашніх систем накопичення енергії. Це на 20 тис. виявляється більше, ніж роком раніше. За минулі три роки їхня загальна кількість подвоїлася і досягла 206 тис. Німецька сонячна енергетика у 2019 році зростала ударними темпами; річний її приріст становив майже 4 ГВт.

Іншими факторами підвищеного інтересу до систем накопичення енергії стали зростання цін на електроенергію для приватних домогосподарств та зростання кількості електромобілів. При цьому майже в 90% усіх нових приватних фотоелектричних систем нині встановлюються домашні системи зберігання енергії.

Потрібно також брати до уваги, що в домашніх накопичувачах енергії переважно застосовуються електричні акумулятори: літій-іонні, свинцево-карбоневі та ванадієво-проточні. Основні їхні недоліки – дорожнеча та деградація (втрати ємності).

Для подолання цих та інших недоліків низка компаній розробляють системи накопичення енергії з базальтовими сховищами тепла. Ці сховища, як свідчать випробування, дають можливість використовувати їх в системах різної тоннажності.

У системах, відомих зараз як «CESAR», електроенергія, вироблена вказаними ВДЕ, для її зберігання в базальті перетворюється на тепло. Ця енергія при піковому споживанні може повертатися в теплову мережу через парову турбіну і генератор, в яких тепло перетворюється на електрику. Ця система захищена патентом [23].

Система «CESAR» розроблена із застосуванням відомих та перевірених технологій; вона відрізняється простотою, що гарантує її надійну роботу, тривалий термін служби та мінімальне обслуговування. Для виготовлення системи використовували екологічно чисті матеріали.

Вкажемо найважливіші характеристики системи: зберігання тепла у базальті – до 500 °С; ємність зберігання енергії – до 250 кВт/м³ базальту; термін зберігання тепла – до одного року; перепад температур – від 60 до 500 °С; витрати на зберігання – від 0,02 євро/кВт·год; нульові викиди CO₂; висока ефективність.

Для підтвердження високої ефективності цього методу зберігання в De Gasthuisroeve (Sint Oedenrode, Meierijstad) була споруджена пілотна система для зберігання 10000 кВт·год електроенергії, що стійко генерується, у вигляді тепла.

Подальші експерименти підтвердили, що енергію від 50 фотоелектричних панелей можна накопичувати влітку для обігріву конференц-залу взимку.

З метою зменшення втрат тепла через ізоляцію 20-футовий контейнер, що містить спіральні труби довжиною 300 м та 40 м³ базальту у вигляді шматочків, повністю обгорнутий товстим шаром мінеральної вати (рис. 10).



Рисунок 10 – Розміщення спіральних труб усередині 20-футового контейнера, що входить до складу системи «CESAR»

Спіральні труби виконують три функції:

- Забезпечують рівномірну подачу електроенергії, яка перетворюється стінками труб на тепло, що зберігається в накопичувачі.
- Повертає тепло при виникненні потреби у ньому.
- Поступово розподіляє тепло, що залишилося за рахунок циркуляції в трубах системи накопичення.

У базальті розміщено 40 датчиків температури для контролю за накопиченням енергії.

Електрична енергія перетворюється на тепло, яке потім зберігається в базальті. Його можна роз-

глядати як альтернативу природному газу, який потребують компанії або групи будинків.

Це тепло можна у будь-яку мить використувати для опалення та гарячого водопостачання.

Системи «CESAR» доцільно застосовувати замість промислових електростанцій, що працюють на вугіллі і підлягають закриттю. Заміна тепла згорання на сонячну та вітрову енергію дозволить уникнути викидів CO₂.

Густина (питома маса) твердого базальту дорівнює 2800 кг/м³. У зв'язку з тим, що базальт використовується у вигляді шматків та піску, обсяг заповнення прийемо трохи менше, а саме $m = 2500 \text{ кг/м}^3$.

