

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний технологічний університет  
Кафедра екоенергетики, термодинаміки та прикладної екології



## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

на тему Проект акумулятора енергії для ВЕУ на основі стисненого повітря  
(назва кваліфікаційної роботи згідно з наказом ЗВО)

---

---

Здобувача Кисльонка О.А.  
(прізвище, ініціали)  
3 с\н курсу групи ЗН-754

Керівник доцент кафедри ТД  
та ВЕ Дем'яненко Ю.І.  
(посада, прізвище та ініціали)

Консультанти \_\_\_\_\_  
(посада, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(посада, прізвище та ініціали)

**Кваліфікаційна робота допускається до захисту**

Рішення кафедри від 09 червня 2023 р., протокол № 11.

Завідувач кафедри ЕТ та ПЕ

(назва кафедри)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Юрій СЕМЕНЮК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

**ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Факультет нафти, газу та екології  
Кафедра екоенергетики, термодинаміки та прикладної екології  
Ступінь вищої освіти бакалавр  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Освітня програма Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Зав. кафедри Ю.В. Семенюк

«31» березня 2023 р.

## **ЗАВДАННЯ**

### **НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА (ЗДОБУВАЧКИ)**

Кисльонка Олексія Анатолійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проект акумулятора енергії для ВЕУ на основі стисненого повітря

затверджена наказом ОНТУ від 31.03.2023 року № 119-03

2. Термін здачі здобувачем (здобувачкою) закінченої роботи 08.06.2023 року

3. Вихідні дані роботи Місцезнаходження котеджу: м. Одеса

Кількість проживаючих – 4 людей.

Опалювальна площа дорівнює 120 м<sup>2</sup>

Питомі тепловтрати 0,08кВт/м<sup>2</sup>

4. Перелік питань, які потрібно розробити 1. Огляд сучасних систем вітрової генерації. 2. Технологія акумуляції енергії на стисненому повітрі (CAES). 3. Технологія енергетичні мішки (Energy bag) 4. Визначення потужності джерела тепла. 5. Розрахунок підводного акумулятора енергії для опалення та ГВП котеджу. 6. Економічна ефективність. 7. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Кількість видобутку енергії в ЄС з різних джерел в процентах. 2. Динаміка росту встановленої потужності об'єктів ВДЕ в Україні в МВт. 3. Встановлена потужність ВДЕ за областями материкової частини України станом на 2021 рік, МВт. 4. Наслідки повномасштабної агресії РФ для ринку відновлювальних джерел енергії України. 5. Потенціал офшорної вітроенергетики України. 6. Вітрова енергетична установка. Історія виникнення. 7. Швидкість вітру. 8. Сучасні вітрогенератори. 9. Системи накопичення енергії. 10 Підземний пневматичний акумулятор енергії. 11. Комбінована установка гідро-CAES з ізобарним зберіганням. 12. Підводні бетонні сфери-акумулятори. 13. Підводні енергетичні мішки. 14. Акумулятор тепла (рекупіратор). 15. Акумулятор тепла фазового переходу. 16. Система акумуляції тепла стисненого повітря.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-6	Дем'яненко Ю.І., доцент кафедри ТД та ВЕ	31.03.2023	08.06.2023

7. Дата видачі завдання 28.02.2023 року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд сучасних систем вітрової генерації енергії	03.04.2023	
2	Технологія акумуляції енергії на стисненому повітрі (CAES)	11.04.2023	
3	Технологія енергетичні мішки (Energy bag)	17.04.2023	
4	Визначення потужності джерела тепла	17.04.2023	
5	Розрахунок підводного акумулятора енергії для опалення та ГВП котеджу	15.05.2023	
6	Економічна ефективність	18.05.2023	
7	Охорона праці.		
	Графічний матеріал		
1	Принципова схема акумулятора енергії на стисненому повітрі	24.05.2023	
2	Підземний пневматичний акумулятор енергії	25.05.2023	
3	Система акумуляції тепла стисненого повітря	26.05.2023	
	Презентація	12.06.2023	

Здобувач-дипломник \_\_\_\_\_  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

*Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.*

*Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.*

Здобувач-дипломник \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали) ( підпис )

## Анотація

КИСЛЬОНОК О.А.

*Тема дипломної роботи:* «Проект акумулятора енергії для ВЕУ на основі стисненого повітря»

*Спеціальність* 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

*Заклад освіти* Одеській національний технологічний університет  
Одеса, 2023 рік.

Дипломна робота присвячена проектуванню системи опалення та гарячого водопостачання котеджу на основі підводного акумулятора енергії на стисненому повітрі по технології «Energy bag». В оглядовій частині проекту розглянуто сучасні системи акумуляції енергії на стисненому повітрі. Показано, що використання підводного акумулятора енергії на стисненому повітрі знімає проблему як прямої, так і опосередкованої екологічної шкоди, оскільки:

зменшується техногенне навантаження на довкілля через відповідне зменшення шкідливих викидів;

не виводиться з обігу земля.

Дипломна робота бакалавра містить такі розділи:

Вступ 1. Огляд сучасних систем вітрової генерації енергії. 2. Технологія акумуляції енергії на стисненому повітрі (CAES). 3. Технологія енергетичні мешки (Energy bag). 4. Визначення потужності джерела тепла. 5. Розрахунок підводного акумулятора енергії для опалення та ГВП котеджу. 6. Економічна ефективність 7. Охорона праці. Висновки. Література.

Робота містить 8 таблиць, 30 рисунків, 18 літературних джерел.

ВІТРОГЕНЕРАТОР, АКУМУЛЯТОР ЕНЕРГІЇ, СТИСНЕНЕ ПОВІТРЯ,  
ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕШОК, АКУМУЛЯТОР ТЕПЛА.

## Summary

KYSLONOK O.A.

Topic of the thesis: "Project of an energy accumulator for wind turbines based on compressed air "

Specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics"

Educational institution Odesa National Academy of Food Technologies  
Odesa, 2023.

The thesis is devoted to the design of the heating and hot water supply system of the cottage based on the underwater compressed air energy accumulator using the "Energy bag" technology. In the review part of the project, modern systems of energy accumulation on compressed air are considered. It is shown that the use of an underwater energy accumulator on compressed air removes the problem of both direct and indirect environmental damage, because:

man-made load on the environment decreases due to the corresponding reduction of harmful emissions;

land is not taken out of circulation.

The bachelor thesis contains the following sections:

Introduction 1. Overview of modern wind energy generation systems. 2. Compressed air energy storage technology (CAES). 3. Energy bag technology. 4. Determination of the power of the heat source. 5. Calculation of an underwater energy accumulator for heating and hot water heating of the cottage. 6. Economic efficiency 7. Labor protection. Conclusions. Literature.

The work contains 8 tables, 30 figures, 18 literary sources.

WIND GENERATOR, ENERGY ACCUMULATOR, COMPRESSED AIR,  
ENERGY BAG, HEAT ACCUMULATOR.



4. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ОПАЛЕННЯ БУДИНКУ ЗА СЕРЕДНЬОМІСЯЧНИМИ ТЕМПЕРАТУРАМИ	58
4.1 Визначення теплового навантаження системи опалення будинку	58
5 РОЗРАХУНОК КІЛЬКОСТІ ЕНЕРГІЇ ПРИ ПІДВОДНОМУ ЗБЕРІГАННІ ЇЇ В МІШКАХ	60
5.1 Основні баланси енергії підводного сховища стисненого повітря	60
5.1.1 Політропічне стиснення	60
5.1.2 Визначення маси повітря, що закачується в кулю	62
5.1.3 Розрахунок кількості куль	
5.1.4 Розрахунок потужності ВЕУ	
5.2 Стиснене повітря як джерело тепла для будинку в січні	63
5.2.1 Розрахунок матеріальних потоків	63
5.2.2 Визначення об'єму добового теплового акумулятора	64
5.3 Розрахунок гідравлічного опору теплоакумулятора	68
6. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	71
7. ОХОРОНА ПРАЦІ	73
7.1 Блискавкозахист	73
7.2 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки	76
ВИСНОВОК	
ЛІТЕРАТУРА	

## ВСТУП

Попит на енергію по всьому світу продовжує зростати, що зумовлено економічним розвитком, збільшенням населення та розвитком промисловості. Однак, залежність від використання викопних видів палива для виробництва енергії призвела до серйозних негативних наслідків для довкілля, зокрема зміни клімату та забруднення повітря. У такому контексті, необхідність використання відновлювальних джерел енергії стала критичною.

Відновлювані джерела енергії стали перспективним рішенням для зменшення негативних наслідків від використання викопних палив. Серед різних відновлюваних джерел, вітрова енергія виділяється як перспективна опція через її широке поширення та невеликий вплив на довкілля. Генерація електроенергії з вітру зазнала помітного зростання в останні роки, де вітрогенератори використовують кінетичну енергію вітру для виробництва електрики. Це чисте та відновлюване джерело енергії має великий потенціал у зменшенні викидів парникових газів та залежності від викопних палив.

Проте, однією з проблем, пов'язаних з вітровою енергією, є її інтермітентність. Швидкість вітру змінюється, що призводить до змін у виробництві електроенергії. Ця нестабільність ставить виклики перед стабільністю електричної мережі та надійним постачанням електроенергії. Для вирішення цієї проблеми були розроблені інноваційні рішення для накопичення енергії, і одним із таких рішень є накопичувач енергії стисненого повітря (Compressed Air Energy Storage, CAES).

Накопичувач енергії стисненого повітря (CAES) є технологією, яка дозволяє накопичувати надлишкову енергію, вироблену вітровими турбінами під час періодів низького попиту. Ця технологія включає в себе стиснення повітря та зберігання його в підземних печерах або високотиснених контейнерах, або під водою. Коли попит на електроенергію високий, стиснене повітря випускається, приводячи турбіни в рух та генеруючи електрику. Цей процес забезпечує надійність та гнучкість для балансування інтермітентності

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		8

вітрової енергії та забезпечення постійного постачання електроенергії до електричної мережі.

Поєднання вітрової генерації та накопичувача енергії стисненого повітря має кілька переваг. По-перше, вітрова енергія є чистою, відновлювальною та широко доступною, що робить її екологічно безпечною альтернативою традиційним джерелам енергії. По-друге, накопичувач енергії стисненого повітря дозволяє ефективно зберігати надлишкову електроенергію, що виробляється з вітроенергії, забезпечуючи стабільне та надійне постачання електроенергії навіть у періоди низького вітрового потоку.

Однак, використання накопичувачів енергії стисненого повітря також стикається з викликами. Проблемою є ефективність системи, оскільки під час стиснення та розширення повітря втрачається певна кількість енергії у вигляді тепла. Для усунення цих недоліків пропонується тепло від стискання повітря направляти теплоаккумулятори, щоб під час розширення повітря додавати його в турбіну детандера, це дозволить підвищити ККД установки. Оптимізація та розвиток нових технологій для підвищення ефективності є ключовими завданнями в цій галузі.

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		9

# 1 ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИКА ЯК СКЛАДОВА ЧАСТИНА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ (ВДЕ)

## 1.1 ВДЕ в енергетичних балансах країн Європи.

Трансформація європейського сектору електроенергії стане важливою частиною побудови нової енергетичної системи, яка подолає потрійну кризу клімату, енергетичної безпеки та доступності. Дії цього десятиліття мають вирішальне значення не лише для вирішення кризи викопного палива, але й для швидкої зміни кількості викидів. Це необхідно, якщо Європа хоче зробити справедливий внесок у досягнення цілей Паризької угоди. Декарбонізація та розширення електроенергії з відновлювальних джерел в Європі є найефективнішим способом витіснення викопного палива в економіці, зменшуючи залежність від імпортової енергії. Добра новина полягає в тому, що всі технології, необхідні для посилення переходу доступні, а вітрова та сонячна енергія утворюють основу переходу [1].

За дорожньою картою ІЕА Net Zero та останніми кліматичними моделями, багато доказів свідчать про необхідність повної декарбонізації енергетичної системи Європи до середини 2030-х років. Нещодавно Велика Британія та Німеччина встановили мету повної декарбонізації електроенергії до 2035 року, країни G7 також встановили подібну мету. Однак, поки Європа та ЄС не встановили єдиного сигналу щодо цього.

За моделюванням Ember [1], Європа може досягти чистої енергетичної системи до 2035 року без додаткових витрат та без шкоди для безпеки постачання. Це вимагатиме інвестицій понад існуючі плани та негайних заходів для усунення перешкод на шляху розширення інфраструктури чистої енергії. Втілення цієї мети може сприяти розвитку європейської економіки, зміцненню позиції ЄС як кліматичного лідера та відправити важливе міжнародне повідомлення про те, що ці виклики можна подолати.

Згідно звіту ember (рис. 1.1) вітроенергетика виробила 15% (420 ТВт-год) від всієї електроенергії в ЄС у 2022 році. Німеччина є найбільшим виробником

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		10

із 126 ТВт-год (22% від загального обсягу електроенергії), випереджаючи Іспанію (62 ТВт-год, 22%). Данія має найвищу відсоткову частку з 55% свого балансу електроенергії (19 ТВт-год) попереду Литви (38%), Ірландії (34%) та Португалії (28%). Вітрова генерація наразі є другим за величиною екологічно чистим джерелом електроенергії в ЄС, і має намір продовжувати зростати й перевершувати атомну генерацію.

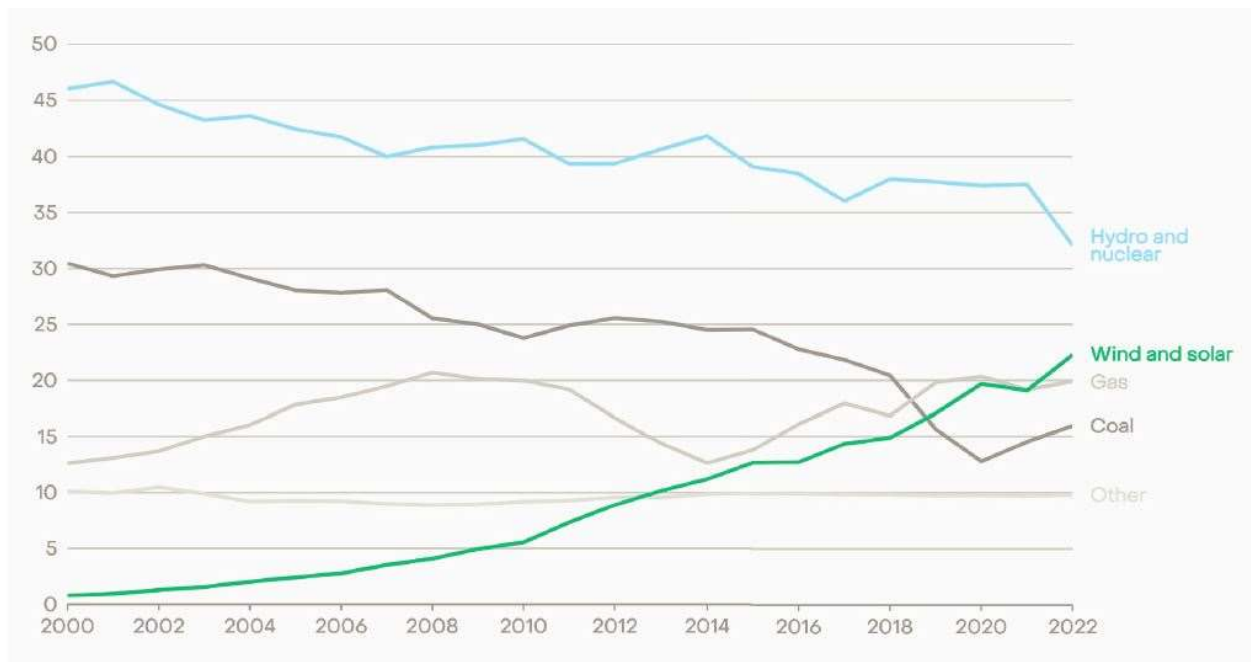


Рисунок 1.1.1 Кількість видобутку енергії в ЄС з різних джерел в процентах. У 2022 році вперше сонячна та вітрова генерація перевищила газову та вугільну.

У 2021 році виробництво вітрової енергії в ЄС зросло на 8,6% (+33 ТВт-год) з 387 ТВт-год до 420 ТВт-год у 2022 році. Це більш ніж компенсує падіння минулого року на 11 ТВт-год, але все ще нижче, ніж зростання в 2015, 2017 роках, і найбільше річне зростання у 2019 році на 47 ТВт-год.

Частка вітрової енергії в структурі електроенергії також зросла на 1,6 відсоткового пункту, з 13,4% у 2021 році до 15% у 2022 році. Збільшення вітрової енергії було зумовлене значним збільшенням у Німеччині (+11 ТВт-год, 10%), а також у Швеції (+6 ТВт-год, 22%) і Польщі (+3,5 ТВт-год, 22%).

В Італії, Угорщині, на Кіпрі та в Естонії спостерігалось деяке скорочення виробництва вітрової енергії, але воно не вплинуло на загальний баланс виробництва в ЄС.

Виробництво енергії вітру значно збільшилося за останні двадцять років, збільшившись на 1873% до 398 ТВт-год, а також значно зросло в загальній структурі електроенергії, з 0,8% в 2000 році до 15% в 2022 році в ЄС. За винятком 2021 року виробництво вітрової енергії зростало протягом останніх 20 років. У 2021 році зменшення виробництва не було структурним спадом, а скоріше було викликано поганими вітровими умовами у першій половині року, що спричинило менше виробництво, ніж зазвичай.

З часу Паризької угоди 2015 року вітрова енергія зростає в середньому на 6,9% щорічно. Це означає зниження тенденції до показників 2000-2015 роками (+18,3% щорічно). Однак у 2022 році спостерігалось зростання в річному обчисленні на 8,6% (33 ТВт-год). З 2015 року частка ринку ВЕС зросла з 9,2% до 15% у виробництві електроенергії в ЄС. Однак є фактори, які заважають подальшому високому темпу зростання ринку ВЕС в Європі. Основною причиною сповільнення зростання після 2017 року стало зменшення кількості дозволів, виданих на берегові вітрові турбіни, які впали на 70% за три роки. За даними асоціацій вітроенергетики, монтаж типової турбіни займає чотири роки від створення проекту до запуску. Виробники турбін та оператори вітрових електростанцій стикаються з додатковими проблемами через обов'язкові мінімальні відстані від житлових районів та авіаційної інфраструктури, а також через судові позови, подані громадськими рухами та екологічними групами.

У червні 2020 року міністерство економіки (BMWi) та уряди 16 федеральних земель Німеччини досягли угоди: рішення про обмеження мінімальної відстані від вітротурбін передати на огляд федеральним землям. Промислові організації піддали критиці суворі мінімальні відстані, наприклад, правило 10-Н в Баварії, яке стверджує, що відстань до житлових районів має бути щонайменше в десять разів більше висоти турбіни.

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		12

У 2022 році виробництво вітрової енергії в Європейському Союзі зросло на 8,6% до 420 ТВт-год, що є значним збільшенням у порівнянні з 2021 роком, коли відбулося падіння виробництва. На жаль, падіння кількості дозволів на будівництво берегових вітроелектростанцій у 2018-2021 роках спричинило сповільнення темпів зростання ринку вітрової енергії. Відтак, хоча виробництво вітрової енергії значно зросло за останні 20 років і складає 15% від загального обсягу електроенергії, існує проблема обмеженого доступу до нових місць для будівництва вітроелектростанцій.

