coal steam generator of super-super critical parameters of steam 28 MPa/600 °C/600 °C for a 300 MW energy unit. Part 2. Calculation results of the boiler and wall temperatures of its elements at loads of 50–70 %]. *Energotekhnologii i Resursosberegenie*. 2021, No. 1, pp. 4–23. (Ukr.)

3. RD 10-249-98. Petrenya Yu.K., Gilde E.E., Sudakov A.V., Chizhik A.A. Normy rascheta na prochnost

stacionarnykh kotlov i truboprovodov para i goryachej vody. [Standards for calculating the strength of stationary boilers and pipelines of steam and hot water]. Moscow : Closed Joint Stock Company "Scientific and Technical Center for Research of Industrial Safety Problems". 2010. Ser. 20. Iss. 4. 344 p. (Rus.)

Received April 23, 2021

УДК 661.531(56)
DOI: 10.33070/etars.2.2021.02

Браверман В.Я.¹, канд. техн. наук, **Ільєнко Б.К.²**, канд. техн. наук
¹ **ТОВ «Консалтінгово-внедренський центр «Поновлювані ресурси»», Одеса**
вул. Маршала Говорова, 10-6, 65059 Одеса, Україна, e-mail: braverman@resources.odessa.ua
² **Інститут газу Національної академії наук України, Київ**
вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: bor.ilenko@gmail.com

Кріогенна акумуляція електроенергії, виробленої з використанням відновлювальних джерел енергії

Розглянуто можливості та перспективи акумуляції електроенергії, виробленої на об'єктах відновлювальних джерел енергії сонячними та вітровими електростанціями, з використанням кріогенних рідин. Проведено зіставлення трьох найбільш поширених способів акумуляції електричної енергії: за допомогою літій-іонних акумуляторів, водню, рідкого повітря. За технологією, що пропонується, ККД відновлення електричної енергії з рідкого повітря становить від 54 до 70 %. Розроблена технологія заснована на кріогенному та тепловому акумулюванні та має високий коефіцієнт акумуляції. Показано, що зберігання енергії у кріогенних накопичувачах сьогодні є найдешевшим. Запропонована технологія може бути також застосована для виробництва електроенергії зі зрідженого природного газу з використанням стандартного обладнання, що використовується промисловістю. Запропоновано технологічну схему кріоакумуючої станції. *Бібл. 10, рис. 1, табл. 1.*

Ключові слова: акумуляція, кріогенні технології, генерація, фазові переходи.

Подальший розвиток систем виробництва електроенергії з використанням відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), перш за все на вітрових та сонячних електростанціях, стримується необхідністю функціонування додаткових потужностей, що забезпечують нормовані показники електроенергії, яка надходить до енергосистеми [1]. Вказане обумовлено нестабільністю частоти та потужності виробленої об'єктами ВДЕ електроенергії внаслідок, перш за все, зміни погодних умов. За даними [2], енергетична система України може використати максимум 7 ГВт електро-

енергії, виробленої об'єктами ВДЕ. Для залучення надлишків виробленої енергії необхідні вказані додаткові потужності, якими є об'єкти гідро- та теплової енергетики. У значній мірі ідеологія виробництва «зеленого» водню електролізом води якраз і сформувалася як наслідок масштабного спорудження вітрових та сонячних електростанцій, значного виробництва «зеленої» електроенергії та складнощами з використанням її у повному обсязі в енергосистемах.

У певній мірі альтернативою виробництва «зеленого» водню є створення ефективних та

економічних систем та обладнання для акумуляції електричної енергії, виробленої на об'єктах використання ВДЕ з можливістю подальшого її використання широким колом споживачів.

Акумуляція як альтернатива генерації

Розвиток систем зберігання енергії є світовим інноваційним трендом. За оцінками Міжнародного агентства з поновлюваних джерел енергії (IRENA), до 2030 р. загальна потужність акумуляторів на ринках Північної Америки, Європи та Південно-Східної Азії зростає до 250 ГВт [3], при тому, що у 2014 р. вона становила всього 0,8 ГВт. У НЕК «Укренерго» розраховують, що національній енергосистемі до 2025 р. буде потрібно додатково 2,5 ГВт потужності для балансування енергії вітру й сонця.