Питома теплоємність базальту прийнята $c = 0,84 \text{ кДж/кгК}$. Це дозволяє визначити теплоємність шматків базальту:

$$C = mc = 0,84 \cdot 2500 = 2100 \text{ кДж/м}^3\text{К}.$$

Розрахунковий діапазон температур становить $T = 500 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$. Тоді кількість накопиченого тепла

$$Q_v = C\Delta T = 2100 \cdot 440 = 924 \text{ МДж/м}^3.$$

Це відповідає приблизно 26 м³ газу за умови, що ККД становить 100 %. Насправді можна трохи знизити витрату газу на 1 м³ базальту.

Таким чином, ідеальна горизонтальна стандартна сонячна панель (1x1,7 м², 340 Вт, ККД 20 %) може забезпечити виробництво 350 кВт електроенергії на рік у Нідерландах. На Одещині можна отримати 435 кВт на рік, що дозволить при одній панелі обійтися 1,2 м³ базальтового акумулятора.

На рис. 11 представлена система «ETES», призначена для перетворення електричної енергії на тепло або тепла на електроенергію.

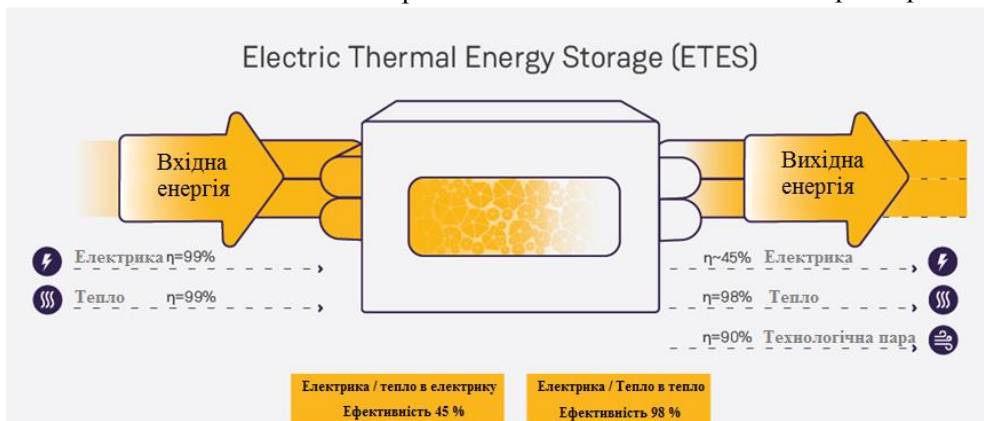


Рисунок 11 – Система «ETES», призначена для перетворення електричної енергії на тепло або тепла на електроенергію

4. Висновки

Попит на електроенергію є нерівномірним. У зв'язку з цим розробляються та застосовуються технології, що дозволяють створювати різні системи акумулювання енергії. Мета таких систем – покращення розподілу та споживання електричної енергії у різні періоди часу. Розглядаються основні технології зберігання енергії у вигляді води («PSHE»), компримованого повітря («CAES») та криогенної рідини («CES»). Показано, що системи зберігання енергії у вигляді рідкого повітря «LAES» знаходять широке застосування та мають відносно високий коефіцієнт перетворення енергії, що дорівнює 60...70 %. За допомогою «CES»-технології можна створювати віртуальну криогенну трубу для резервування енергії та її споживання в короткий проміжок часу.

Широке застосування в промисловості та побуті знаходять такі ВДЕ, як сонячні та вітрові джерела енергії. Дослідження, що проводяться зараз у розвинених країнах, показують, що джерела енергії цього виду можуть знайти застосування в електротермічних накопичувачах енергії.

Виробництво таких накопичувачів малої продуктивності вже налагоджено у низці країн. Вони називаються домашніми системами накопичення енергії. Їхня кількість лише в Німеччині в 2019 році досягла 206 тисяч. У цих системах для накопичення енергії застосовують переважно акумулятори.

Поруч із фірмою «SIEMENS» проводяться розробки систем великої продуктивності. У таких системах накопичувачі енергії створюватимуться на основі базальтових сховищ. Їх доцільно використовувати у якості заміни промислових електростанцій, що працюють на вугіллі або природному газі. Це дозволить уникнути викидів діоксиду вуглецю.