### 1.2 Частка ВЕС у загальних потужностях ВДЕ в Україні, та перспективи розвитку.

У 2019 році Україна увійшла у ТОП-10 країн світу за темпами розвитку відновлюваної енергетики, а у 2020 році у ТОП-5 європейських країн за темпами розвитку сонячної енергетики. У тому ж 2019 році, у рейтингу Climatescore від Bloomberg New Energy Finance (Bloomberg NEF), Україна посіла почесне 8 місце (піднявшись з 63-го) серед 104 країн світу за інвестиційною привабливістю країни саме у питанні розвитку низьковуглецевих джерел енергії і будівництва «зеленої» економіки. У 2021 році, Україна була на 48 місці за загального інвестиційного потенціалу держави серед 136 країн світу в рейтингу Bloomberg NEF [2].

Починаючи з 2019 року, інвестиції в нові проекти відновлюваної енергетики в Україні постійно зростають і перевищують інвестиції в проекти, які використовують копальне паливо. За останні 10 років провідні міжнародні та українські інвестори відновлюваної енергетики залучили до економіки України більше 12 млрд доларів США прямих іноземних інвестицій. Іноземні інвестори в енергетичному секторі ВДЕ становлять понад 35% від установленної потужності станом на кінець 2021 року, що свідчить про конкурентоспроможність та відкритість українського сектору ВДЕ. Серед найбільших міжнародних кредиторів та інвесторів в секторі ВДЕ в Україні на сьогоднішній день є Європейський банк реконструкції та розвитку, Чорноморський банк торгівлі та розвитку, Американська міжнародна фінансова

					КРБ.ЕТтаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

корпорація розвитку (DFC), Федеральний банк землі Баварія BayernLB, Інвестиційний фонд для країн, що розвиваються (IFU), Північна екологічна фінансова корпорація (NEFCO) та інші. Таким чином, географія інвестицій в будівництво українських електростанцій на ВДЕ поширюється на організації чи окремих інвесторів з Китаю, США, Великобританії, Німеччини, Нідерландів, Швеції, Данії, Норвегії, Франції, Люксембургу, Бельгії, Іспанії, Канади, Туреччини, тощо.

За даними НКРЕКП (рис.1.2.1), станом на 31 грудня 2021 року, встановлена потужність сектору відновлюваної енергетики України досягла 9 655,9 МВт, включно з сонячними установками для приватних домогосподарств (дСЕС), або 8 450,8 МВт — без дСЕС.

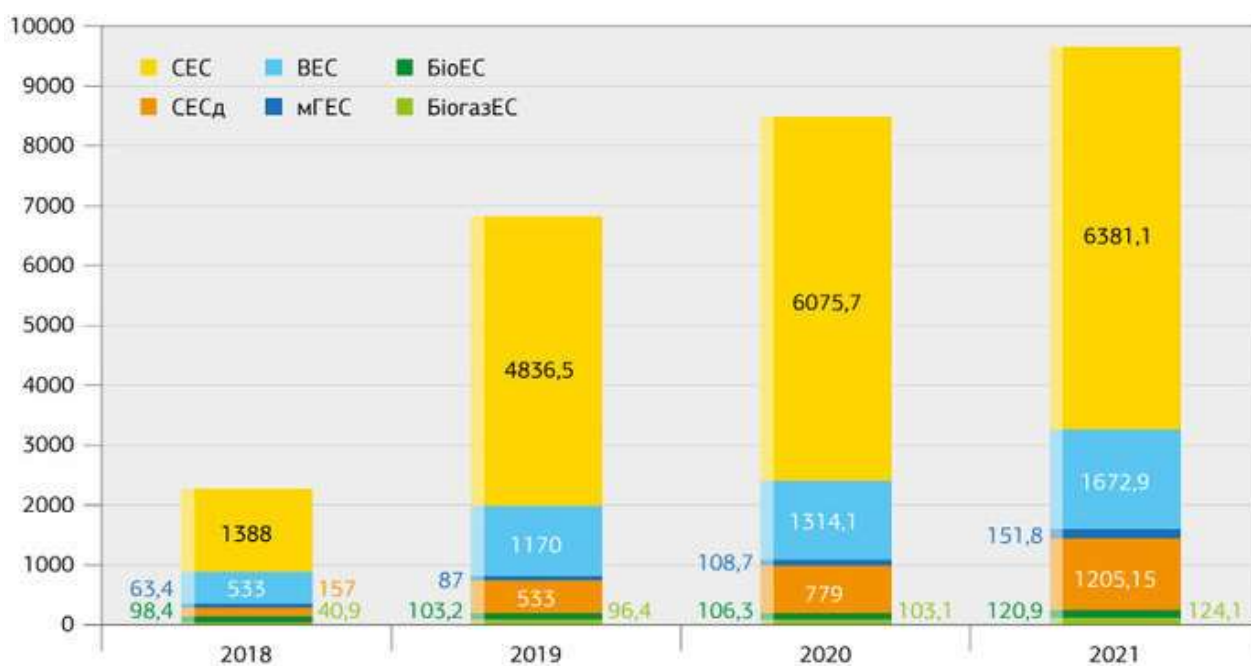


Рисунок 1.2.1 Динаміка росту встановленої потужності об'єктів ВДЕ в Україні, які працюють за «зеленим» тарифом, МВт

У національному секторі ВДЕ на початок 2022 року вітроенергетика займала друге місце за встановленою потужністю після сонячної енергетики. Проте, вітроенергетичний сектор в Україні став лідером за додаванням нових потужностей до «зеленого» енергетичного міксу в 2021 році. У минулому році

було введено в експлуатацію 358,8 МВт, що становить 30,6% від загальної встановленої потужності. Це майже вдвічі перевищує обсяг нових вітроенергетичних потужностей, введених в експлуатацію у 2020 році (144,2 МВт). На кінець 2021 року загальна встановлена потужність вітроенергетичного сектору становила 1 672,9 МВт. На початок війни в Україні було 34 вітроелектростанції (рис.1.2.2) або 699 вітрових турбін з середньою одиничною потужністю 3,5 МВт.



Рисунок 1.2.2 Вітрові електростанції України станом на кінець 2021 року.

Джерело: ГС «УВЕА», 2021

Відповідно до природного потенціалу різних регіонів, географія розташування об'єктів відновлюваної енергетики різниться в залежності від джерела енергії. Більшість вітрових електростанцій знаходяться в південних і південно-східних регіонах, зокрема на узбережжі Чорного та Азовського морів, приблизно 85%. У той же час, сонячна генерація поширена набагато ширше, при цьому близько 60% промислових сонячних електростанцій розташовані в південних і південно-східних областях України.

На початок 2022 року за загальною встановленою потужністю з ВДЕ лідерами серед усіх областей України є Дніпропетровська (1350,06 МВт), Херсонська (1139,65 МВт) і Миколаївська області (1121,16 МВт). На усі ці області припадає понад 37,3% усіх потужностей ВДЕ в Україні (рис.1.2.3). Що стосується річного приросту, то найбільше нових об'єктів з ВДЕ у 2021 році було додано у Миколаївській (168,7 МВт), Одеській (149,1 МВт), Херсонській (145 МВт) та Запорізькій областях — 98,8 МВт. Цікаво зазначити, що саме ці чотири області, зокрема, лідирують й за встановленою вітроенергетичною потужністю.

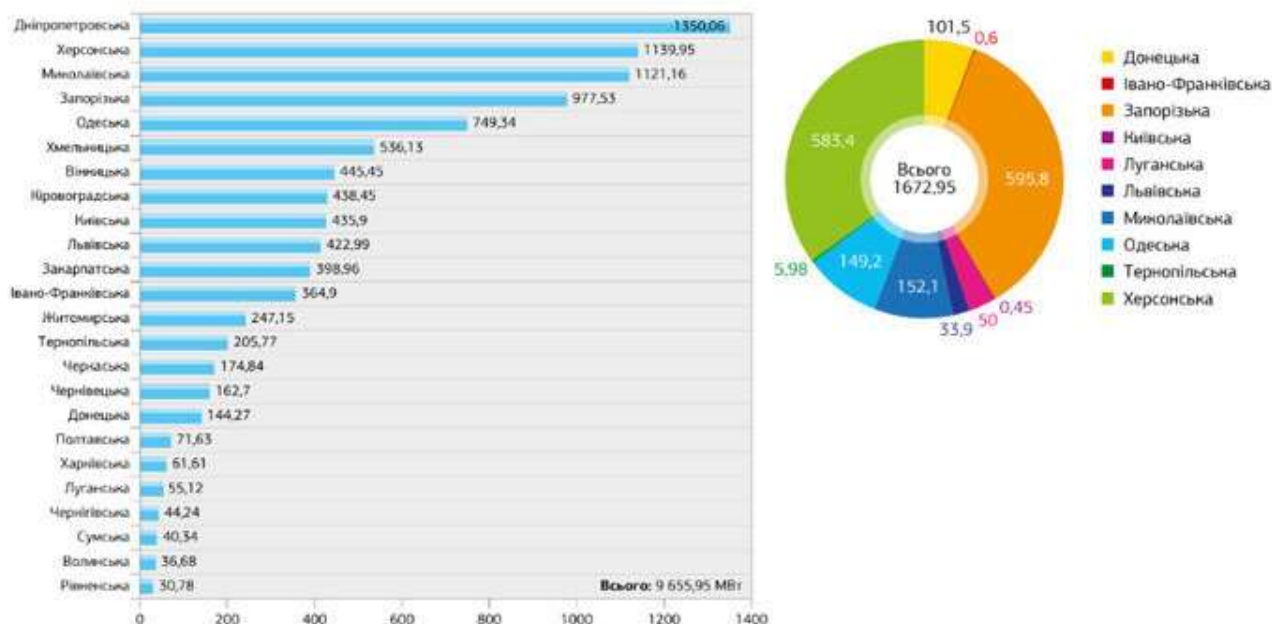


Рисунок 1.2.3 Встановлена потужність ВДЕ за областями материкової частини України станом на 2021 рік, МВт. Кругова діаграма: встановлена вітроенергетична потужність, МВт. Джерело: ГС «УВЕА», НКРЕКП, 2021

### 1.3 Стан ВЕС України під час війни з РФ. План відновлення відновлювальної енергетики.

Нажаль через початок війни з російськими загарбниками, всі іноземні інвестиції у 2022 році призупинились. З перших же годин після вторгнення у 2022 році російські війська почали масовано обстрілювати не лише українські міста і селища, але й досі намагаються знищити критичні об'єкти енергетичної інфраструктури (рис.1.3.1): високовольтні мережі, трансформаторні підстанції, диспетчерські пункти, а також безпосередньо електростанції, включно з об'єктами відновлюваної енергетики. Загалом, після об'єктів атомної енергетики та ліній електропередачі, електростанції відновлюваної енергетики стали другими по пріоритетності знищення для російських загарбників. За різними оцінками експертів, станом на серпень 2022 року вже так чи інакше постраждало 30–40% ВДЕ електростанцій у цих регіонах або близько 1 120–1 500 МВт встановленої потужності.

					<b>КРБ.ЕТтаПЕ.1.495-03.4.1.</b>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		17



Рисунок 1.3.1 Пошкоджений вітрогенератор в результаті обстрілу з боку РФ у м. Очаків

За даними Української вітроенергетичної асоціації, з початку широкомасштабної війни в Україні зупинено понад 3/4 вітроенергетичних потужностей, тобто з загальних 1 673 МВт, наразі не працює близько 1 462 МВт українських ВЕС, а 5 вітрових турбін в Херсонській області, що встановлені на Мирненській, Сиваській та Новотроїцькій вітроелектростанціях, сьогодні є знищеними.

Через пошкодження 330 кВт лінії електропередачі в Мелітополі не працюють також майже 600 МВт вітроенергетичних потужностей у Запорізькій області. Окрім вище зазначених фінансових проблем, національний вітроенергетичний сектор з ВДЕ стикнувся ще й з неможливістю добудови деяких вітрових електростанцій. За розрахунками УВЕА, у 2022 році в Україні мало бути введено в експлуатацію 800 МВт нових вітроенергетичних потужностей. Усі ці проекти отримали дозволи на приєднання до енергомережі, компанії уклали договори купівлі-продажу електроенергії за «зеленим» тарифом, та договори на постачання вітроенергетичного обладнання з виробниками обладнання, деякі навіть встигли завезти вітротурбіни на майданчики ВЕС. Проте у зв'язку з початком широкомасштабних бойових дій та окупації частини території України, будівництво вітростанцій було призупинене.

План відновлення України [3] до 2032 року не встановлює конкретних цілей з розвитку офшорної вітроенергетики, тобто ВЕС морського базування. В той самий час треба зазначити, що за даними Світового банку (рис.1.3.2), Україна володіє одним із найкращих технічних потенціалів з розвитку офшорної вітроенергетики в Чорному морі серед усіх країн Чорноморського регіону. Теоретичний технічний потенціал офшорної вітроенергетики в Чорному морі та на мілководді України становить аж 250 ГВт, коли загальний теоретичний потенціал всіх Чорноморських країн складає 435 ГВт.

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		19

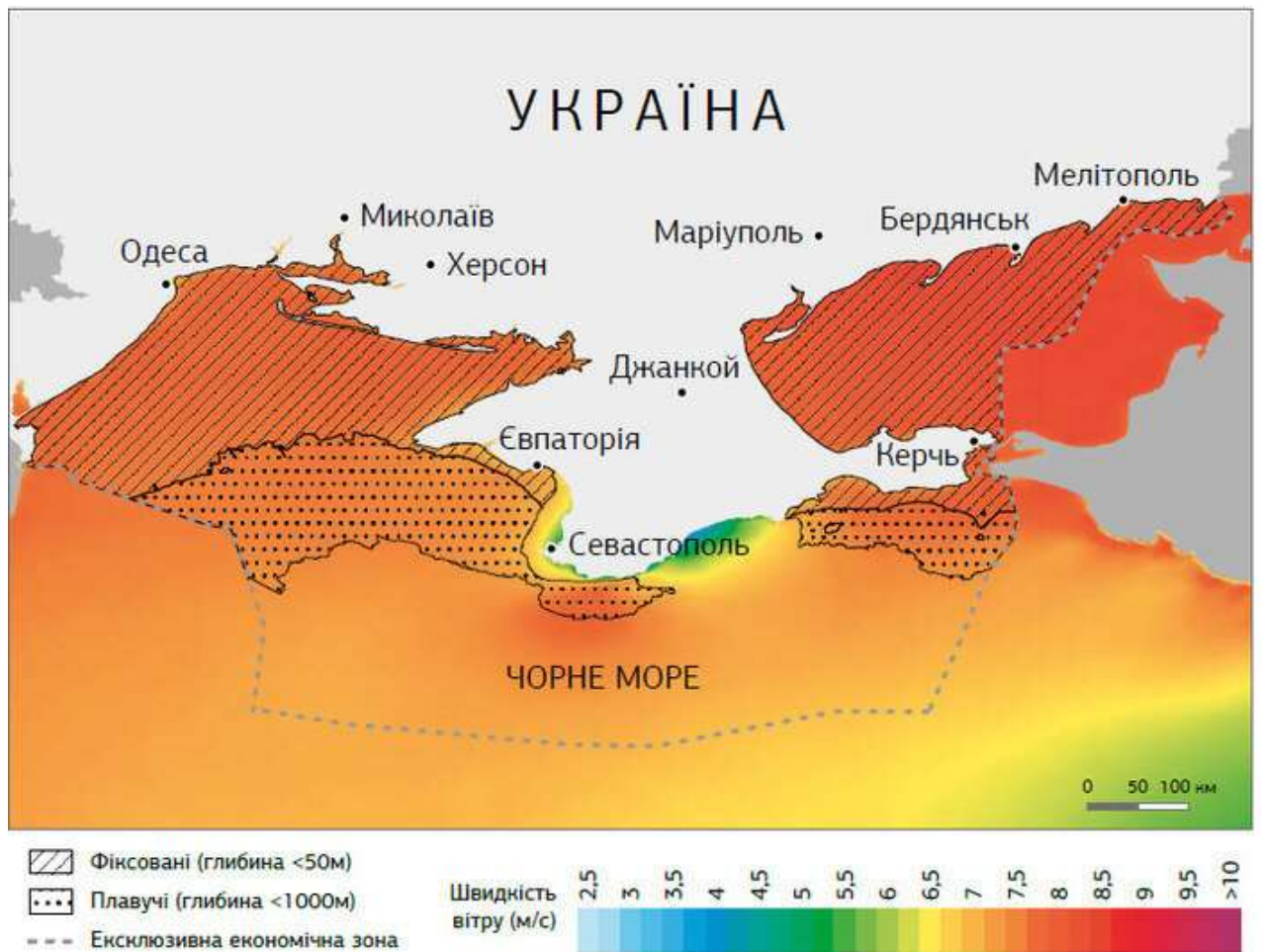


Рисунок 1.3.2 Потенціал офшорної вітроенергетики України. Джерело: Світовий Банк, 2020

Зважаючи на досвід країн-членів ЄС та Енергетичного Співтовариства, які мають вихід до Чорного моря та демонструють високі показники розвитку вітрової енергетики й скорочення викидів парникових газів, запуск ринку офшорної вітроенергетики в Україні є одним із кращих варіантів прискорення досягнення цілей Європейського Зеленого Курсу та RePowerEU. До того ж, офшорні ВЕС можуть бути ефективними і без підключення до загальної енергомережі. Як вже було сказано вище, більша частина сонячних і вітрових енергооб'єктів сконцентрована на Півдні України, відповідно дана частина України вже є технічно обмеженою для підключення нових енергооб'єктів до загальної енергомережі, надлишок яких може призвести до збою її роботи. Перевагою офшорних ВЕС є можливість їх автономної роботи або у вигляді інтерконектору між країнами морського регіону Туреччиною, Румунією,

						<i>КРБ.ЕТтаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			20

Болгарією, Грузією та Україною, або для генерації електроенергії для виробництва відновлюваного водню. Загалом же, відповідно до розрахунків, усього теоретичного технічного потенціалу офшорної вітроенергетики України достатньо для середньорічного виробництва 19.5 млн т відновлюваного водню методом електролізу.

					<i>КРБ.ЕТтаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		21

## 2 ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА.

### 2.1 Історія виникнення

В цьому розділі розглянемо історію використання енергії вітру. Одним з найперших винаходів використання вітру було вітрило десь у 5-му тисячолітті до н.е., а вже у першому сторіччі до нашої ери давньогрецький вчений Герон Александрійський винайшов вітряк, що керував органом.

Перші в світі вітряні млини (рис.2.1.1) були винайдені в Персії приблизно в V столітті н. е. Дерев'яні конструкції з довгим вертикальним карданним валом і вітрилами з очерету або тканини стали широко застосовуватися як при виробництві цукрової тростини, так і в житлових будинках. Ідея отримала широке розповсюдження по всьому Близькому Сходу і Азії, а потім поширилася і в Європу. При цьому в Ірані досі працює одна з найдавніших систем перських вітряних млинів: створена вона була в VII—X ст. Млини знаходяться в місті Наштіфан (Nashtifan), в 30 кілометрах від кордону з Афганістаном. Для цього регіону характерні сильні вітри — до 119 км/ч. Про це нагадує і назва населеного пункту: Nish Toofan перекладається як «жало шторму». З давніх часів тут залишилося близько 30 вітряків висотою до 20 метрів. Для їхнього будівництва використовувалася деревина в поєднанні з глиною та соломою. Кожен з вітряних млинів складається з восьми обертових камер з шістьма лопатями. Обертаючись під дією сили вітру, лопаті приводять в дію головну вісь, а створювані при цьому вібрації зсувають зерна до дробилок. Енергії, яка виробляється при цьому, не вистачило б і на одну лампочку, але із завданням помолу зерна млини справляються успішно.