Ринок накопичувачів енергії має два основні сегменти, а саме: джерела безперебійного живлення та джерела підтримки енергосистем. Вказані сегменти є цільовими для накопичувачів енергії, оскільки вони застосовуються для вирішення проблем якості електроенергії у промисловому масштабі та є досить привабливими, враховуючи потенціал зростання її виробництва. Основним фактором зростання виробництва електроенергії на теперішній час є масштабний розвиток об'єктів використання ВДЕ та, відповідно, необхідність, як вище згадувалося, згладжування нерівномірності її споживання.

Для рівня пікових та маневрених потужностей до сотень кіловат, що дає можливість згладжувати нерівномірності генерації та споживання електроенергії, виробленої на об'єктах використання ВДЕ, у даний час розробляється широкий спектр перспективних електрохімічних технологій. Електрохімічні акумулятори зазвичай мають невисокий ресурс (500–1500 циклів), обмежену глибину розряду (до 30–50 %) та високу питому вартість. Найпотужніша акумулююча електрохімічна система, яка розрахована на 7 хв аварійного електроживлення міської мережі (12 тис. населення), створена у Канаді. Вона містить 13760 електрохімічних елементів, важить 1300 т та займає площу близько 2000 м² [4].

Від недоліків, властивих чисто електрохімічним системам акумулювання електроенергії, позбавлені водневі системи акумулювання. Великомасштабне зберігання енергії за допомогою водню розглядається як частина концепцій Power-to-Power зі зберіганням водню у газоподібному,

а також у зв'язаному стані. При виробництві водню ККД відновлення електроенергії з водневого сховища становить від 54 до 72 %. Розроблений авторами спосіб підвищення енергоефективності виробництва електричної енергії генерується водневими паливними елементами, що дає можливість збільшити ККД ще на 15–25 % [5].

Технології акумулювання енергії у кріогенних рідинах

У технологіях акумулювання енергії у кріогенних рідинах застосовують рідкий азот або повітря. Компанія Highview Power, світовий лідер в області рішень для тривалого зберігання енергії, розробила модульну систему зберігання кріогенної енергії на основі CRYO Battery, яка масштабується до декількох гігават та може бути розміщена у будь-якому місці. За цією технологією, ККД відновлення електричної енергії з рідкого повітря становить від 54 до 70 % [6].

У табл.1 наведені характеристики трьох найбільш поширених способів акумуляції електричної енергії: за допомогою літій-іонних акумуляторів, водню та рідкого повітря.

Таблиця 1. Способи акумуляції електричної енергії

Table 1. Characteristics of the three most common ways of accumulating electricity using lithium-ion batteries, hydrogen, liquid air

Показник	Літій-іонні акумулятори	Водневе акумулювання	Кріогенне акумулювання рідким повітрям
Потреба електроенергії, кВт/кг	–	50,0	1,2
Вартість виробництва 1 кг, дол.	41	3,0	0,07
Обсяг накопичення електроенергії, кг/кВт год	150	833	97
ККД перетворення на газ, %	98	55	70
Загальний ККД технології, %	98	55	70
Наведена вартість накопичення 1 МВт, дол.	282000	6548	1030

Нами пропонується для акумулювання електричної енергії сонячних та вітряних електростанцій використовувати технології акумулювання

енергії у криогенних рідинах [7]. Ця технологія CES (Cryogenic Energy Storage) розроблена інженерами британської компанії Highview Power Storage [8]. Базовий принцип дії технології відомий як «тепловий насос». При цьому викачують тепло з навколишнього середовища для нагріву рідкого азоту або повітря, що має температуру мінус 196°C . При зріджуванні повітря у нього віднімається приблизно 380 кДж/кг енергії, або $0,097\text{ кВт}\cdot\text{год/кг}$, яку він може віддати при поверненні до початкового стану.

Ефективність установки становить близько 50% . У режимі примусового прогріву рідкого повітря теплоносієм з температурою $200\text{--}220^{\circ}\text{C}$ ефективність установки може бути доведена до 70% . Необхідне тепло пропонується отримувати також за рахунок акумуляції електричної енергії, коли вона у надлишку, та накопичувати її в акумулюючій ємності із зануреним матеріалом з фазовим переходом при температурі 100°C . Таким чином акумуляція електричної енергії у пропонуваній технології здійснюється 2 рази: перший раз у холоді, другий раз у теплі.