Особистий внесок авторів CRediТ

Косой Б.В.: концептуалізація ідеї, формальний аналіз, написання – огляд та редагування.
Грудка Б.Г.: методологія, дослідження, формальний аналіз, написання – оригінальний проект, адміністрування.
Зімін О.В.: перевірка, верифікація, курація даних, написання – огляд та редагування.

Література

1. Капица П.Л. Эксперимент. Теория. Практика // Энергия и физика. – М.: Изд-во «Наука», 1981. –

С. 97-109.

2. J. Cousse. Still in love with solar energy? Installation size, affect, and the social acceptance of renewable energy technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 145. – P. 111107.

3. R. Heffron, S. Halbrügge, M.-F. Körner, N. A. Obeng-Darko, T. Sumarno, J. Wagner, M. Weibelzahl. Justice in solar energy development // Solar Energy. – 2021. – Vol. 218. – P. 68-75.

4. P. Crippa, M. Alifa, D. Bolster, M. G. Genton, S. Castruccio. A temporal model for vertical extrapolation of wind speed and wind energy assessment // Applied Energy. – 2021. – Vol. 301. – P. 117378.

5. Лавренченко Г.К., Копытин А.В. Разработка и дальнейшее развитие CES-технологий // Технические газы. – 2014. – №4. – С. 24-31.

6. A.F. Mohamed, A.A. Hegazi, G.I. Sultan, Emad M. S. El-Said. Enhancement of a solar still performance by inclusion the basalt stones as a porous sensible absorber: Experimental study and thermoeconomic analysis // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2019. – Vol. 200. – P. 109958.

7. X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke, C.Krupke. Overview of Current Development in Compressed Air Energy Storage Technology // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 62. – P. 603-611.

8. L. Chen, Y. Wang, M. Xie, K. Ye, S. Mohtaram. Energy and exergy analysis of two modified adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) system for cogeneration of power and cooling on the base of volatile fluid // Journal of Energy Storage. – 2021. – Vol. 42. – P. 103009.

9. R. Hyrzyński, P. Ziółkowski, S. Gotzman, B. Kraszewski, T. Ochrymiuk, J. Badura. Comprehensive thermodynamic analysis of the CAES system coupled with the underground thermal energy storage taking into account global, central and local level of energy conversion // Renewable Energy. – 2021. – Vol. 169. – P. 379-403.

10. Baker J. N., Collinson A. Electrical energy storage at the turn of the millennium // Power Engineering Journal. – 1999. – Vol. 13. – No. 3. – P. 107-112.

11. Brunet Y. Energy storage. – John Wiley & Sons, 2013. – 250 p.

12. Energy Storage: The Missing Link in the UK's Energy Commitments / Published April 2014. URL: www.imeche.org/energy (дата звернення 03.09.21).

13. Liquid Air in the Energy and Transport Systems / The Centre for Low Carbon Futures-2013 URL: www.liquidair.org.uk/report-summary (дата звернення 01.09.21).