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		22



Рисунок 2.1.1 Перші вітряні млини Іран м.Наштіфан (Nashtifan)

В нашій державі теж збереглися старовинні вітряні млини. Вітряк в Клепачах (рис.2.1.2) височить уже понад півтора століття (1864 р.). Висота вітряка – 12 метрів. А розмах крил – 16. Усередині – 2 поверхи.

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		23



**Споруда вітряка на краю села Клепачі, що на колишній Славутчині, як вартовий. Такий собі зачарований велет з позаминулого століття. На Хмельниччині такі вітряки – величезна рідкість, бо є всього два. І обидва в Шепетівському районі: в Клепачах та в Гуті.**

Рисунок 2.1.2 Вітряк в с. Клепачі. Україна

Вітряк, до речі, обертася на 360 градусів. За допомогою 15-метрової колоди вітряк повертали у різні боки – ловили вітер в залежності від його напрямку. Усе продумано так, щоб вітряк могла обслуговувати одна людина – мірошник.

Завдяки різноманітному ландшафту нашої країни, і чорному та азовському морю вітропродуктивність (рис.2.1.3) в різних областях країни дуже різна. Сама велика продуктивність знаходиться в південних і південно-східних областях.

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		24



Середньомісячні швидкості вітру (м/с)



Рисунок 2.1.3 Карта швидкості вітрів в Україні на висоті 10 м (січень)

Силу вітру визначають по шкалі Бофорта. Шкала була розроблена британським метеорологом Френсісом Бофортом у 1805 році і поступово модифікувалась з часом. На даний момент шкала Бофорта використовується в більшості країн світу. Шкала Бофорта має 12 рівнів (рис.2.1.4), які описують швидкість вітру від безвітря до урагану. Рівні шкали визначаються на основі спостережень за визначеними елементами, такими як швидкість вітру, сила хвиль, хмарність та інші.

Сила вітру, бали	Швидкість вітру, м/сек	Характеристика	Дія вітру
0	< 0.3	Штиль	Повна відсутність вітру. Дим піднімається прямовисто. Листя дерев нерухоме.
1	0.3–1.5	Тихий	Дим «пливе». Флюгер не обертається.
2	1.6–3.4	Легкий	Рух повітря відчувається обличчям. Шелестить листя. Флюгер обертається.
3	3.4–5.4	Слабкий	Тріпоче листя, хитаються дрібні гілки. Майорять прапори.
4	5.5–7.9	Помірний	Хитаються тонкі гілки дерев. Вітер піднімає пил та шматки паперу.
5	8.0–10.7	Свіжий	Хитаються великі гілки. На воді з'являються хвилі.
6	10.8–13.8	Сильний	Хитаються великі гілки
7	13.9–17.1	Міцний	Хитаються невеликі стовбури дерев. На морі здіймаються хвилі, що піняться.
8	17.2–20.7	Дуже міцний	Ламаються гілки дерев, важко йти проти вітру.
9	20.8–24.4	Шторм	Невеликі руйнування. Зриває черепицю, руйнує димарі
10	24.5–28.4	Сильний шторм	Значні руйнування. Дереву вириваються з корінням
11	28.5–32.6	Жорстокий шторм	Великі руйнування
12	≥ 32.7	Ураган	Призводить до спустошень

Рисунок 2.1.4 Сила вітру за шкалою Бофорта

Зі збільшенням висоти вплив землі на лінійність вітрового потоку знижується, і швидкість вітрового потоку зростає (рис. 2.1.5).

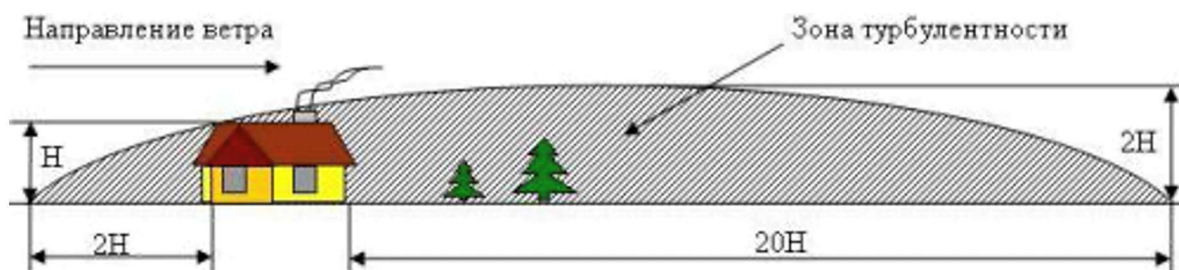


Рисунок 2.1.5 Вплив земної поверхні на лінійність вітрового потоку

Швидкість вітру на поверхні Землі дорівнює нулю (рис.2.1.5), а потім, зі збільшенням висоти до 100 метрів, зростає приблизно за логарифмічною залежністю:

$$v_h = v_{10} \left( \frac{h}{10} \right)^b$$

де  $v_h$  - швидкість вітру на висоті  $h$ , м / с;

$v_{10}$  – швидкість вітру висоті 10 м, м/с;

$h$  – висота, м;

$b$  – емпіричний коефіцієнт для даної місцевості.

Для відкритої місцевості  $b \approx 0,14$

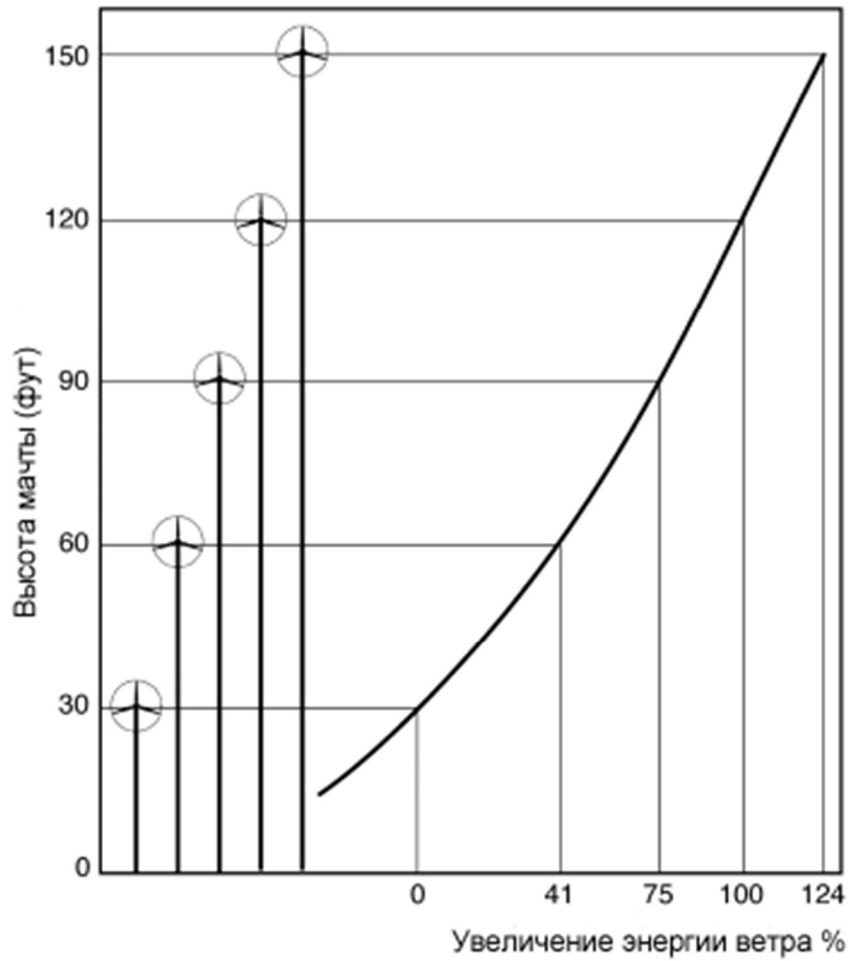


Рисунок 2.1.5 – Залежність вітрової енергії від висоти щогли

## 2.2 Сучасні вітрогенератори

В сучасному світі існують два основних типи вітротурбін: з вертикальною віссю обертання та з горизонтальною віссю обертання. Останні бувають швидкохідними з малим числом лопатей та тихохідними багатолопатевиими.

Вітрові турбіни - це пристрої, які перетворюють кінетичну енергію вітру в електричну. Вони стають все більш популярним видом відновлюваної енергії, і їх використання швидко зростає в усьому світі. Існує два основних типи вітрових турбін: з горизонтальною віссю обертання та з вертикальною віссю обертання. У цьому розділі ми обговоримо різні типи вітрових турбін з кожною віссю обертання.

Вітрові турбіни з горизонтальною віссю (НAWT) є найбільш часто використовуваними вітровими турбінами. Лопаті цих турбін обертаються навколо горизонтальної осі, перпендикулярної до напрямку вітру. Зазвичай вони високі та стрункі, з трьома або більше лопатями (рис 2.2.1).

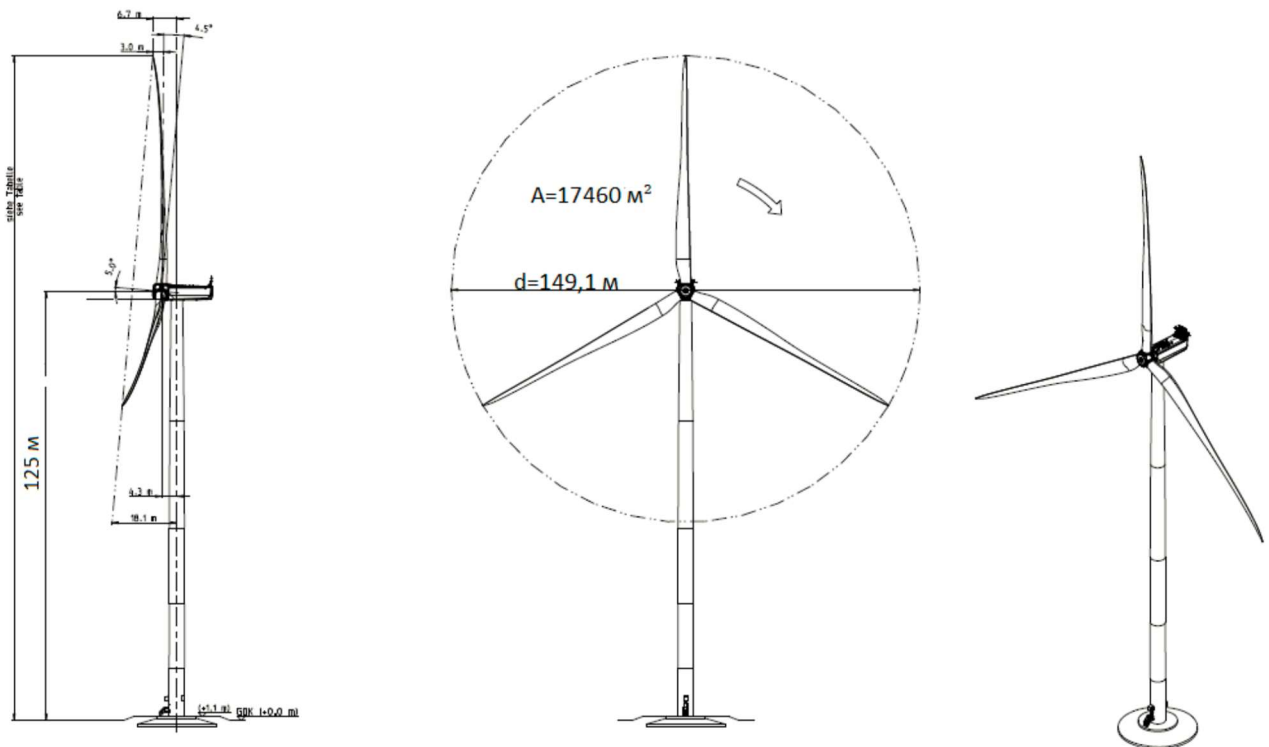


Рисунок 2.2.1. Вітрогенератор (НAWT) фірми Nordex з тубиною N149 потужністю 4,5 мВт.

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		28

У HAWT використовуються різні конструкції лез, включаючи традиційні плоскі леза, вигнуті леза та кручені леза. Кожна конструкція має свої переваги та недоліки, залежно від конкретних вітрових умов та вимог до потужності.

Вітрові турбіни з вертикальною віссю (рис.2.2.2). Лопаті вітрових турбін з вертикальною віссю (VAWT) обертаються навколо вертикальної осі. Ці турбіни, як правило, коротші та ширші, ніж HAWT, з лопатями, прикріпленими до ротора з обох кінців. Існує два основних типи VAWT: Дар'є та Савоніус.

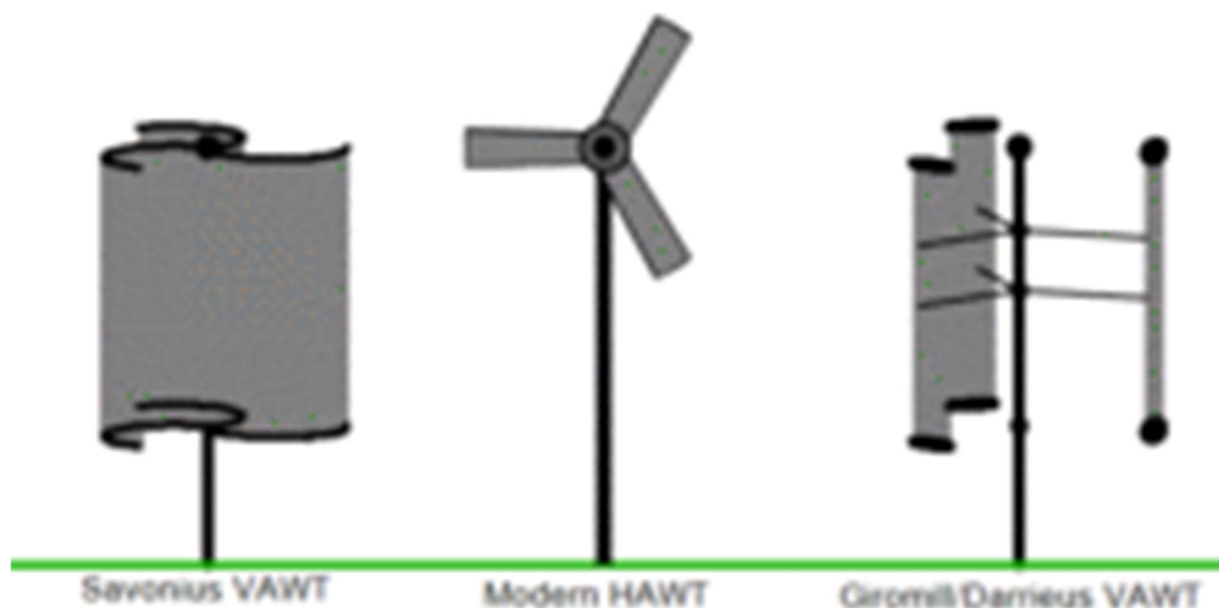


Рисунок 2.2.2 Вітрогенератори типу Дар'є та Савоніус в порівнянні з сучасним вітрогенератором HAWT

Турбіна Савоніуса має ротор у формі спіралі і зазвичай більша за турбіну Дар'є. Він більш ефективний при вищих швидкостях вітру, але має менший пусковий момент. Турбіна Дар'є, навпаки, має простішу конструкцію і може почати обертатися при низькій швидкості вітру. Однак вона менш ефективна, ніж турбіна Савоніуса при більших швидкостях вітру.

Існують також гібридні конструкції VAWT, які поєднують переваги турбін Дар'є та Савоніуса. Ці конструкції спрямовані на підвищення ефективності та надійності VAWT, мінімізуючи їхні недоліки.

Вітряні турбіни є чудовим джерелом відновлюваної енергії, яке може допомогти зменшити нашу залежність від викопного палива. Вони бувають різних конструкцій, у кожного з яких є свої переваги та недоліки. HAWT є найбільш часто використовуваною вітровою турбіною, тоді як VAWT набирає популярності завдяки своїй нижчій вартості та простішій конструкції. Вибір правильного типу вітрової турбіни залежить від різних факторів, таких як вітрові умови, вимоги до потужності та бюджет.

Єдина важлива вимога для ВЕУ – високий середньорічний рівень вітру. Потужність сучасних вітрогенераторів сягає 8 МВт.

Потужність вітрогенератора залежить від потужності повітряного потоку ( $N$ ), що визначається густиною повітря  $\rho$ , швидкістю вітру  $v$  і площею  $S$ , що омитається :

$$P_{\text{ВЕУ}} = C_p \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot v^3}{2} \cdot \eta_{\text{ген}}$$

Другим найважливішим параметром ВЕУ є коефіцієнт швидкості  $Z$  (рис 2.2.3), який є відношенням окружної швидкості кінців лопатей до швидкості вітру:

$$Z = \frac{\omega \cdot R}{v} = \frac{u}{v}$$

Тут  $R$  – радіус кола, яке описують кінці лопатей,  $\omega$  – кутова частота,  $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$ ,

$u$  – окружна швидкість на кінцях лопатей,  $u = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}$ ,

$n$  – частота обертання, об/хв;  $D$  – діаметр вітроколеса, м.

$$Z = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot v}$$

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		30

В цьому рівнянні два невідомі: коефіцієнт швидкості  $Z$  та окружна швидкість

$$u = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}$$

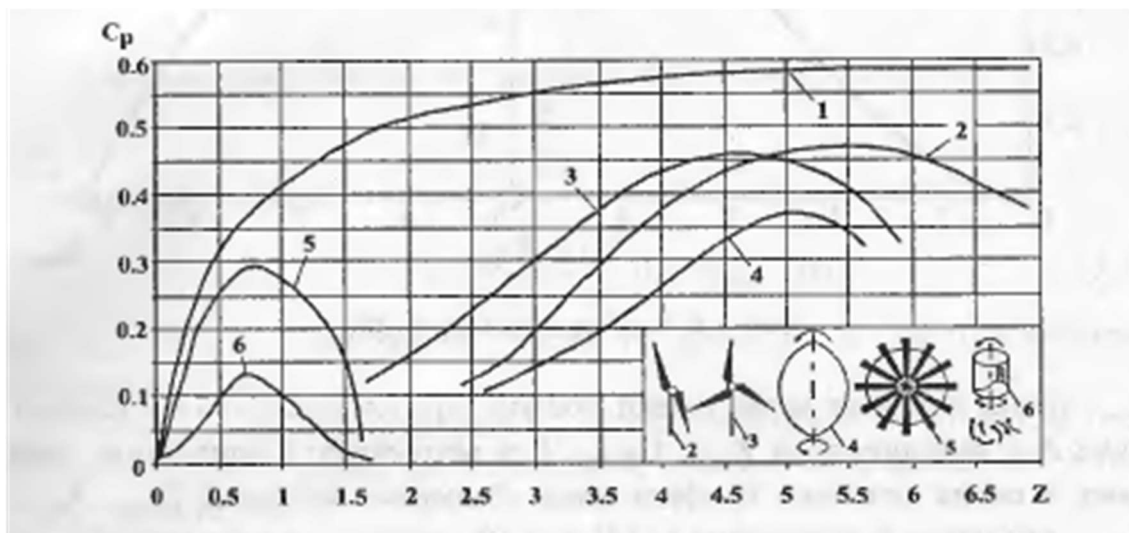


Рисунок 2.2.3 – Залежність коефіцієнта використання енергії вітру  $C_p$  від швидкості  $Z$ : 1 – ідеальна ефективність турбіни пропелерного типу; 2 – високошвидкісна дволопатєва турбіна «пропелер»; 3 – трилопатєвий «пропелер»; 4 – вертикально-осьова турбіна типу «Дар'є»; 5 – багатолопатєвий вітронасос; 6 – ротор Савоніуса

Сучасний вітрогенератор (вітроелектрична установка або скорочено ВЕУ, вітряк) — пристрій для перетворення кінетичної енергії вітрового потоку на механічну енергію обертання ротора з подальшим її перетворенням на електричну енергію за допомогою генератора (рис. 2.2.4).