На рис.1 представлена запропонована нами схема криоакумулюючої станції. Коли у мережі йде спад споживання, зайва електроенергія використо-

вується для приводу компресора (1), що стискає повітря, з подальшим його охолодженням (2), очищенням та зрідженням (5). Рідке повітря накопичується у теплоізолюваній ємності (9) для зберігання. Коли потреба в електроенергії зростає, рідке повітря зі сховища насосом (10) подається під тиском у випарник (11), де газифікується, розширюючись в обсязі до 700 разів за рахунок підігріву, та відходить теплом з турбіни (12). Газ потрапляє на лопаті турбіни, яка приводить у дію електрогенератор (13). Для збільшення ККД перетворення до 70% до випарника подається додатково тепло з температурою понад 200°C від акумулюючої ємності (15) з використанням матеріалів із фазовим переходом [9, 10]. Це тепло накопичено у матеріалі з фазовим переходом за рахунок електричної енергії (16), коли вона є у надлишку в мережі. При цьому розширення рідкого повітря відбувається до 1400 разів. Резервуар (9) на 10 т рідкого повітря щільністю 873 кг/м^3 здатний видавати у мережу 1 МВт електричної потужності за 1 год, на 100 т — 10 МВт/год . Система може бути доповнена так званою віртуальною трубою, тому рідке повітря може перевозитися до накопичувального резервуара (9) автомобільними цистернами або рефрижераторами.

Рис. 1. Схема криоакумулюючої станції: 1 — компресор повітряний; 2 — холодильник; 3 — вологовіддільник; 4 — блок комплексної очистки; 5 — турбодетандер — компресорний агрегат; 6 — компресорна ступінь; 7 — детандерна ступінь; 8 — сепаратор; 9 — резервуар криогенний, $V = 10\text{ т}$; 10 — насос криогенний; 11 — випарник; 12 — турбіна; 13 — генератор; 14 — лінія електропередачі; 15 — акумулююча ємність; 16 — електронагрівач.

Fig. 1. Scheme of cryoaccumulation station: 1 — air compressor; 2 — refrigerator; 3 — moisture separator; 4 — complex cleaning unit; 5 — turbo-expander — compressor unit; 6 — compressor stage; 7 — expander; 8 — separator; 9 — cryogenic tank, $V = 10\text{ t}$; 10 — cryogenic pump; 11 — evaporator; 12 — turbine; 13 — generator; 14 — power line; 15 — storage tank; 16 — electric heater.

Технологія, що заснована на криогенному та тепловому акумулюванні, має такі переваги: зрушення генерації у часі; синхронне підтримання напруги; високий коефіцієнт акумуляції.

Зберігання енергії у криогенних накопичувачах сьогодні є найдешевшою технологією [8]. Так, зберігання 1 МВт/рік у криогенних накопичувачах, за оцінками англійських виробників, коштує 110 фунтів (3720 грн). Для порівняння, зберігання 1 МВт/рік у літій-іонному акумуляторі коштує 283 фунта (9565 грн), що у 2,5 рази дорожче.

Криогенна генерація

Запропонована технологія може бути застосована також для виробництва електроенергії зі зрідженого природного газу. Зріджений природний газ — це переважно метан, штучно зріджений охолодженням до мінус 160 °С. При випаровуванні він розширюється у 600 разів, у разі використання додаткового зовнішнього тепла — у 1100 разів. Технологічна схема криогенної генеруючої системи у цьому випадку задіяна, починаючи від блоку 9 на рис.1. Сьогодні вже більше 40 % природного газу транспортується у зрідженому вигляді, прогноз компанії Shell на 2040 р. становить 60 %. Реалізація запропонованої технології може бути здійснена з використанням обладнання, випуск якого освоєний промисловими підприємствами.

Використання зрідженого природного газу замість вугілля на теплових електростанціях, призначених для покриття пікових навантажень, повністю вирішує екологічні проблеми шкідливих викидів у атмосферу. Фактично можна говорити про створення нового вакуумного сектора енергетики.

Висновки

Пропонується для акумулювання електричної енергії сонячних та вітряних електростанцій використовувати технології акумулювання енергії у криогенних рідинах: рідкому азоті або рідкому повітрі. За технологією, що пропонується, ККД відновлення електричної енергії з рідкого повітря становить від 54 до 70 %.

Проведені зіставлення трьох найбільш поширених способів акумуляції електричної енергії: за допомогою літій-іонних акумуляторів, водню, рідкого повітря.