14. Taylor P., Bolton R., Stone D. et al. Pathways for Energy Storage in the UK/ Report No. 007 // The Centre for Low Carbon Futures. – 2012. – 56 p.
15. Strbac G., Aunedi M., Pudjianto D. et al. Strategic assessment of the role and value of energy storage systems in the UK low carbon energy future / The Carbon Trust. URL: <http://www.carbontrust.com/resources/reports/technology/energy-storage-systems-strategic-assessment-role-and-value> (дата звернення 08.09.21).
16. Kishimoto K., Hasegawa K., Asano T. Development of generator of liquid air storage energy system // Mitsubishi Juko Giho. – 1998. – V. 35. – P. 60-63.
17. F. Beltrami, F. Fontini, L. Grossi. The value of carbon emission reduction induced by Renewable Energy Sources in the Italian power market // Ecological Economic. – 2021. – Vol. 189. – P. 107149.
18. S. Kirsten. Renewable Energy Sources Act and Trading of Emission Certificates: A national and a supranational tool direct energy turnover to renewable electricity-supply in Germany // Energy Policy. – 2014. – Vol. 64. – P. 302-312.
19. D. Jost, M. Speckmann, F. Sandau, R. Schwinn. A new method for day-ahead sizing of control reserve in Germany under a 100% renewable energy sources scenario // Electric Power Systems Research. – 2015. – Vol. 119. – P. 485-491.
20. Лавренченко Г.К., Копытин А.В. Улучшение показателей системы регазификации СПГ и подачи природного газа в магистральный газопровод // Технические газы. – 2012. – № 6. – С. 16-25.
21. Electric Thermal Energy Storage. URL: <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/hybrid-and-storage/thermal-energy-storage-with-etes> (дата звернення 08.09.21).
22. Siemens works on thermal storage for wind power. URL: <https://renewablesnow.com/news/siemens-works-on-thermal-storage-for-wind-power-541120/> (дата звернення 22.09.21).
23. European patent application. URL: <https://patent-images.storage.googleapis.com/9d/ae/e5/706c5978acf5ea/EP3130875A1.pdf> (дата звернення 11.09.21).

Отримана в редакції 10.09.2021, прийнята до друку 01.10.2021

Improving the efficiency of energy accumulation methods of renewable sources

Boris Kosoy¹, Bohdan Hrudka²✉, Oleksii Zimin³

¹⁻³Odessa National Academy of Food Technologies, 1/3 Dvoryanskaya str., Odessa, 65082, Ukraine

✉ e-mail: bogdangennadievich@gmail.com

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0001-5353-8881>; ²<https://orcid.org/0000-0003-1200-5442>;

³<https://orcid.org/0000-0001-9053-3262>

Currently, there is a growing interest in renewable energy sources (RES). Despite this, high-performance energy systems mainly use coal, oil, natural gas, as well as energy produced by hydroelectric and nuclear power plants. The first three sources formed the so-called carbon energy, which has two main disadvantages: limited resources and increased CO₂ emissions into the environment, despite the requirements of the Kyoto Protocol. Most renewable energy sources are characterized by uneven energy production and consumption, so it is necessary to ensure its storage. It can be noted that the more electricity is produced by wind and solar, the stronger the need for systems for the accumulation and storage of this type of energy. A favorable factor for the introduction of renewable energy sources is a sharp decrease in the unit cost of installed capacity, which includes operating and capital costs. The article considers relatively new types of renewable energy sources, which allow to store energy in the form of water (PSHE), compressed air (CAES) and cryogenic liquids - air and nitrogen (CES). With this method you can implement all the processes of production, distribution, storage and use of electricity in different periods of time. The issue of creating efficient equipment for long-term storage of heat produced from electricity produced by solar panels and wind turbines is considered. The heat obtained in this way can be stored for a long time in heat-insulated containers filled with basalt crumb. The relevance of these studies is confirmed by the International Energy Agency: "Renewable energy sources is already the second largest source of electricity in the world, but their use still needs to be accelerated if we want to achieve long-term goals in climate, air quality and energy access".

Keywords: Energy; Renewable energy sources; Solar energy; Wind energy; Cryogenic liquids; Basalt crumb