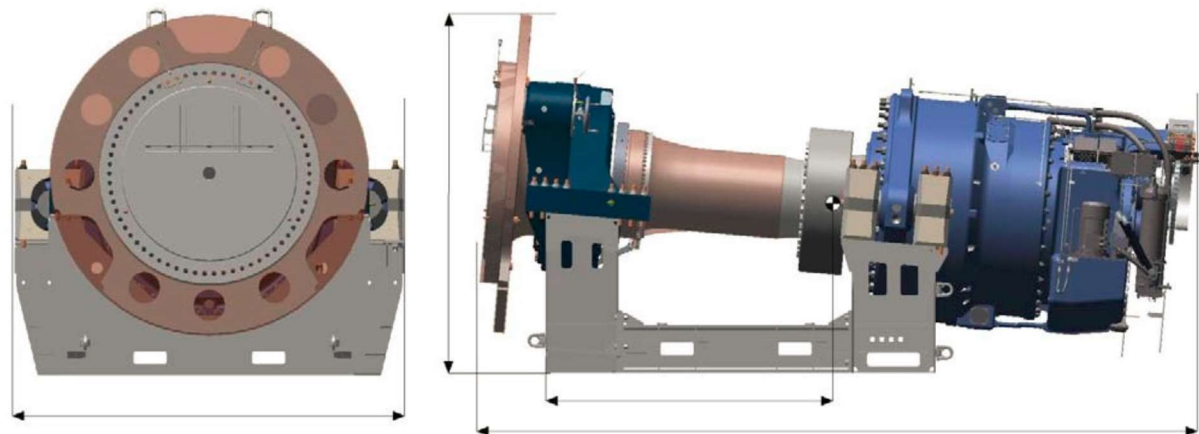


Рисунок 2.2.4 Генератор вітрової турбіни Nordex N149

Вітрогенератори зазвичай мають три лопаті, щоб знайти компроміс між крутним моментом і швидкістю обертання. Кількість лопатей впливає на висоту крутного моменту і швидкість обертання. Збільшення кількості лопатей підвищує крутний момент, але знижує швидкість обертання через збільшення лобового опору. Якщо залишити дві лопаті, вітрогенератор буде обертатися дуже швидко, але з недостатнім крутним моментом, що може призвести до проблем зі шумом та вібрацією, що зношують конструкцію. Кожна додаткова лопать збільшує загальний опір вітрового колеса, що робить вихід на робочі обороти генератора складнішим. Таким чином, багатолопатеві установки можуть починати обертатися при менших швидкостях вітру, але вони не ефективні для вироблення електроенергії, оскільки використання багатьох лопатей ускладнює конструкцію і знижує надійність. Редуктор на вітрогенераторі з багатьма лопатями також не рекомендується, оскільки це ускладнює конструкцію і зменшує надійність.

Продуктивність вітрогенератора визначають за Законом Беца він був відкритий у 1919 року німецьким фізиком Альбертом Бецем який визначає максимальну потужність вітрогенератора при заданій швидкості вітру та площі ротора.. Відповідно до цього закону, вітрогенератор може забрати не більше 59,3% потужності падаючого на нього вітрового потоку. Потужність сучасних промислових ВЕУ досягає 80 – 85 % від розрахованої Бецем.

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		32

### 2.3 Використання акумуляторів енергії для ВЕУ, переваги різних видів при використанні.

Відновлювальні джерела енергії не можуть бути прогнозованими на великий проміжок часу тому, що сонячна фотоелектрична електростанція не виробляє електроенергію вночі або за поганих погодних умов, вітрова електростанція не працює при низькій або надзвичайно високій швидкості вітру тощо. Крім того, енергія, вироблена відновлюваними джерелами, не завжди відповідає енергії, яку вимагає навантаження. Отже, існують часові вікна, в яких є надлишок енергії, який буде втрачено. Таким чином, для повного використання відновлюваних джерел енергії єдиним ефективним методом є накопичення додаткової енергії для подальшого використання, коли це буде потрібно. Ця тема широко висвітлювалася в літературі. Зокрема, накопичення енергії з особливим акцентом на відновлювані джерела було проаналізовано у роботі [3].

В електроенергетиці можуть використовуватись численні технології накопичення енергії, які, зазвичай поділяються на шість груп:

- електричні,
- механічні,
- електрохімічні,
- термохімічні,
- хімічні
- теплові.

Залежно від форми зберігання та характеристик її видачі в мережу, СНЕ(системи накопичення енергії) може виконувати безліч функцій на ринку електричної енергії [4]. Технології накопичення енергії мають різні функціональні можливості та сфери застосування, які залежать від їхніх характеристик. Одна з груп характеристик визначається номінальними значеннями потужності та енергії. Номінальна потужність визначає швидкість заряду та розряду, тоді як номінальна енергія показує тривалість розряду.

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		33

Динамічні характеристики оцінюються за часом відгуку та швидкістю зміни параметрів накопичувача.

Час відгуку - це період, за який накопичена енергія переходить зі стану нульового розряду до повного розряду, а швидкість зміни - швидкість, з якою вихідна потужність може змінюватися.

Габаритні характеристики є важливим показником при використанні систем накопичення енергії в розподільних системах, та залежать від потужності накопичувача та густини енергії.

До основних характеристик СНЕ, які принциповим чином впливають на вибір СНЕ в розподільних системах, відносять.

Щільність потужності (англ. *power density*) (Вт/кг або Вт/л) – це номінальна вихідна потужність, поділена на об'єм акумуляючого пристрою.

Щільність енергії (англ. *energy density*) розраховується як накопичена енергія поділена на об'єм.

При цьому об'єм накопичувача – це обсяг усієї СНЕ, включаючи сам накопичувальний елемент, аксесуари та відповідні конструкції, а також перетворювальну систему.

Загальна ефективність системи зберігання – це кількість енергії, яка виходить із системи по відношенню до кількості енергії накопиченої в ній. Для накопичувачів, які використовуються дуже часто що має місце в розподільних системах, надзвичайно важливо мати коефіцієнт корисної дії (ККД) понад 80 % через втрати енергії у кожному циклі.

Тривалість розряду – це час, протягом якого накопичувач може розряджатися при номінальній вихідній потужності без підзарядки. Деякі типи систем зберігання можуть розряджатися з відносно високою швидкістю протягом досить коротких періодів часу, але їхня ефективність у цих випадках нижча. Наприклад, накопичувач може працювати при номінальній потужності 1 МВт

протягом трьох годин при ККД 80 %; та ж установка може забезпечити 1,5 МВт протягом 10 хвилин при ККД 65 %.

Життєвий цикл накопичувача. Тією чи іншою мірою більшість накопичувачів енергії деградує у міру використання (тобто під час кожного циклу заряду-розряду), а також у залежності від глибини розрядки. Швидкість деградації залежить від технології зберігання енергії, умов експлуатації й інших змінних. Цей показник є особливо важливим для електрохімічних батарей, для яких неглибокий розряд менш чутливий у порівнянні з глибоким розрядом.

Час відгуку (англ. *Response Time*) – це час, необхідний для переходу від повної відсутності розряду до розряду при номінальній вихідній потужності. Як правило, час відгуку накопичувача маленький на відміну від деяких типів генерації, яким потрібно у більшості випадків не менше декількох хвилин, перш ніж вийти на повну потужність, наприклад, для турбін внутрішнього згорання. В ідеалі накопичувач має працювати з максимальною ефективністю та номінальним часом відгуку за будь-якого рівня заряду.

Важливою характеристикою системи зберігання для деяких додатків є швидкість лінійної зміни розряду (англ. *Ramp Rate*) – швидкість, з якою може змінюватися її вихідна потужність. Як правило, швидкість наростання потужності накопичувача дуже висока, від мілісекунд до декількох секунд для її зміни від нуля до максимального значення, у залежності від технології.

Швидкість зарядки (англ. *Charge Rate*) – це швидкість, з якою можна заряджати накопичувач. Якщо накопичувач не зможе досить швидко заряджатися, йому не вистачить енергії для надання необхідної послуги. Наприклад, акумулятор найчастіше заряджається зі швидкістю, аналогічною швидкості його розрядки.

Час саморозряду (англ. *self discharge time*) – це час, протягом якого накопичувач зберігає свій заряд. Електрохімічні накопичувачі більш схильні до саморозряду через хімічні реакції, які в ньому відбуваються. Ця характеристика менш важлива у разі частого використання накопичувача. Для накопичувачів, які

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		35

використовуються нечасто (тобто переважно працюють в режимі очікування), цей критерій може бути дуже важливим.

Не має сумнівів, що впровадження СНЕ потребує значних інвестицій. Вибір правильної стратегії інвестування на основі очікуваного економічного ефекту є складним завданням. При цьому необхідно враховувати різні аспекти їх застосування, такі як технічні та економічні особливості різних технологій акумулювання енергії, ступінь їх зрілості для комерціалізації, вплив на довкілля, та задачі, які планується вирішувати за допомогою їх застосування. Зазначені характеристики різних СНЕ варіюються у занадто широкому діапазоні, тому числові значення не має сенсу наводити. У таблиці 2.3.1 та 2.3.2 наведено загальну інформацію про переваги та недоліки окремих технологій накопичення енергії, а також рекомендації щодо можливих сфер їх застосування, зокрема, у розподільних системах.

					<i>КРБ.ЕТтаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		36

Таблиця 2.3.1. переваги та недоліки окремих

технологій накопичення енергії

Технології	Переваги	Недоліки
<b>Електричні</b>		
Конденсатор	Швидкий час відгуку, велика кількість циклів	Низькі потужність, життєвий цикл та ефективність
Суперконденсатор	Великий життєвий цикл і висока ефективність	Низька енергетична щільність, токсичність
Надпровідні магнітні накопичувачі ( <i>SMES</i> )	Великі потужність і життєвий цикл та висока ефективність	Негативний вплив на здоров'я
<b>Механічні</b>		
Стиснене повітря ( <i>CAES</i> )	Велика потужність, низька питома вартість відносно потужності	Негативний вплив на оточуюче середовище
Гідроакумуляція ( <i>PHS</i> )	Велика потужність, низька питома вартість відносно потужності	Складність розміщення
Маховики ( <i>FES</i> )	Великі потужність та ефективність	Низька енергетична щільність
<b>Електрохімічні</b>		
Свинцево-кислотні	Низькі капітальні витрати	Низька енергетична щільність
<i>NaS</i>	Великі енергетична щільність та ефективність, майже відсутній саморозряд	Висока вартість, складність утилізації
Літій-іонні	Великі щільність потужності й енергії та висока ефективність	Складність утилізації в плані переробки літію
<i>NiCd</i>	Великі потужність, щільність потужності й енергії та висока ефективність	Висока токсичність
Ванадій-редокс батареї	Велика потужність	Низькі щільності потужності й енергії
<i>ZnBr</i>	Велика потужність	Висока вартість і низька енергетична щільність
<b>Хімічні</b>		
Паливні комірки	Практично нульовий саморозряд	Потреба заміні каталізатору

Таблиця 2.3.2 можливи сфери застосування СНЕ

Технології	Якість електроенергії	Інтеграція ВДЕ	Резервне електро-постачання	Зсув пікового навантаження	Підвищення однорідності графіків навантаження	Обертювий резерв	Розвиток електричних мереж	Регулювання напруги	Енергетичний менеджмент	Переміщення навантаження у часі
<b>Електричні</b>										
Конденсатор	+									
Суперконденсатор	+							±		
Надпровідні магнітні накопичувачі (SMES)	+	+				±		±		
<b>Механічні</b>										
Стиснене повітря (CAES)			±	+	+		+		+	+
Гідроакумуляція (PHS)			±	+	+		±		+	+
Маховики (FES)	+	+	±			±		±	±	
<b>Електрохімічні</b>										
Свинцево-кислотні	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
NaS	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Літій-іонні	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
NiCd	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ванадій-редокс батареї	±	+	+	±	±	±	±	+	+	±
ZnBr	±	+	+	±	±	±	±	+	+	±
<b>Хімічні</b>										
Паливні комірки	±	+	±	±	±	±	±		±	±

Потрібно чітко визначити та оцінити всі потенційні переваги використання СНЕ через їхню високу вартість. Окрім вартості технології накопичення енергії, необхідно знизити вартість допоміжного обладнання, монтажу, інтеграції та введення таких систем в експлуатацію, яка може досягати 60-70% від загальної вартості.

Для полегшення впровадження накопичувачів енергії, рекомендується розробити комплексний стандарт, який оцінюватиме та порівнюватиме якість і продуктивність різних технологій, допоможе користувачам обґрунтувати їх тип і параметри, а також знайти оптимальне розміщення для отримання максимальної вигоди.

### 3. ПНЕВМАТИЧНИЙ АКУМУЛЯТОР ЕНЕРГІЇ (CAES)

#### 3.1 Підземний акумулятор енергії на стисненому повітрі CAES

Серед усіх систем накопичення енергії технологія зберігання енергії на стисненому повітрі (CAES) виділяється високою надійністю, тривалим терміном служби, прийнятною енергоефективністю та зниженим впливом на навколишнє середовище [6]. Крім того, порівняно з ГЕС, CAES легше розмістити. Як правило, в системах CAES стиснене повітря зберігається в підземних кавернах, соляних куполах, або для меншого застосування, в резервуарах штучного тиску. Таким чином, великомасштабне застосування не підходить для ділянки без певної підземної географії. Ці системи, як правило, оснащені резервуарами постійного об'єму, що працюють у певному діапазоні тиску. Ця технологія називається ізохорною системою CAES. Отже, тиск накопиченого стисненого повітря змінюється при кожній операції (процеси заряджання/розрядження).

У ізохорних CAES є деякі недоліки: такі як, втрати великої кількості ексергії при регулюванні (дроселюванні) тиску повітря за допомогою редукційного клапана, стиснене повітря під високим тиском потрібно знизити перед процесом генерації, низький тиск також представляє проблему з точки зору ефективності розширювача. У зв'язку з цим треба звернути увагу, що тиск знижується в процесі розряду. З цих причин були вивчені ізобарні системи CAES. Ці системи дозволяють забезпечити таку саму вихідну потужність ізохорної системи CAES зі зменшенням обсягу накопичувача до 77%. Ізобарна технологія, очевидно, вимагає дуже глибокої каверни або дуже великої висоти резервуара для води, щоб отримати достатній гідростатичний тиск у стовпі води. Тому географічно вигідно розмістити систему CAES під водою. Ця остання технологія називається підводним CAES (UWCAES) і є похідною від зрілих технологій CAES.

Акумулятор на стисненому повітрі CAES працює за таким принципом: електроенергію з вітрової енергетичної установки подають на електродвигун, який приводить у дію компресор. Компресор стискає повітря, яке після цього охолоджується і зберігається у спеціальній печері під тиском 60-70 атмосфер [7]. Коли потрібно використати запасену енергію, повітря випускається з акумулятора, підігрівається і потім направляється в спеціальну газову турбину (детандер), де енергія стисненого та нагрітого повітря обертає лопаті турбіни. Вал турбіни з'єднаний з електричним генератором, який перетворює механічну енергію в електроенергію, що може бути подана в енергосистему (рис.3.1.1). Цей процес називається розкручуванням або розкомпресуванням повітря. За такими принципами працюють дві промислові установки CAES. Одна розташована у Німеччині в м. Хунторфф, друга у США в штаті Алабама.

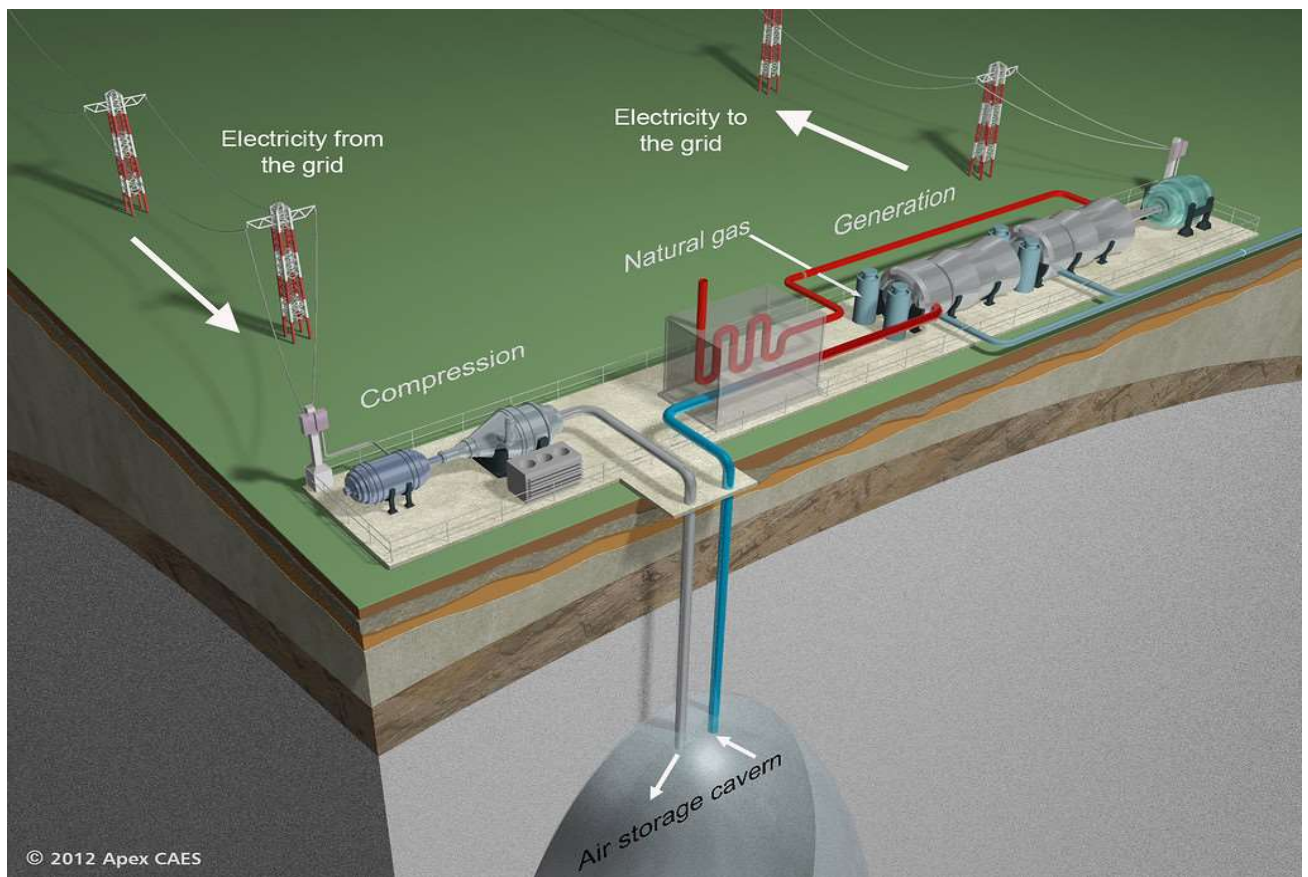


Рисунок 3.1.1 – Підземний пневмоакумулятор енергії CAES

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		40

Установка в Німеччині в Хунторф (рис.3.1.2) була побудована у 1978 році, розраховано сховище на 290 МВт (2 години роботи) у двох соляних печерах, розташованих на глибині 600...800 м з діапазоном тисків 50...70 атм. Спочатку сховище служило резервом енергії для промисловості північного заходу Німеччини, а зараз використовується для згладжування піків вироблення вітрових електростанцій.