У режимі примусового прогріву рідкого повітря теплоносієм з температурою 200–220 °С ефективність установки може бути доведена до 70 %. Необхідне тепло пропонується отримувати за рахунок акумуляції електричної енергії, коли вона у надлишку, та накопичувати її в акумулюючій ємності із зануреним матеріалом з фазовим переходом при температурі 100 °С. Таким чином акумуляція електричної енергії у запропонованій технології здійснюється 2 рази: перший раз у холоді, другий раз у теплі.

Зберігання енергії у криогенних накопичувачах сьогодні є найдешевшою технологією: у 2,5 рази дешевше, ніж у літій-іонному акумуляторі. Отримані результати дають можливість розробити технологію та організувати дослідне, а потім промислове виробництво систем акумуляції та генерації електричної енергії на основі криогенних технологій.

Список літератури

1. Кулик М.М., Нечаєва Т.П., Згуровець О.В. Перспективи та проблеми розвитку об'єднаної енергосистеми України в умовах її приєднання до енергосистеми Євросоюзу і гіпертрофованого використання у її складі вітрових та сонячних електростанцій. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. № 4. С. 4–12.
2. Как в Украине можно добывать «зеленый» водород. — https://biz.censor.net/resonance/3225183/kak_v_ukraine_mojno_dobyvat_zelenyyi_vodorod
3. НПК «Энергетическое оборудование». Мировой рынок накопителей энергии. — <https://mig-energo.ru/kineticheskie-nakopiteli-energii/mirovoj-rynok-nakopitelej-energii/>
4. Малышенко С.П., Счастливцев А.И. Анализ системы водородного аккумулирования электроэнергии в сравнении с другими системами аккумулирования. *Теплофизика высоких температур*. 2015. Т. 53, № 4. С. 538–543.
5. Пат. 146564 Укр., МПК F 24 F 11/00 F 24 F 11/46 (2018.01). Спосіб підвищення енергоефективності виробництва електричної енергії, генеруємої водними топливними елементами. В.Я.Браверман, І.Б.Круш. Опубл. 04.03.2021, заявл. 29.07.2020.
6. Лавренченко Г.К., Копытин А.В. Разработки и дальнейшее развитие CES-технологий. *Технические газы*. 2014. № 4. С. 24–31.
7. Кубатуллин С.Б., Радченко Р.В. Аккумуляция электроэнергии на основе жидкого воздуха. — <https://elar.urfu.ru/handle/10995/57792>
8. Highview Power CRYOBattery — первая в мире криогенная система хранения энергии гигаваттного уровня. — <https://www.ixbt.com/news/2019/06/27/highview-power-cryobattery.html>

9. Будлянський С.В., Редько А.Ф., Чайка Ю.И. Сравнение теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом для систем солнечного теплоснабжения. — <http://eprints.kname.edu.ua/38329/1/41-44.Pdf>.

10. Пат. 115816 Укр., МПК F 24 Н 7/02 (2006.01). Акумулятор тепла із фазовим переходом. В.Я.Браверман, В.І.Кушнерук. Опубл. 25.04.2017, заявл. 28.11.2016.

Надійшла до редакції 31.03.2021

Браверман В.Я.¹, канд. техн. наук, **Ильенко Б.К.²**, канд. техн. наук
¹ **ООО «Консалтингово-внедренческий центр «Возобновляемые ресурсы»», Одесса**
ул. Маршала Говорова, 10-б, 65059 Одесса, Украина, e-mail: braverman@resources.odessa.ua
² **Институт газа Национальной академии наук Украины, Киев**
ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: bor.ilienko@gmail.com

Криогенная аккумуляция электроэнергии, произведенной с использованием возобновляемых источников энергии

Рассмотрены возможности и перспективы аккумуляции электроэнергии, произведенной на объектах возобновляемых источников энергии солнечными и ветровыми электростанциями, с использованием криогенных жидкостей. Проведено сопоставление трех наиболее распространенных способов аккумуляции электроэнергии: с помощью литий-ионных аккумуляторов, водорода, жидкого воздуха. По предлагаемой технологии КПД восстановления электрической энергии из жидкого воздуха составляет от 54 до 70 %. Разработанная технология основана на криогенном и тепловом аккумулировании и имеет высокий коэффициент аккумуляции. Показано, что хранение энергии в криогенных накопителях сегодня является самым дешевым. Предлагаемая технология может быть также применена для производства электроэнергии из сжиженного природного газа с использованием стандартного оборудования, использующегося в промышленности. Предложена технологическая схема криоаккумулирующей станции. *Библ. 10, рис. 1, табл. 1.*

Ключевые слова: аккумуляция, криогенные технологии, генерация, фазовые переходы.