References

1. **Kapitsa, P.L.** (1981) Experiment. Theory. Practice. *Energiya i fizika. Mocsow: Izdatelskiy dom "Nauka", 97-109.*
2. **Cousse, J.** (2021) Still in love with solar energy? Installation size, affect, and the social acceptance of renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 145, 111107.*
3. **Heffron, R., Halbrügge, S., Körner, M.-F., Obeng-Darko, N.A., Sumarno, T., Wagner, J., Weibelzahl, M.** (2021) Justice in solar energy development. *Solar Energy, 218, 68-75.*
4. **Crippa, P., Alifa, M., Bolster, D., Genton, M. G., Castruccio, S.** (2021) A temporal model for vertical extrapolation of wind speed and wind energy assessment. *Applied Energy, 301, 117378.*
5. **Lavrenchenko, G.K., Kopytin, A.V.** (2014) Development and further development of CES technologies. *Tekhnicheskie Gazy, 4, 24-31.*
6. **Mohamed, A.F., Hegazi, A.A., Sultan, G.I., Emad M. S. El-Said.** (2019) Enhancement of a solar still performance by inclusion the basalt stones as a porous sensible absorber: Experimental study and thermo-economic analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells, 200, 109958.*
7. **Luo, X., Wang, J., Dooner, M., Clarke, J., Krupk, C.** (2014) Overview of Current Development in Compressed Air Energy Storage Technology. *Energy Procedia, 62, 603-611.*
8. **Chen, L., Wang, Y., Xie, M., Ye, K., Mohtaram, S.** (2021) Energy and exergy analysis of two modified adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) system for cogeneration of power and cooling on the base of volatile fluid. *Journal of Energy Storage, 42, 103009.*
9. **Hyrzyński, R., Ziolkowski, P., Gotzman, S., Kraszewski, B., Ochrymiuk, T., Badura, J.** (2021) Comprehensive thermodynamic analysis of the CAES system coupled with the underground thermal energy storage taking into account global, central and local level of energy conversion. *Renewable Energy, 169, 379-403.*
10. **Baker, J. N., Collinson, A.** (1999) Electrical energy storage at the turn of the millennium. *Power Engineering Journal, 13, 3, 107-112.*
11. **Brunet, Y.** (2013) Energy storage. *John Wiley & Sons, 250.*
12. Energy Storage: The Missing Link in the UK's Energy Commitments / Published April 2014. Retrieved September 3, 2021, from www.imeche.org/energy
13. Liquid Air in the Energy and Transport Systems / The Centre for Low Carbon Futures-2013. Retrieved September 1, 2021 from www.liquidair.org.uk/report-summary
14. **Taylor, P., Bolton, R., Stone, D. et al.** (2012) Pathways for Energy Storage in the UK/ Report No. 007. *The Centre for Low Carbon Futures, 56.*
15. **Strbac, G., Aunedi, M., Pudjianto, D. et al.** Strategic assessment of the role and value of energy storage systems in the UK low carbon energy future / The Carbon Trust. Retrieved September 8, 2021 from <http://www.carbontrust.com/resources/reports/technology/energy-storage-systems-strategic-assessment-role-and-value>.
16. **Kishimoto, K., Hasegawa, K., Asano, T.** (1998) Development of generator of liquid air storage energy system. *Mitsubishi Juko Giho, 35, 60-63.*
17. **Beltrami, F., Fontini, F., Grossi, L.** (2021) The value of carbon emission reduction induced by Renewable Energy Sources in the Italian power market. *Ecological Economic, 189, 107149.*
18. **Kirsten, S.** (2014) Renewable Energy Sources Act and Trading of Emission Certificates: A national and a supranational tool direct energy turnover to renewable electricity-supply in Germany. *Energy Policy, 64, 302-312.*
19. **Jost, D., Speckmann, M., Sandau, F., Schwinn, R.** (2015) A new method for day-ahead sizing of control reserve in Germany under a 100% renewable energy sources scenario. *Electric Power Systems Research, 119, 485-491.*
20. **Lavrenchenko, G.K., Kopytin, A.V.** (2012) Improving the performance of the LNG regasification system and the delivery of natural gas to the main gas pipeline. *Tekhnicheskie Gazy, 6, 16-25.*
21. Electric Thermal Energy Storage. Retrieved September 8, 2021 from <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/hybrid-and-storage/thermal-energy-storage-with-etes>.
22. Siemens works on thermal storage for wind power. Retrieved September 8, 2021 from <https://renewablesnow.com/news/siemens-works-on-thermal-storage-for-wind-power-541120/>.
23. European patent application. Retrieved September 11, 2021 from <https://patentimages.storage.googleapis.com/9d/ae/e5/706c5978acf5ea/EP3130875A1.pdf>