Рисунок 3.1.2- Електростанція Хунторф.

Завод McIntosh – 2-й комерційний завод CAES (рис.3.1.3), який працює з 1991 року [8]. Подібно до заводу Huntorf, установка McIntosh Unit 1 зберігає стиснене повітря в соляній каверні, видобутій розчином. За допомогою компресорів повітря нагнітається та зберігається у природній соляній печері об'ємом 538 тис. кубічних метрів під тиском 77 атмосфер.

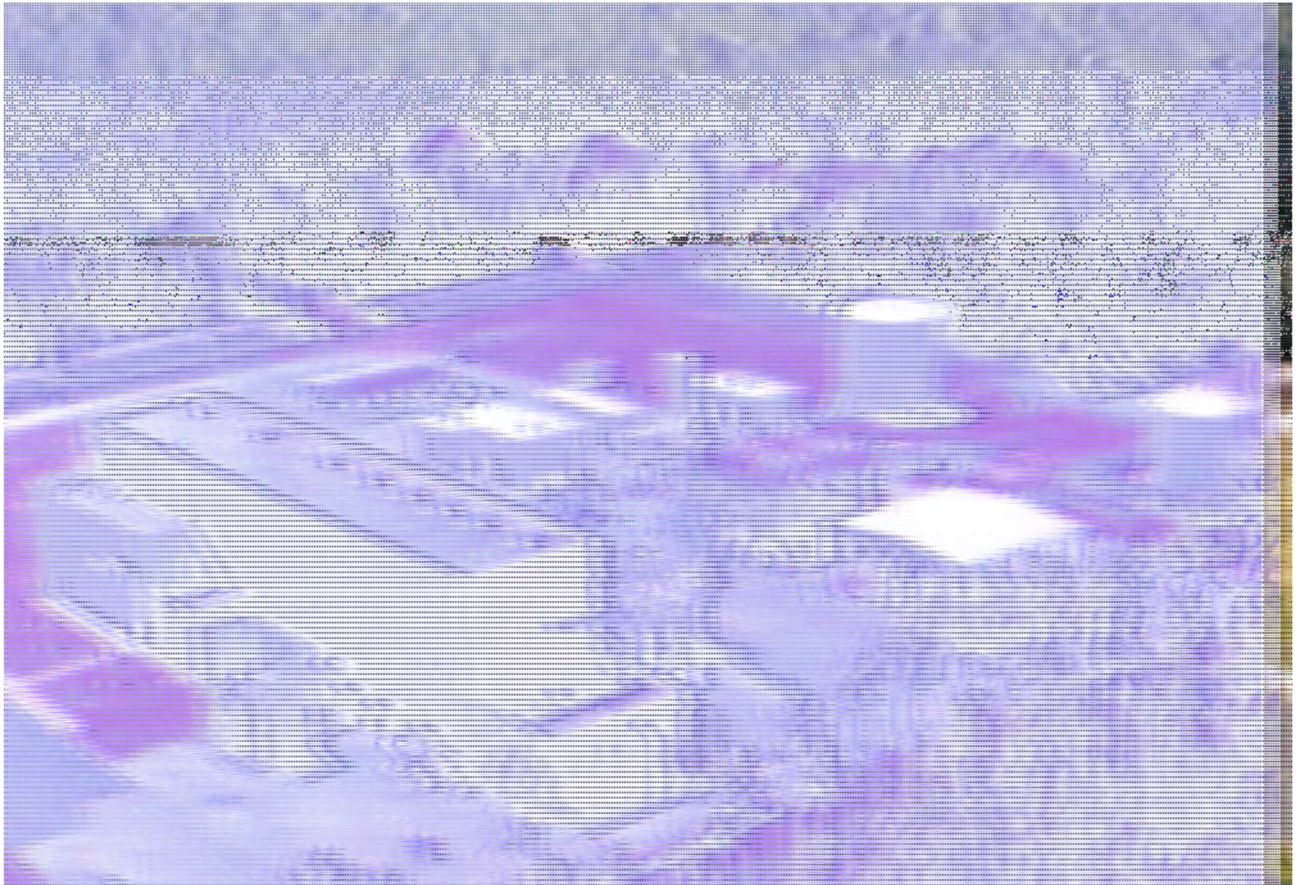


Рисунок 3.1.3- Завод McIntosh штат Алабама США

У разі несподіваного зростання споживання електроенергії в мережі, повітря вивільняється та надає потужність у систему. Час випорожнення резервуара до нижнього робочого тиску 46 атмосфер складає 26 годин, протягом яких станція видає 110 МВт потужності. Стиснене повітря подається у газову турбіну, що дозволяє зекономити значну частину енергії, оскільки зазвичай 2/3 потужності газової турбіни витрачається на привід компресора, який нагнітає повітря. Перед подачею в турбіну повітря підігрівається у теплоутилізаторі (рекуператорі) (рис.3.1.4) за рахунок продуктів згоряння, що допомагає підвищити ефективність процесу. Відзначають зниження витрати газу на 60...70% порівняно з традиційною газовою турбіною, швидкий запуск із

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		42

холодного стану (кілька хвилин) та гарну роботу на малих навантаженнях.

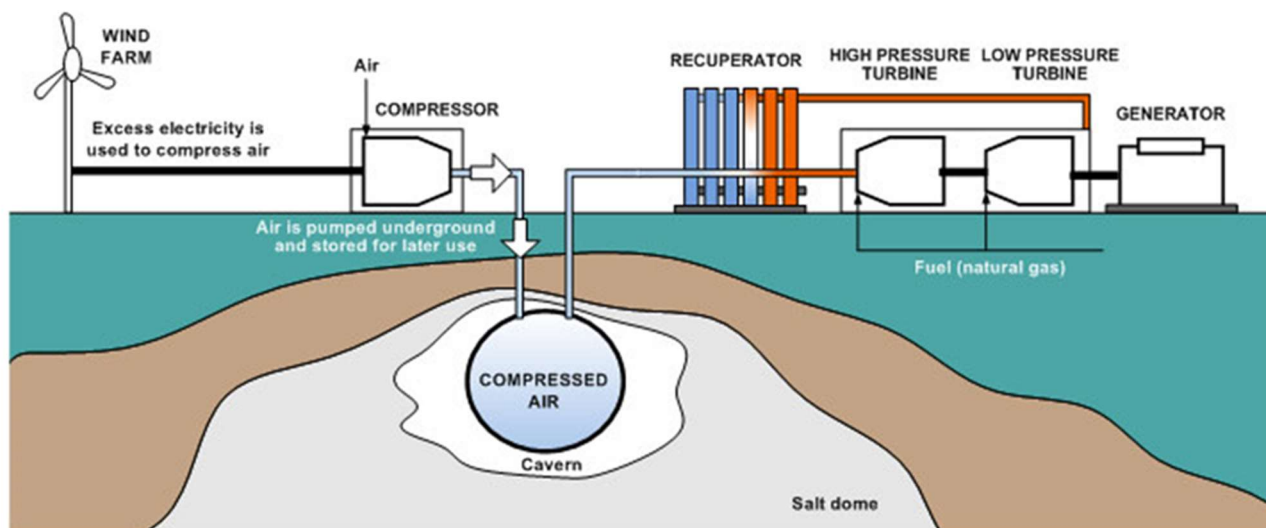


Рисунок 3.1.4 – Принципова схема пневматичного акумулятора енергії з рекуператором.

На Донбасі ще за часів СРСР планували облаштування у такій же печері пневматичного акумулятора на 1050 МВт; на жаль, доля його невідома.

Наводять загальний ККД таких станцій 41...53% і вказують, що вартість будівництва становить 360...650 \$/кВт і більше, залежно від того, використовується природна печера чи треба рити нову.

У деяких випадках в якості системи накопичення були перевірені надземні трубопроводи і були отримані кілька обнадійливих результатів. Технологія трубопроводів також була застосована в деяких великих проектах, таких як проект доставки газу Захід-Схід у Китаї. Порівняно з будівництвом резервуару для зберігання повітря під високим тиском метод сталевих трубопроводів може значно знизити вартість системи, що має велике значення для комерційного використання техніки CAES на місці навіть без каверни. Робочий тиск системи CSHC-100 NSF-CAES становить 8 МПа. Ця система підтвердила інженерну можливість застосування технології зберігання повітря на основі трубопровода.

Очевидно, що витрати на систему вищі, але її можна розташувати в будь-якому обраному розробником місці, тоді як підземні сховища потребують

особливих геологічних формацій (соляних печер, водоносних горизонтів, вичерпаних газових родовищ).

### 3.2 Підводний акумулятор енергії на стисненому повітрі UWCAES

Підземні каверни часто вважаються методом зберігання повітря за замовчуванням при обговоренні установок CAES. Заводи CAES у Хунторфі та Алабамі використовують цей метод зберігання, як і багато інших CAES.

Таке зберігання, як правило, ізохорне (з постійним об'ємом), що означає, що спорожнення частини повітря в сховищі зменшує тиск повітря, що залишилося. Тому розширювачі (детандери), що використовуються в ізохорній системі CAES, повинні працювати під різними тисками, що обмежує їх ефективність, оскільки вони не можуть бути оптимізовані для одного тиску. Стійкість каверни також обмежує діапазони робочого тиску, оскільки потрібен певний об'єм «подушки газу», щоб гарантувати, що каверни не зруйнуються.

Навпаки, ізобарне зберігання (з постійним тиском) дозволяє використати весь об'єм накопичувача за одного тиску, для якого можна оптимізувати детандер. Ізобарне зберігання може бути досягнуто на комбінованих гідро-CAES установках, де для підтримки постійного тиску використовується резервуар для води (рис.3.2.1). Однак більшість ізобаричних конструкцій сховища обертаються навколо того, що сховище розміщують глибоко під водою, в озері чи океані. Це відоме як накопичення енергії під водою на стисненому повітрі (UWCAES). В UWCAES кожні 10 метрів глибини води забезпечують приблизно 1 бар додаткового тиску на накопичувач. Заповнюючи резервуар повітрям з тиском, еквівалентним гідростатичному тиску, що створюється водою, самому резервуару не потрібно створювати жодної утримуючої сили.

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		44

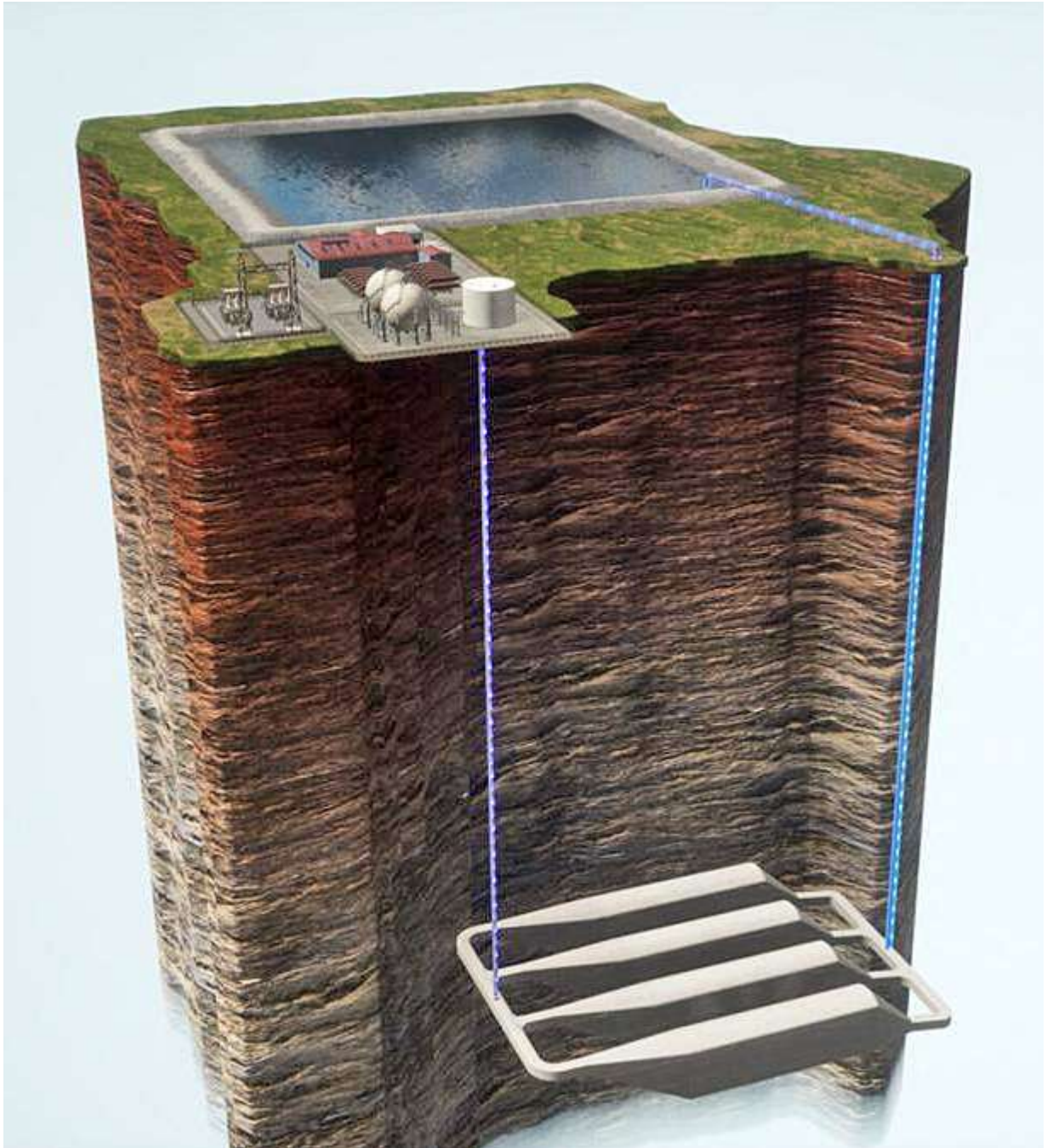


Рисунок 3.2.1 Комбінована установка гідро-CAES

### 3.3 Підводні бетонні сфери-акумулятори

Нещодавно в Німеччині була протестована нова система підводного накопичення енергії. Вчені з Інституту вітроенергетики та енергетичних систем Фраунгофера (Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik) [9] встановили на дні озера Бодензее бетонну сферу-акумулятор діаметром три метри на глибині приблизно 100 метрів. Згідно з проектом StEnSEA (Stored Energy in the Sea) (рис. 3.3.1), замість того, щоб запасати енергію, піднімаючи

воду, вона відкачується з бетонної сфери, на що витрачається енергія. Потім, коли енергія потрібна, вода під тиском заповнює бетонну сферу ззовні, обертаючи турбіни і виробляючи електрику. Ця акумуляторна система призначена для спільної роботи з морськими вітряними парками, які будуються в водоймах з стійкими вітрами, таких як Північне море та Балтійське море.

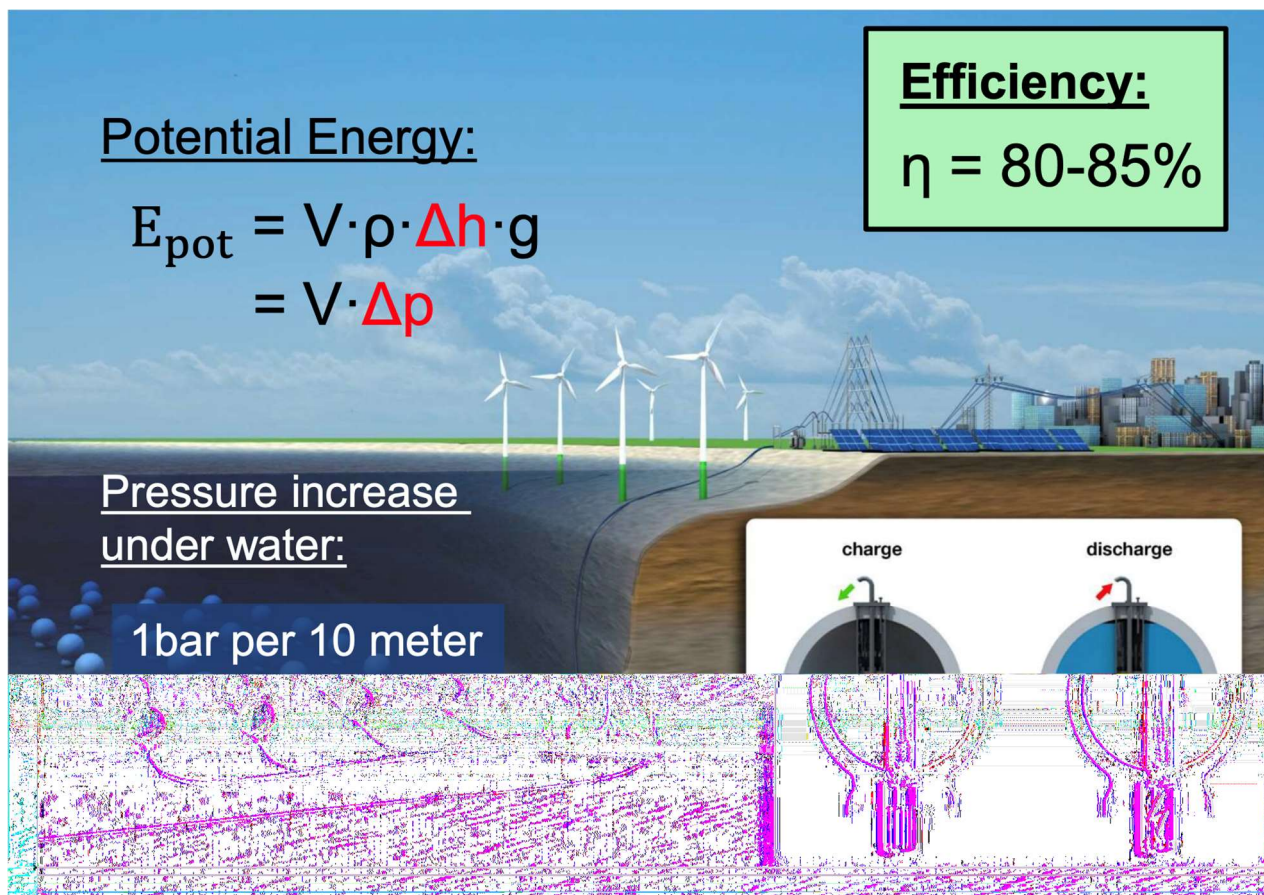


Рисунок 3.3.1 Принцип роботи проекту StEnSea

Підключення підводних електроакумуляторів до морських вітрогенераторів дозволить вирішити проблеми з піковим навантаженням, нічним недовантаженням та нестабільністю вітру. Система StEnSea [10] складається з двох головних компонентів: порожнистої бетонної сфери (рис.3.3.2) для зберігання та циліндричного технічного блоку з турбіною насоса, керованим клапаном та компонентами диспетчерського контролю та збору даних (SCADA). Технічний блок може бути легко від'єднаний та обслугований окремо.