Braverman V.Ya.¹, Candidate of Technical Sciences,
Ilyenko B.K.², Candidate of Technical Sciences

¹ **LLC «Consulting and Implementation Center «Renewable Resources»», Odesa**
10-b, Marshal Govorov Str., 65059 Odessa, Ukraine, e-mail: braverman@resources.odessa.ua
² **The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv**
39, Degtyarevskaya Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: bor.ilienko@gmail.com

Cryogenic Accumulation of Electricity Generated Using Renewable Energy Sources

Possibilities and prospects of accumulation of the electric power generated on objects of renewable energy sources - solar and wind power plants, with use of cryogenic liquids are considered. A comparison of the three most common ways of accumulating electricity: using

lithium-ion batteries, hydrogen, liquid air. According to the proposed technology, the efficiency of recovery of electricity from liquid air is from 54 to 70%. The developed technology is based on cryogenic and thermal accumulation and has a high accumulation coefficient. It is shown that energy storage in cryogenic storage devices is the cheapest today. The proposed technology can also be used to generate electricity from liquefied natural gas using standard equipment developed by industry. The technological scheme of the cryoaccumulating station is offered. *Bibl. 10, Fig. 1, Table 1.*

Key words: accumulation, cryogenic technologies, generation, phase transitions.

References

1. Kylik M.M., Nechaeva T.P., Zgyrovets O.V. Perspektivy ta problemi rozvitky ob'yednanoi energosistemi Ukraini v umovah ii priyednannia do sistemi Evrosousy i gipetrofirovanogo vikoristannia v ii skladi vitrovih ta soniachnih electrostantsi. *Problemi zagalnoy energetiki*. 2019. No. 4. pp. 4–12. (Ukr.)
2. Kak v Ukraine mozno dobyvat' "zelenyy" vodorod. — https://biz.censor.net/resonance/3225183/kak_v_ukraine_mojno_dobyvat_zelenyyi_vodorod. (Rus.)
3. NPK "Energeticheskoe oborudovanie". Mirovoy pinok nakopiteley energii. — <https://mig-energo.ru/kineticheskie-nakopiteli-energii/mirovoj-rynok-nakopitelej-energii/> (Rus.)
4. Malishenko S.P., Schastlivtsev A.I. Analiz system vodorodnogo akkumulirovaniya electroenergii v sravnenii s drugimi sistemami akkumulirovaniya. *Teplofizika Visokih Temperature*. 2015. 53 (4). pp. 538–543. (Rus.)
5. Pat. 146564 Ukr., F 24 F 11/00 F 24 F 11/46 (2018.01). Sposib pidvischennia energoeffektivnosti virobnitstva electroenergii generiruyemoy toplivnimi elementami. V.Ya.Braverman, I.B.Krush. Publ. 04.03.2021, zayavl. 29.07.2020. (Ukr.)
6. Lavrenchenko G.K., Kopitin A.V. Razrabotka i dalneyshee razvitie CES-tehnologiy. *Tekhnicheskie gazi*. 2014. No 4. pp. 24–31. (Rus.)
7. Kubatullin S.B., Radchenko R.V. Akkumulirovanie electroenergii na osnove jidkogo vozduha. — <https://elar.urfu.ru/handle/10995/57792>. (Rus.)
8. Highview Power CRYOBattery — pervaya v mire kriogennaya sistema hraneniya energii gigavatnogo urovnia. — <https://www.ixbt.com/news/2019/06/27/highview-power-cryobattery.html>. (Rus.)
9. Budliansky S.V., Redko A.A., Chayka Yu.I. Sravnenie teploakkumuliruyuschih materialov s fazovim perehodom dlia sistem solnechnogo teplosnabjennia. — <http://eprints.kname.edu.ua/38329/1/41-44.Pdf>. (Rus.)
10. Pat. 115816 Ukr., F 24 H 7/02 (2006.01). Akkumuliator tepla s fazovim perehodom. V.Ya.Braverman, I.B.Krush, Publ. 25.04.2017, zayavl. 28.11.2016.

Received March 31, 2021