Порожня сфера функціонує як заряджений накопичувач, і за допомогою регульованого клапана вода надходить через технічну частину в сферу, що призводить до роботи турбіни та генератора, які надають електроенергію до мережі. Це є фазою розрядки системи зберігання, а перезарядка досягається шляхом відкачування води зі сфери проти навколишнього тиску води за допомогою енергії з мережі.



Рисунок 3.3.2-Підготовка до підводного монтажу бетонної кулі

					КРБ.ЕТтаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		47

### 3.4 Підводні енергетичні мешки

У системі UWCAES стиснене повітря зазвичай зберігається в занурених розширюваних повітрянакопичувачах, розміщених на дні озер чи океанів, щоб використовувати гідростатичний тиск, що виникає внаслідок водяного стовпа. Акумулятори будуть розширюватися під час процесу заряджання та стискатися під час процесу розряджання залежно від кількості стисненого повітря, що зберігається в них. З точки зору механічного аспекту конструкції системи, налаштування подібні до адіабатичного CAES.

Резервуари для зберігання повітря для UWCAES можуть бути гнучкими або жорсткими, закріпленими на морському дні з фіксованою або змінною глибиною плавучості. Гнучкі підводні накопичувачі також відомі як енергетичні мішки (рис. 3.4.1). Всередині енергетичних мішків існує невелика різниця тиску, яка є максимальною у верхній частині посудини.

Енергетичні мішки (Energy Bags) — це армоване тросом тканинне судно, закріплене на морському дні на корисній глибині для ефективного зберігання енергії. Глибина, на якій закріплено судно, не впливає на напруги, які відчують матеріали в повністю надутій посудині, оскільки ці напруги тісно пов'язані з чистою плавучістю та диференціальним тиском, і обидва вони не залежать від глибини.



Рисунок 3.4.1-Енергетичний мешок

У порівнянні зі звичайним CAES, UWCAES має дві додаткові втрати: втрати, пов'язані з витоком із накопичувачів, і перепади тиску в трубопроводах. Щодо першого, прототипи сховищ підводних човнів показали втрати від витоків, що дорівнювали 1,2% на добу. Ці витoki, які відбуваються в основному в швах, можна зменшити за рахунок використання більш стійких матеріалів. Втрати перепаду тиску, з іншого боку, являють собою найбільші втрати установок UWCAES, які, однак, мають відносно низький вплив на вихідну потужність системи. Фактично, 1% втрати при 7,0 МПа спричиняє лише 0,24% втрати потужності електростанції.

Дослідники з Ноттінгемського університету під керівництвом професора Seamus Garvey представили вражаючу новинку - Energy Bag. Цей величезний надувний мішок, закорений на глибині біля Оркнейських островів (Шотландія), є ідеальним варіантом для зберігання енергії. Підводні мішки є

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		49

особливо привабливим рішенням, оскільки море можна розглядати як посудину під тиском, тому питоме енергонакопичення пневматичного акумулятора зростає пропорційно тиску. Це знижує витрати на повну інфраструктуру, адже є потрібними лише конструкційні матеріали, щоб утримувати мішок на дні. Що ще більш захоплююче - для розташування Energy Bag не потрібно жодного метра суші! Незалежно від того, повний або порожній контейнер, тиск залишається незмінним, що полегшує роботу обладнання на поверхні моря. Високі технічні характеристики і потужність Energy Bag дозволяють бути більш вигідним варіантом порівняно з попередніми ідеями.

Професор пояснює, що основною причиною, через яку ми не зберігаємо стиснене повітря в резервуарах під тиском на поверхні, є вартість такого рішення. Що ж стосується підводної системи накопичення енергії, за капітальними витратами на кВт•год, то UWCAES потенційно може стати найдешевшою. Зокрема, питомі капітальні витрати на ГАЕС зазвичай становлять понад 50 євро/кВт•год, а на електрохімічні акумулятори – навіть до 500 євро/кВт•год. а використання надводних кораблів для зберігання повітря високого тиску в системі CAES може призвести до витрат, які можна порівняти з використанням електрохімічних акумуляторів.

За рішенням професора Garvey для більшої ефективності системи UWCAES тепло яке утворилось при стесненні повітря може бути накопичене у спеціальному сховищі, що складається з 9 шарів. Зовнішні три шари в основному складаються з морської води і придатні для температури до 100°C, три інші містять теплоносій з мінеральних масел у пористому шарі подрібнених гірських порід і можуть використовуватися для температури до 250°C. Сіль може служити теплоносієм до 450 ° C. За такої системи накопичення тепла ККД може досягати 75–85%, що наразі є найвищим досягненням Energy Bag. Відмінністю від звичайних акумуляторів є відсутність ефекту саморозряду: пневматичний запірний клапан не споживає енергії. А коли необхідно витягнути накопичене, достатньо відкрити клапан, і вода сама витіснить повітря із шестисотметрової глибини.

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		50

Канадська компанія Thin Red Line спроектувала та виготовила накопичувачі повітря (рис. 3.4.2) для даного експерименту. Крім того, компанія також спеціалізується на виробництві тканин для аерокосмічної промисловості. Накопичувачі виготовлені з бутилового каучуку та обшиті зовнішнім шаром з поліефірної армованої тканини. Для забезпечення необхідної міцності конструкції використовується сталь із спеціальним покриттям або арамідні ремені. Кулі можуть бути різного розміру - від невеликих до кількох десятків метрів.



Рисунок 3.4.2-Головний інженер і генеральний директор Thin Red Line Aerospace Максим де Йонг перевіряє «енергетичний мішок» UW-CAES під час початкового випробувального надування

Розробники Energy Bag вважають, що цей проект може бути корисним для малих та середніх підприємств. Вартість такої системи на порівнянні з аварійним дизель-генератором, що працює під час блекауту та підвищує

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		
						51

вартість електроенергії, значно нижча. Розгортання подібних споруд доцільно у прибережних районах.

Компанія Thin Red Line не єдина, хто займається розробкою UWCAES. Засновник та головний технолог компанії Hydrostor Кемерон Льюїс (Cameron Lewis) також є автором ідеї використання підводних накопичувачів енергії (рис.3.4.3). Цікаво, що спочатку в планах Льюїса була установка гідроакумуляторної станції поруч з побудованим ним вітрогенератором. Проте проведені техніко-економічні розрахунки показали, що таке рішення виявиться малоефективним. Саме тоді і народилася ідея замінити воду, що піднімається на висоту, повітрям, яке стискається та закачується в еластичні кулі, заякорені на дні.

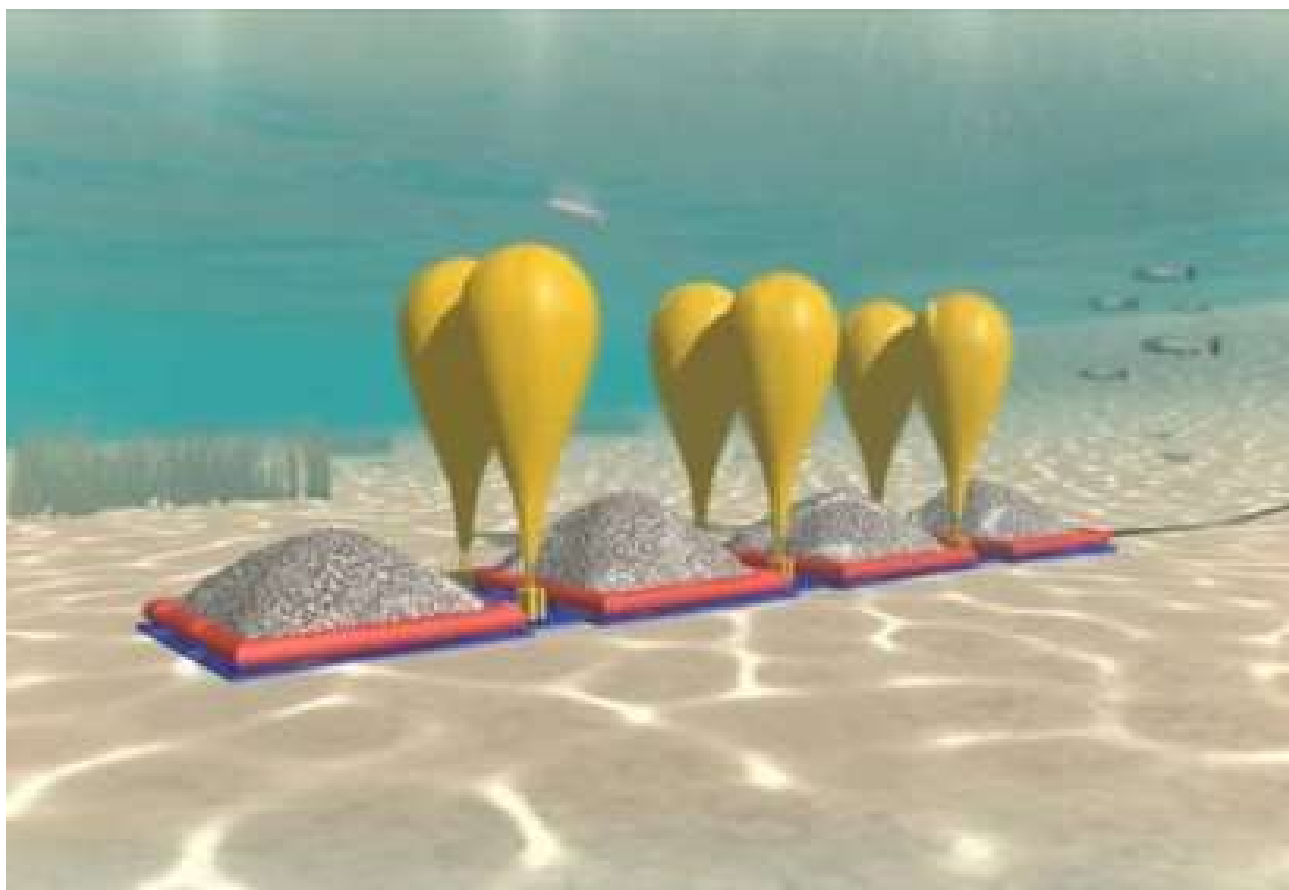


Рисунок 3.4.3 – Повітрянаповнені мішки з якірними платформами на дні водоймища по проекту Hydrostor/

Установка Underwater-CAES цього проекту [11] розрахована на пікову потужність наземної станції 660 кВт і включає комплекс із шести куль, що наповнюються стисненим повітрям. Такий накопичувальний комплекс

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		52

(рис. 3.4.3) у тандемі з генератором, як зазначають розробники, здатний забезпечити електроенергією 330 невеликих домашніх господарств. При цьому загальна площа підводної частини енергобази розташувалася на крихітній ділянці розміром 10 x 40 метрів. Відсутність рухомих частин розкриває ще одну серйозну перевагу такої технології – мінімальну потребу та вартість техобслуговування. Не створюють жодних проблем під час роботи і підводні течії. У звіті зазначається, що жодних обмежень, як за розмірами, так і потужністю, комплекси, реалізовані на базі такої технології, не припускають, що пояснюється відносно малою площею, яка займається на дні водойм. У той самий час технологічні розміри куль із повітрям визначаються, виходячи з глибини їх розміщення [12].

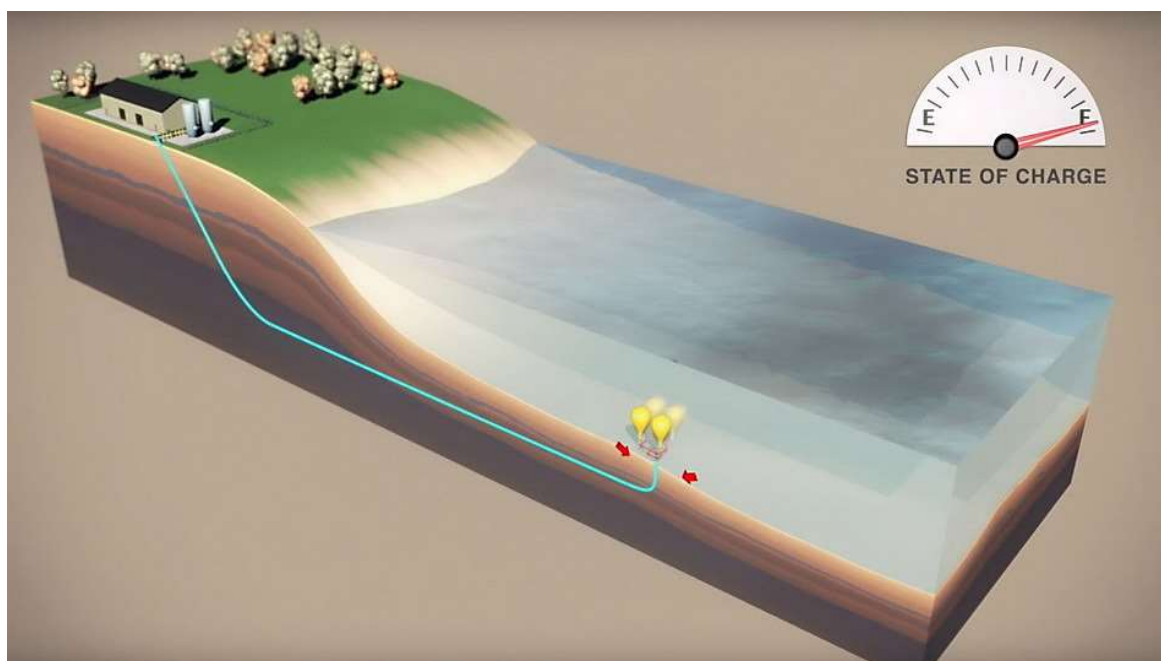


Рисунок 3.4.3- проект UWCAES компанії Hydrostor поблизу Торонто

Остаточна вартість реалізації проекту поки не обговорюється, але, як стверджують у компанії, установка Hydrostor Underwater-CAES буде вдвічі дешевшою за найпередовіші сховища, створені на базі літій-іонних акумуляторів. При цьому приємним бонусом виявляється довговічність системи, що вдвічі перевищує передбачуваний час її експлуатації.

У літературі про UWCAES немає жодних вказівок щодо витрат на експлуатацію та технічне обслуговування, ймовірно тому, що технологія ще не досягла повної промислової зрілості. Якщо витрати на експлуатацію та технічне

обслуговування станцій UWCAES будуть порівнянними або нижчими, ніж витрати на звичайні CAES, ця технологія може стати життєздатною альтернативою в портфоліо рішень для зберігання енергії.

### 3.5 Акумулятор тепла (рекупіратор).

Однією з головних проблем для CAES є підтримка високого рівня ефективності процесу накопичення та відновлення енергії. Ось тут і вступає в дію використання теплоаккумуляторів. Теплоаккумулятори використовуються для накопичення та рекуперації теплової енергії в процесі накопичення енергії, допомагаючи підвищити загальну ефективність. Далі ми розглянемо різні типи акумуляторів тепла для систем адіабатичного накопичення енергії стисненого повітря (ACAES).

Системи ACAES – це тип CAES, який використовує накопичення теплової енергії для підвищення енергоефективності (рис. 3.5.1). Під час процесу заряджання до стисненого повітря додається тепло, а під час процесу розрядження тепло відбирається від стисненого повітря.

					<i>КРБ.ЕТтаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		54

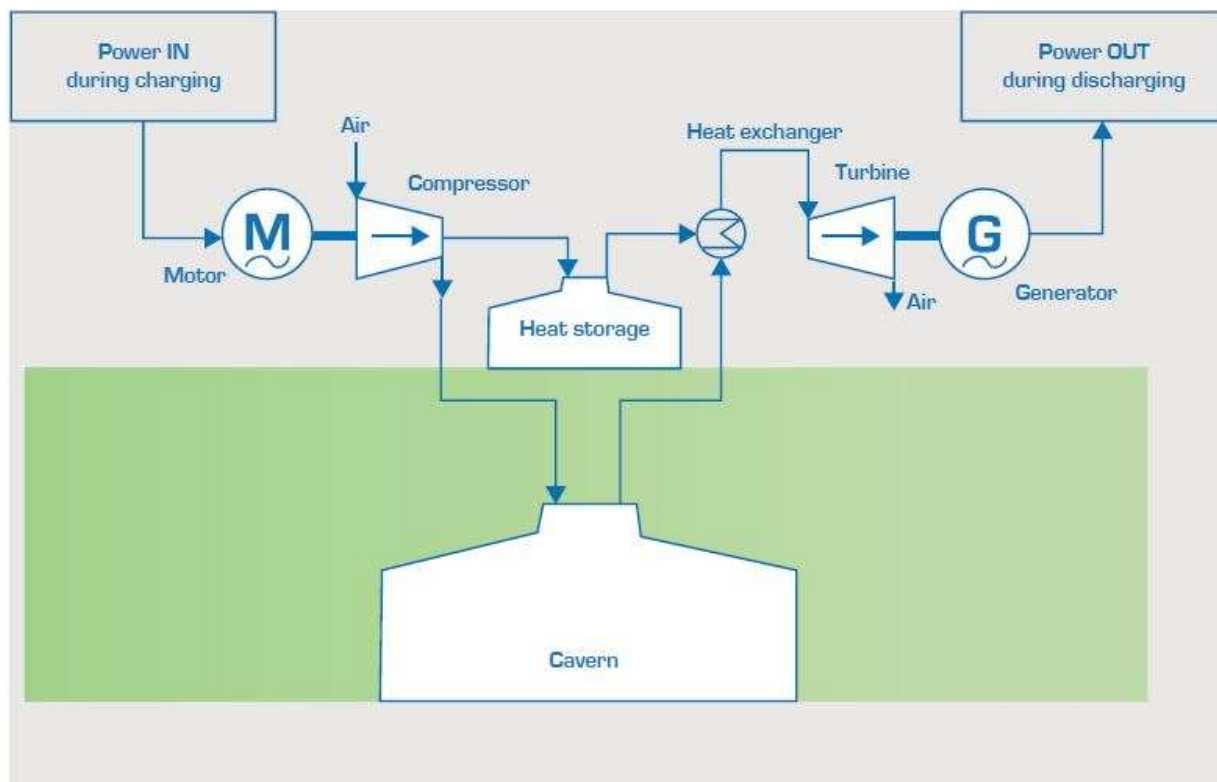


Рисунок 3.5.1-Система АСАЕС з використанням теплоакумулятора

Використовуючи теплоакумулятор, система може накопичувати та відновлювати теплову енергію більш ефективно.

Є три основні типи акумуляторів тепла для систем АСАЕС – теплонакопичувач раціонального тепла, фазового переходу та термохімічні акумулятори тепла.

Теплонакопичувач раціонального тепла (англ. Sensible heat storage) У цій формі системи зберігання енергії матеріал, що накопичує тепло, залишається в одній фазі в межах необхідного діапазону температур для зберігання. Серед найпоширеніших матеріалів цієї категорії варто відзначити бетон, глиняну кераміку та розплавлені солі. Розплавлені солі часто використовуються у сонячних теплових установках. Головний недолік цих матеріалів полягає в їх високій точці замерзання (приблизно 100 °С), що може призводити до втрат енергії. Крім того, під час процесу розрядки частина накопиченого тепла відновлюється, але з певними незворотними втратами в пристрої теплообміну.

Теплонакопичувач фазового переходу. Матеріали, що використовуються у теплонакопичувачі фазового переходу, зберігають енергію у формі прихованого тепла, яке виникає під час зміни фази в носіях зберігання. Зазвичай такі матеріали відомі як фазо-змінні матеріали. Для використання в системі накопичування енергії, фаза матеріалу змінюється (наприклад, від твердого до рідкого стану) при температурі, що відповідає джерелу теплового навантаження. Ці матеріали мають високий потенціал накопичення теплової енергії порівняно з матеріалами без фазової зміни, завдяки великій кількості прихованого тепла, що пов'язане зі зміною фази. Фазо-змінні матеріали можна поділити на органічні та неорганічні. Органічні матеріали включають парафіни та непарафіни. Парафін є типовим прикладом фазо-змінного матеріалу і складається з суміші прямолінійних n-алканів ( $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$ ). Непарафінові матеріали включають жирні кислоти, складні ефіри та гліколі. Неорганічні фазо-змінні матеріали включають гідрати солей, солі, метали та сплави. Наприклад, декагідрат сульфату натрію, гексагідрат хлориду кальцію, тіосульфат натрію та інші. Порівняно з раціональними теплонакопичувачами, теплонакопичувачі фазового переходу мають менший діапазон робочих температур, що дозволяє більш ефективно накопичувати енергію при незначних змінах температури середовища зберігання.

Термохімічні акумулятори тепла накопичують і віддають теплову енергію шляхом хімічної реакції. Цей тип акумулятора менш поширений у системах АСАЕС, але його розглядають як потенційне рішення для підвищення енергоефективності. Форма зберігання тепла передбачає оборотну реакцію, в якій тепло зберігається під час стадії ендотермічної реакції та під час екзотермічної вивільняється. Під час процесу зарядження, теплова енергія використовується для дисоціації хімічного реагенту на продукти в ендотермічній реакції. Продукти зберігаються окремо та очікують потребу в енергії. Під час етапу розрядження збережені продукти змішуються разом і реагують з утворенням початкового реагенту в реакції, яка є екзотермічною. Тепло, яке виділяється під час реакції і використовують, як джерело тепла.

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		56

Даний тип зберігання тепла знаходиться на стадії дослідження та розробки з різними типами матеріалів, серед них гідриди металів ( $MgH_2$  та  $CaH_2$ ), карбонати ( $PbCO_3$  та  $CaCO_3$ ), гідроксиди ( $Mg(OH)_2$  та  $Ca(OH)_2$ ), оксиди ( $BaO_2$  та  $Co_3O_4$ ), аміачну систему ( $NH_4HSO_4$  та  $NH_3$ ), і органічні системи ( $CH_4/H_2O$ ,  $CH_4/CO_2$ ,  $C_6H_{12}$ ).

Також термохімічне зберігання енергії має перевагу над системами чуттєвого та прихованого тепла, щільність енергії яких в 5-10 разів нижче термохімічних систем. Термін зберігання та транспортування теоретично необмежений, так як при зберіганні немає теплових втрат, оскільки продукти можуть зберігатись при температурі навколишнього середовища.

					<i>КРБ.ЕТтаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		57

## 4 ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ОПАЛЕННЯ БУДИНКУ ЗА СЕРЕДНЬОМІСЯЧНИМИ ТЕМПЕРАТУРАМИ

Таблиця 4.1 – Середньодобові температури повітря впродовж  
опалювального сезону в м. Одеса [13]

Місяць	10	11	12	1	2	3	4
Кількість діб, n	15	30	31	30	28	31	15
Середньодобова температура $t_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$	11,3	5,8	1,1	-1,3	-0,6	2,9	9,2

Максимальні тепловтрати будинком  $Q_{\text{ТВ}}^{\text{max}} = 10\text{кВт}$  за розрахункової температури зовнішнього повітря  $t_3^{\text{min}} = -1,3 ^\circ\text{C}$ . Кількість мешканців  $n = 4$  люд. Розрахункова температура повітря у приміщенні  $t_{\text{в}} = 20^\circ\text{C}$ .

### 4.1 Визначення теплового навантаження системи опалення будинку

Між тепловтратами і температурою зовнішнього повітря (за постійної внутрішньої) існує лінійна залежність. Так, якщо температури зовнішнього і внутрішнього повітря однакові:  $t_3 = t_{\text{в}}$ , то тепловтрати відсутні ( $Q_{\text{ТВ}} = 0$ ), а за мінімальної зовнішньої температури  $t_3^{\text{min}}$  вони максимальні ( $Q_{\text{ТВ}} = Q_{\text{ТВ}}^{\text{max}}$ ).

Додаткове теплове навантаження джерела тепла для гарячого водопостачання (ГВП) розраховується за добовими нормами витрат гарячої води. Для цього щодоби необхідна додаткова потужність  $0,25 \text{ кВт/люд.}$

Отже, необхідну потужність джерела тепла для і-того місяця можна знайти з виразу:

$$Q_{\text{ТВ}}^i = \frac{Q_{\text{ТВ}}^{\text{max}}}{t_{\text{в}} - t_3^{\text{min}}} (t_{\text{в}} - t_3^i) + n_{\text{люд}} \cdot 0,25$$

Тут  $t_{\text{в}}$  – температура повітря у приміщенні,  $t_{\text{в}} = 20^\circ\text{C}$ .

Знаючи необхідну потужність джерела тепла, визначимо теплову енергію на опалення та ГВП для кожного місяця опалювального періоду ( $n$ , діб), кДж:

$$Q_{\text{оп}}^i = Q_{\text{ТВ}}^i \cdot 24 \cdot 3600 \cdot n$$

Результати заносимо в таблицю 1.2.

Таблиця 4.1.1 – Потужність джерела тепла і енергія для опалення впродовж опалювального сезону

Місяць	10	11	12	1	2	3	4
Кількість діб, $n$	15	30	31	30	28	31	15
Середньодобова температура, $^{\circ}\text{C}$	11,3	5,8	1,1	-1,3	-0,6	2,9	9,2
Потужність джерела тепла $Q_{\text{ТВ}}$ , кВт	5,08	7,6	9,87	11	10,67	9,03	6,07
Тепловтрати $Q_{\text{ТВ}}$ , кВт·год	1828,8	2736,0	3553,2	3960,0	3841,2	3250,8	2185,2
Теплова енергія на опалення $Q_{\text{оп}} \cdot 10^{-3}$ , МДж	6,58	19,7	26,44	28,51	25,81	24,18	7,9
Теплова енергія на опалення за сезон $Q_{\text{оп}} = 139,1 \cdot 10^3$ , МДж							

## 5 РОЗРАХУНОК КІЛЬКОСТІ ЕНЕРГІЇ ПРИ ПІДВОДНОМУ ЗБЕРІГАННІ ЇЇ В МІШКАХ

### 5.1 Основні баланси енергії підводного сховища стисненого повітря

Процес зберігання енергії в UCAES не є ідеальним, і має свої баланси енергії, які потрібно враховувати. Основними балансами енергії в підводному сховищі стисненого повітря є наступні:

1. Втрати тепла: Процес стиснення повітря супроводжується втратами тепла. Це означає, що частина електроенергії, яка використовується для стиснення повітря, перетворюється на теплову енергію і втрачається. Ці втрати тепла можуть впливати на ефективність системи та її здатність зберігати та використовувати енергію.
2. Втрати повітря: Підводні сховища стисненого повітря можуть мати втрати повітря через різні фактори, такі як проникнення повітря через стінки сховища або втрати під час вилучення повітря з сховища для генерації електроенергії. Ці втрати повітря можуть зменшити наявну енергію, яка може бути використана для генерації електрики.
3. Втрати води: Якщо підводне сховище розташоване в водоймищі, можуть відбуватись втрати води через її випаровування або фізичну втрату. Ці втрати води можуть вплинути на ефективність системи та її здатність забезпечувати стійке зберігання енергії.

#### 5.1.1 Політропічне стиснення

Робота політропічного стиснення повітря від  $P_1 = 0,1$  до  $P_2 = 6$  МПа

(1 МПа  $\approx$  102 м.в.ст.), МДж/кг, становить [12]:

$$L_{\text{п.с.}} = \frac{m}{m-1} \cdot P_1 \cdot v_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] = \frac{1,25}{1,25-1} \cdot 0,1 \cdot 0,83 \left[ \left( \frac{6}{0,1} \right)^{\frac{1,25-1}{1,25}} - 1 \right] \\ = 0,527$$

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		60

Тут:

$m$  – показник політропи ( $m=1,25$ );

$v_1$  – питомий об'єм повітря перед стисненням,  $\text{м}^3/\text{кг}$

При цьому температуру повітря в кінці стиснення  $T_2$  (за відсутності охолодження) знайдемо з виразу:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} = 293,15 \cdot \left(\frac{6}{0,1}\right)^{\frac{1,25-1}{1,25}} = 664,84 \text{ К}$$

$$T_1 = 273,15 + 20 = 293,15 \text{ К}$$

$$T_2 = 664,84 \text{ К}$$

За наявності охолодження стисненого повітря до температури  $t_3 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  (303,15 К) від нього відводиться тепло:

$$q_{\text{стис}} = M \cdot c_p \cdot (T_2 - T_3) = 1 \cdot 1,005 \cdot (664,83 - 303,15) = 363,49 \text{ кДж/кг}$$

Потім охолоджене повітря з тиском 6 МПа зберігається в підводному резервуарі. Стиснене повітря охолоджується морською водою до температури  $t_M = +1 - +3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Тепловтрати становлять:

$$q_M = M \cdot c_p \cdot (T_3 - T_M) = 1 \cdot 4,19 \cdot (30 - 1) = 121,51 \text{ кДж/кг}$$

Для підвищення ККД установки можливо організувати охолодження (нагрівання) повітря в регенераторі (наприклад, заповненому галькою). Воно полягає в утриманні та збереженні тепла, що виділяється при роботі компресора на етапі багатоступеневого стиснення та міжступінчатого охолодження повітря, з подальшим його повторним використанням при зворотному нагріванні холодного повітря (т.зв. рекуперація).

Це дасть можливість зменшити тепловтрати і підвищити ккд установки.

В час дефіциту енергії повітря направляється в турбіну, встановлену на одній осі з електрогенератором, де розширюється до тиску 0,1 МПа. Оскільки при

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		61

цьому повітря охолоджується, його треба попередньо підігрівати. Тобто йому треба повернути відібрану і втрачену теплоту:

$$q_{\text{підігр}} = q_{\text{стис}} + q_{\text{м}} = 363,49 + 121,51 = 485 \text{ кДж/кг}$$

Якщо вважати, що все тепло стиснення буде без втрат передано повітряю перед розширенням:

$$q_{\text{стис}} = q_{\text{розш}},$$

то можна визначити к.к.д. процесу:

$$\eta = \frac{L_{\text{п.с.}} - Q_{\text{м}}}{L_{\text{п.с.}}} = \frac{527 - 121,51}{527} = 0,77$$

Це цілком узгоджується з даними практичної експлуатації заводів CAES (compressed air energy storage) в Німеччині та США [3].

### 5.1.2 Визначення маси повітря, що закачується в кулю

Діаметр кулі (мішка), в яку закачується повітря за програмою Energie Bag:

$$D_{\text{к}} = 20 \text{ м}$$

Тоді об'єм кулі буде:

$$V_{\text{к}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{к}}}{2}\right)^3 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{20}{2}\right)^3 = 4187 \text{ м}^3$$

Щоб підрахувати масу цього повітря, треба знати його густину за цих умов.

Скористаємося законом Бойля-Маріотта:

$$P_1 \cdot v_1 = P_2 \cdot v_2$$

Звідси питомий об'єм стисненого повітря:

$$v_2 = \frac{P_1 \cdot v_1}{P_2} = \frac{0,1 \cdot 0,83}{6} = 0,0138 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Густина стисненого повітря

$$\rho = \frac{1}{v_2} = \frac{1}{0,0138} = 72,3 \text{ кг/м}^3$$

Отже, в одній кулі діаметром 20 м утримується повітря масою:

$$M_{\text{к}} = V_{\text{к}} \cdot \rho = 4187 \cdot 72,3 = 300272 \text{ кг}$$

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		62

При розширенні газ виконає роботу:

$$L_{\text{розш}} = L_{\text{п.с.}} \cdot M_{\text{к}} = 0,527 \cdot 300272 = 159530 \text{ МДж}$$

### 5.1.3 Розрахунок кількості куль

Теплова енергія на опалення будинку площею 180 м<sup>2</sup> за сезон становить (табл. 1.2):

$$Q_{\text{оп}} = 139.1 \cdot 10^3 \text{ МДж}$$

Отже, на опалення будинку необхідна кількість куль становитиме:

$$n = \frac{Q_{\text{оп}}}{L_{\text{розш}}} = \frac{139.1 \cdot 10^3}{15953} \approx 9$$

### 5.1.4 Розрахунок потужності ВЕУ

Якщо джерелом енергії є вітроустановка, то за період з 15 квітня до 15 жовтня вона повинна виробити енергію для опалення будинку:

$$Q_{\text{оп}} = 139.1 \cdot 10^3 \text{ МДж}$$

Для цього необхідна вітроенергетична установка (ВЕУ) потужністю:

$$P_{\text{vey}} = \frac{Q_{\text{оп}}}{3600 \cdot n \cdot \tau} = \frac{139100000}{3600 \cdot 180 \cdot 24} = 8,94 \text{ кВт}$$

Сучасні ВЕУ здатні перетворювати тільки 25 % повної потужності повітряного потоку, Вт:

$$P_{\text{vey}} = 0,25 \cdot 1,17 \cdot 0,785 \cdot D_{\text{вк}}^2 \cdot v_{\text{в}}^3$$

Звідси діаметр вітроколеса становитиме:

$$D_{\text{вк}} = \sqrt{\frac{P_{\text{vey}}}{0,25 \cdot 1,17 \cdot 0,785 \cdot v_{\text{в}}^3}} = \sqrt{\frac{8940}{0,25 \cdot 1,17 \cdot 0,785 \cdot v_{\text{в}}^3}} = 14,75 \text{ м}$$

## 5.2 Стиснене повітря як джерело тепла для будинку в січні

### 5.2.1 Розрахунок матеріальних потоків

Із табл. 4.1.1, потужність джерела тепла в січні:

$$Q_{\text{ТВ}} = 11 \text{ кВт}$$

					КРБ.ЕТтаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		63

За добу витрата енергії становитиме:

$$Q_{\text{доб}} = Q_{\text{ТВ}} \cdot \tau \cdot 3600 = 11 \cdot 24 \cdot 3600 = 950400 \text{ кДж}$$

Цю енергію несе в собі повітря масою:

$$M = \frac{Q_{\text{доб}}}{L_{\text{п.с.}}} = \frac{950400}{527} = 1803 \text{ кг}$$

Масова витрата повітря:

$$m_{\text{пов}} = \frac{M}{\tau \cdot 3600} = \frac{1803}{24 \cdot 3600} = 0,021 \text{ кг/с}$$

Теплова потужність його:

$$Q_m = m_{\text{пов}} \cdot c_{p,\text{пов}} \cdot (T_2 - T_3) = 0,021 \cdot 1 \cdot (664,83 - 303,15) = 7,6 \text{ кВт}$$

Від цього тепла нагрівається теплоносій (вода) в теплоаккумуляторі (рис. 3.1, 3.2).

Його масова витрата:

$$m_{\text{вод}} = \frac{Q_m}{c_{p,\text{вод}} \cdot \Delta t_{\text{вод}}} = \frac{7,6}{4,19 \cdot 10} = 0,18 \text{ кг/с}$$

## 5.2.2 Визначення об'єму добового теплового акумулятора

Як відомо, при виборі теплового акумулятора визначальними факторами є теплоакumuлюючий матеріал, а саме його об'єм та постійна температура при розрядці. З огляду на ці вимоги ємнісним ТА протистоять теплоаккумулятори на основі теплоти фазового переходу, де основна кількість теплоти поглинається речовиною під час її плавлення.

Таблиця 5.2.2.1 – Порівняння різних теплоакumuлюючих матеріалів (ТАМ) для акумулювання 1 ГДж теплоти

№ п/п	ТАМ	Маса, кг	Об'єм, м <sup>3</sup>
1	Галька	113 636	71,74
2	Вода	23 866	23,9
3	Парафин	4 794	5,27
4	Глауберова соль	3 723	2,55

Завдяки цьому забезпечується висока щільність енергії, що запасується, невеликі перепади температур і стабільна температура на виході з теплового акумулятора, через що істотно зменшуються його маса і об'єм (табл. 3.1).

Для реального застосування розглядаються тільки речовини, що не розкладаються при плавленні або розчиняються в надлишковій воді, яка входить до складу ТАМ (це властиво глауберовій солі (табл. 3.1).

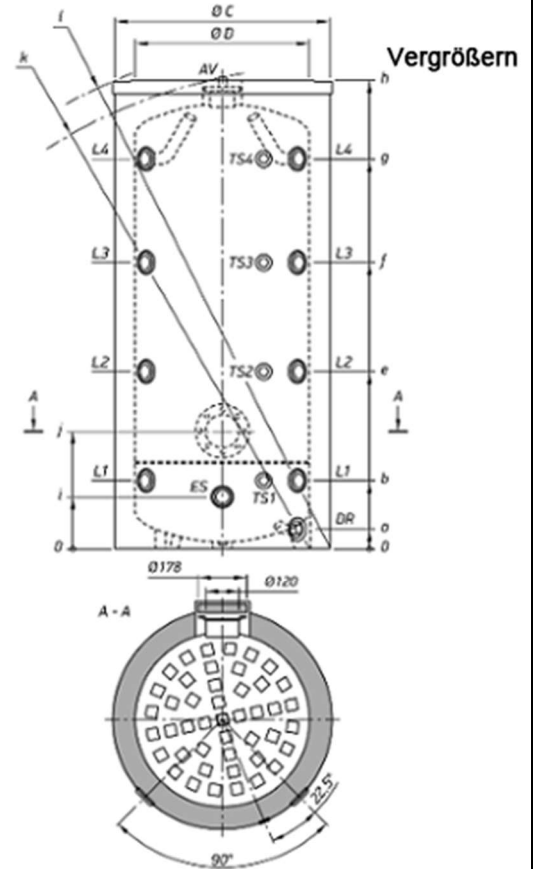
В акумуляторах фазового переходу теплоакumuлюючий матеріал перед зарядженням знаходиться у твердому вигляді.

З огляду на вищесказане актуальним є акумулятори з фазовим переходом на основі, наприклад, парафінів. Донедавна їхньому широкому застосуванню заважали складнощі конструктивної реалізації таких апаратів, пов'язані з нерівномірністю плавлення (затвердіння) парафіну.

ТА на основі фазового переходу, запропонований німецькою фірмою [14], відрізняється від відомих конструкцій тим, що ТАМ запааний у пластмасові кульки, які у вигляді насипної насадки заповнюють внутрішній об'єм апарата (рис.5.2.2.2). Така конструкція усуває проблему нерівномірного затвердіння (плавлення) ТАМ.

В схемі, що розглядається (рис. 5.2.2.3), повітря стискається в багатоступеневому компресорі. Після кожного ступеня повітря охолоджується в міжступеневому холодильнику, потім – в кінцевому і збирається в баку. Температура стисненого повітря після охолодження в проміжному охолоджувачі не повинна перевищувати температуру охолоджуючої води більше, ніж на  $12 \div 15$  °С. Температура нагрітої води після кінцевого холодильника компресора не повинна перевищувати 40 °С. Нормальний перепад температури охолоджуючої води ( $10 \div 15$ ) °С.

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		65



- L 1,2,3,4 - Anschlüsse IG 1½"
- TS 1,2,3,4 - Thermosensor / Fühler IG ½"
- ES - Elektroheizstab IG 1½"
- DR - Befüllung / Entleerung AG ¾"
- AV - Entlüftung IG ¾"

Рисунок 5.2.2.2 – Тепловий акумулятор з насипною насадкою, наповненою теплоакumuлюючим матеріалом з фазовим переходом (Phase Change Materials - PCM). Elektroheizstab - електричний заглибний нагрівач; Anschlusse – підключення; Thermosensor – термодатчик; Befüllung – заповнювання

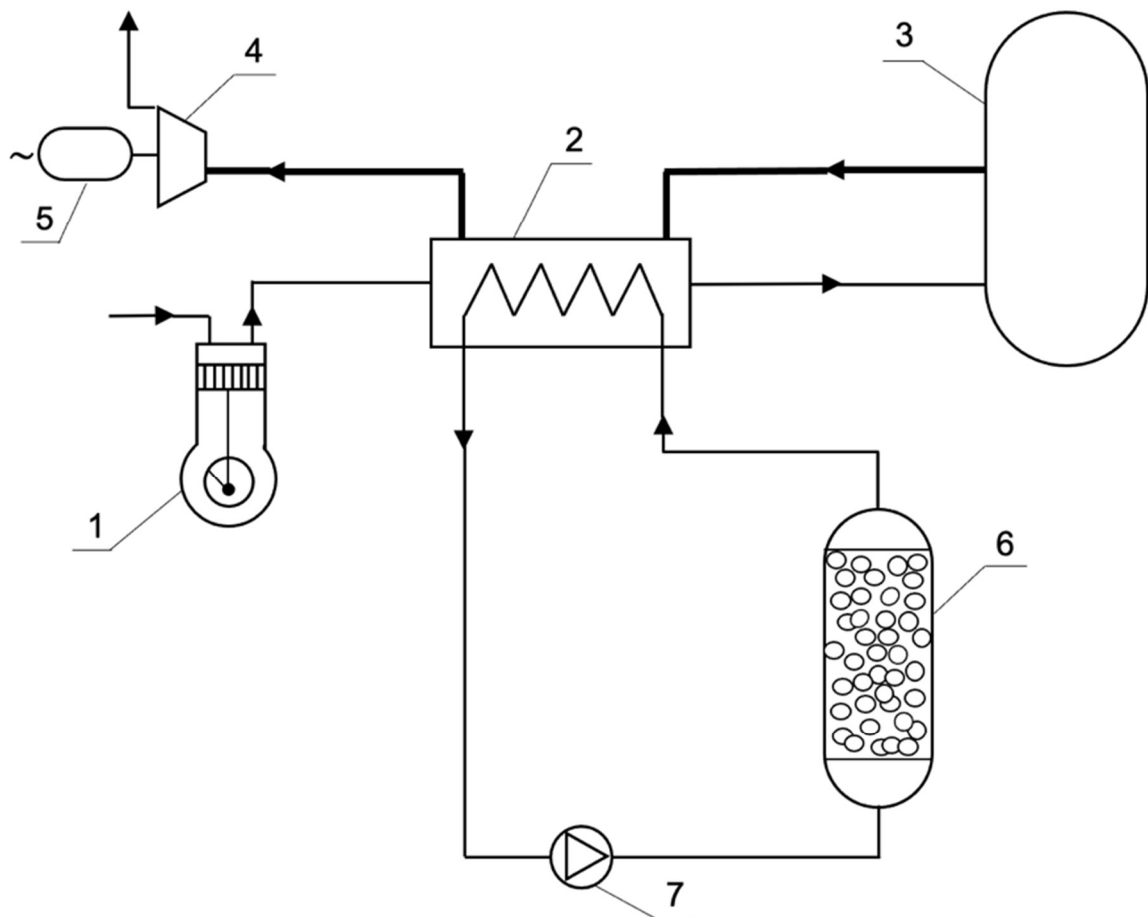


Рисунок 5.2.2.3 – Принципова схема системи акумуляції тепла стисненого повітря: 1 – компресор; 2 – кінцевий холодильник; 3 – резервуар стисненого повітря; 4 – детандер; 5 – генератор; 6 – теплоаккумулятор; 7 - насос

З огляду на вищесказане, як теплоакумулюючий матеріал вибираємо парафін з температурою плавлення  $t_{\text{плав}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , теплотою плавлення  $r_{\text{параф}} = 220 \text{ кДж/кг}$ ; температуру розрядки приймаємо  $t_{\text{розр}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Масу парафіну для акумуляції тепла від «січної» порції повітря можна визначити з теплового балансу теплоаккумулятора:

$$M_{\text{пар}} = \frac{Q_{\text{доб}}}{c_p(t_{\text{плав}} - t_{\text{розр}}) + r_{\text{пар}}} = \frac{950400}{2,2(40 - 30) + 220} = 3927,27 \text{ кг}$$

Об'єм парафіну:

$$V_{\text{пар}} = \frac{M_{\text{пар}}}{\rho_{\text{пар}}} = \frac{3927,27}{900} = 4,36 \text{ м}^3$$

Якщо порізність насадкового шару кульок становить  $\varepsilon_0 = 0,4$ , [14], то об'єм апарату буде:

$$V_{\text{ап}} = \frac{V_{\text{пар}}}{1 - \varepsilon_0} = \frac{4,36}{0,6} \approx 7,3 \text{ м}^3$$

Оперуючи відомим співвідношенням габаритних розмірів апарату:

$$\varphi = \frac{H}{D} = 3,0$$

можемо записати:

$$V_{\text{ап}} = 0,785 \cdot D^2 \cdot 3D = 2,355 \cdot D^3$$

Звідси діаметр:

$$D = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{ап}}}{2,355}} = \sqrt[3]{\frac{7,3}{2,355}} = 1,5 \text{ м}$$

Висота:

$$H = 3D = 4,5 \text{ м}$$

Діаметр кульок з парафіном приймаємо  $d_{\text{кул}} = 50 \text{ мм}$  [15].

Об'єм кульки:

$$v_{\text{кул}} = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{d_{\text{кул}}}{2} \right)^3 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot 0,025^3 = 0,65 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

Маса парафіну в кульці:

$$m_{\text{пар}} = \rho_{\text{пар}} \cdot v_{\text{кул}} = 900 \cdot 0,65 \cdot 10^{-4} = 0,0585 \text{ кг}$$

Кількість кульок в апараті:

$$n_{\text{кул}} = \frac{M_{\text{пар}}}{m_{\text{пар}}} = \frac{3927,27}{0,0585} = 67133 \text{ шт}$$

### 5.3 Розрахунок гідравлічного опору теплоаккумулятора

Теплоносій тече через шар кульок по проходам складного перерізу, який визначається питомою поверхнею кульок  $a$  і часткою вільного об'єму  $\varepsilon_0$ . Тому

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		68

еквівалентний діаметр каналу для проходження води в насипній насадці з кульок становить [15]:

$$d_{\text{екв}} = \frac{4 \cdot \varepsilon_0}{a},$$

де  $a$  – питома поверхня кульки:

$$a = \frac{f_{\text{кул}}}{v_{\text{кул}}}$$

Поверхня кульки:

$$f_{\text{кул}} = \pi \cdot d_{\text{кул}}^2 = 3,14 \cdot 0,05^2 = 0,00785 \text{ м}^2$$

А її питома поверхня:

$$a = \frac{0,00785}{0,65 \cdot 10^{-4}} = 120,8 \text{ м}^2/\text{м}^3$$

Тоді еквівалентний діаметр апарату буде дорівнювати:

$$d_{\text{екв}} = \frac{4 \cdot 0,4}{120,8} = 0,013 \text{ м}$$

Використання  $d_{\text{екв}}$  означає, що визначальний розмір для зернистого шару не дорівнює діаметру кульки, а залежить від геометрії вільних зон між кульками.

Фактичну швидкість  $v$  суцільної фази (води) в шарі насипної насадки визначити важко. В практичних розрахунках замість неї використовують фіктивну швидкість суцільної фази  $v_0$ . Виходячи з виразу для об'ємної витрати води  $V_{\text{вод}} = v_0 \cdot S = v \cdot S \cdot \varepsilon_0$  ( $S = 0,785 \cdot D^2$  – поперечний переріз апарата), отримуємо співвідношення між дійсною та фіктивною швидкістю:

$$v = \frac{v_0}{\varepsilon_0}$$

Об'ємна витрата води через апарат:

$$V_{\text{вод}} = \frac{Q_m}{c_p(t_{\text{зар}} - t_{\text{розр}}) \cdot \rho} = \frac{7,6}{4,19 \cdot (40 - 30) \cdot 1000} = 181,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$$

Фіктивна швидкість води:

$$v_0 = \frac{V_{\text{вод}}}{S} = \frac{181,4 \cdot 10^{-6}}{0,785 \cdot 1,5^2} = 10,27 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$$

Дійсна швидкість води:

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		69

$$v = \frac{10,27 \cdot 10^{-6}}{0,4} = 25,7 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$$

Фіктивне число Рейнольдса:

$$Re_o = \frac{v_o \cdot d_{кул} \cdot \rho}{\mu} = \frac{10,27 \cdot 10^{-6} \cdot 0,05 \cdot 1000}{800} = 0,6 \cdot 10^{-6}$$

Дійсне число Рейнольдса:

$$Re = \frac{2}{3(1 - \varepsilon_o)} Re_o = \frac{2}{3 \cdot 0,4} \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 10^{-6}$$

Гідравлічний опір насипного шару насадки складається із опору тертя  $R_l$  та гідростатичного опору, що дорівнює висоті підняття рідини, тобто висоті апарату:  $R_H = H$ . Опір тертя [10]:

$$R_l = \frac{\lambda \cdot l}{d_{екв}} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

Приймаємо довжину каналу рівною висоті насадкового шару:  $l = H$

Залежність коефіцієнта опору  $\lambda$  від критерію Рейнольдса при течії рідини через нерухомий насипний шар насадки:

$$\lambda = \frac{133}{Re} + 2,34 = \frac{133}{1,33 \cdot 10^{-6}} + 2,34 = 2,34 \cdot 10^8$$

В результаті отримаємо опір шару кулькової насадки:

$$R_l = \frac{2,34 \cdot 10^8 \cdot 4,5 \cdot 1000 \cdot (25,7 \cdot 10^{-6})^2}{0,013 \cdot 2} = 26,75 \text{ Па}$$

або  $R_l = 0,0027 \text{ м.в.ст}$

Підбираємо циркуляційний насос Wilo-Stratos PICO з витратою  $V_{вод} = 0,47 \text{ м}^3/\text{год}$  і напором  $H_{нас} = 3,9036 \text{ м.вод.ст.}$ [16]

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		70

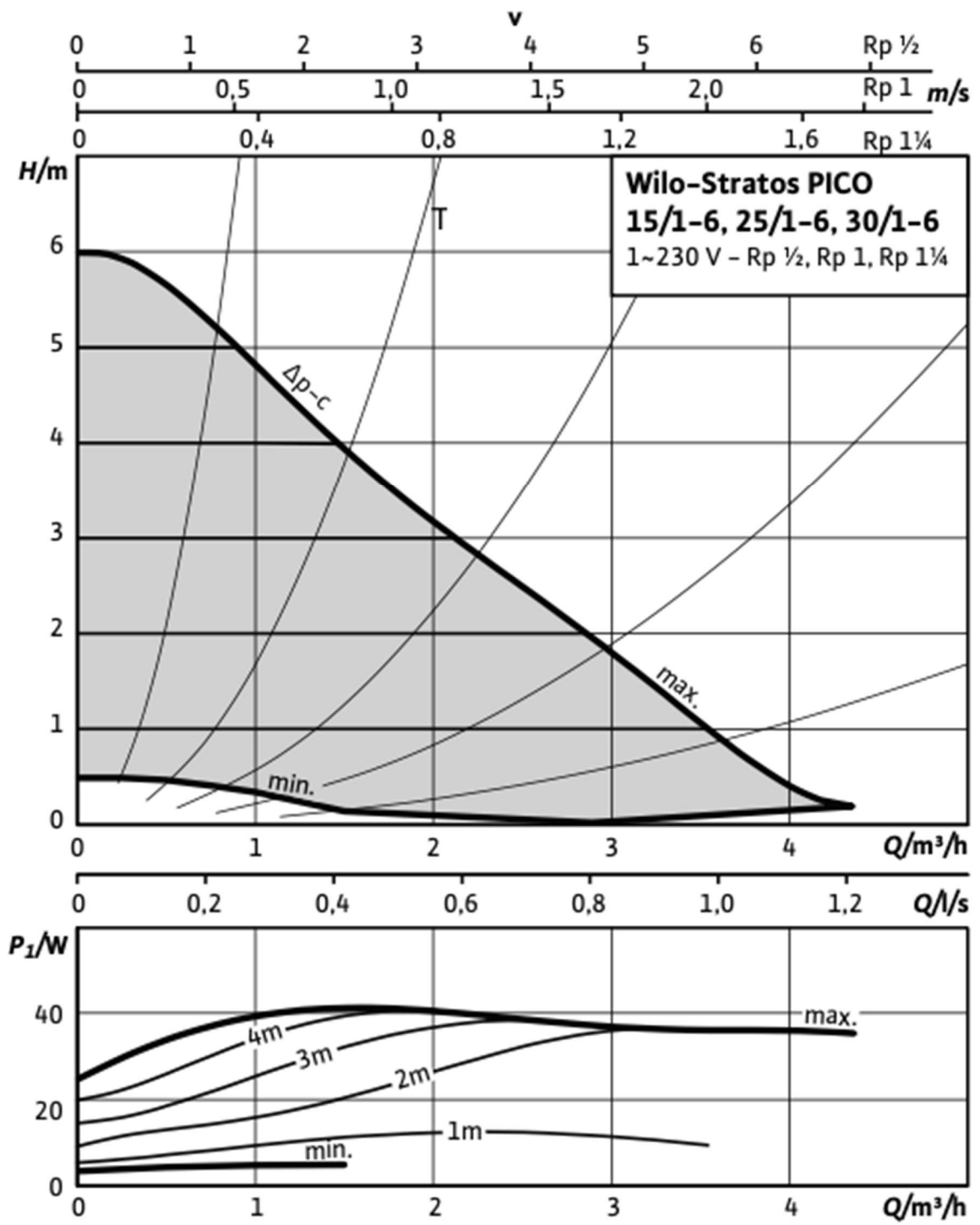


Рисунок 5.3.1 – Характеристики циркуляційного насоса Wilo-Stratos PICO

## 6. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

За відсутності регенератора, повітря, що зберігається в кулі, довелося б підігрівати.

В результаті втрати енергії на нагрівання склали б:

$$363,49 + 121,51 = 485 \text{ кДж/кг}$$

Для маси повітря, що знаходиться в кулі, затрати енергії дорівнюватимуть:

$$485 \cdot 1803 = 874455 \text{ кДж}$$

Потужність джерела тепла :

$$874455 / 24 \cdot 3600 = 10,12 \text{ кВт}$$

Енергія на нагрівання повітря за добу:

$$10,12 \cdot 24 = 242,88 \text{ кВт·год}$$

Вартість енергії:

$$242,88 \cdot 1,68 = 408,04 \text{ грн}$$

Завдяки наявності регенератора ми зберігаємо 77 % енергії

В результаті економимо за добу:

$$C = 408,04 \cdot 0,77 = 314,2 \text{ грн}$$

Термін окупності, діб :

$$\tau = (K / C)$$

K – стоимость регенератора, нужно 2 шт.

Термін окупності складає

$$\tau = 546000 / 314,2 = 1738 \text{ діб}$$

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		72

## 7. ОХОРОНА ПРАЦІ

### 7.1 Блискавкозахист

Блискавкозахист — це система захисних пристроїв та заходів, що призначені для забезпечення безпеки людей, збереження будівель та споруд, устаткування та матеріалів від можливих вибухів, займань та руйнувань, спричинених блискавкою.

Блискавка — особливий вид проходження електричного струму через величезні повітряні прошарки, джерелом якого є атмосферний заряд, накопичений грозовою хмарою. Умови утворення таких хмар — велика вологість та швидка зміна температури повітря. За таких умов у атмосфері Землі проходять складні фізичні процеси, які призводять до утворення та накопичення електричних зарядів. При підвищенні напруженості електричного поля до критичних значень виникає розряд, який супроводжується яскравим свіченням (блискавкою) та звуком (громом). Довжина каналу блискавки може досягати кількох кілометрів, сила струму — 200 000 А, напруга— 150 000 кВ, а температура — 10000 °С і більше. Час існування блискавки 0,1 — 1 с. Щосекунди земну кулю уражають в середньому більше 100 блискавок [17].

Розрізняють первинні (прямий удар) і вторинні прояви блискавки.

Прямий удар блискавки (ураження блискавкою) — безпосередній контакт каналу блискавки з будівлею чи спорудою, що супроводжується протіканням через неї струму блискавки. Прямий удар блискавки здійснює на уражений об'єкт наступні дії: електричну, що пов'язана з ураженням людей і тварин електричним струмом та виникненням перенапруг на елементах, по яких струм відводиться в землю; теплову, що зумовлена значним виділенням теплоти на шляхах проходження струму блискавки через об'єкт; механічну, що спричинена ударною хвилею, яка поширюється від каналу блискавки, а також електродинамічними силами, що виникають у конструкціях, через які проходить струм блискавки.

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		73

Під вторинними проявами блискавки розуміють явища під час близьких розрядів блискавки, що супроводжуються появою потенціалів на конструкціях, трубопроводах, електропроводах всередині будівель і споруд, які не зазнали прямого удару блискавки. Вони виникають внаслідок електростатичної та електромагнітної індукції.

Електростатична індукція проявляється у наведені потенціалів на металевих елементах конструкції, в незамкнених металевих контурах, що може викликати іскріння всередині будівель та споруд і тим самим ініціювати пожежу чи вибух.

Електромагнітна індукція супроводжуються появою в просторі змінного магнітного поля, яке індукує в металевих контурах, що утворені із різних протяжних комунікацій (трубопроводів, електропроводів і т. п.) електрорушійну силу (ЕРС).

У замкнених контурах ЕРС призводить до появи наведених струмів. У контурах, в яких контакти недостатньо надійні в місцях з'єднання, такі струми можуть викликати іскріння або сильне нагрівання, що дуже небезпечно для приміщень, де утворюються вибухо- та (або) пожежонебезпечні концентрації.

Ще однією особливістю вторинного прояву блискавки є занесення високих потенціалів у будівлю по металоконструкціях, які підведені в цю будівлю (трубопроводах, рейкових шляхах, естакадах, проводах ліній електропередач і т. п.). Такі занесення супроводжуються електричними розрядами, які можуть стати джерелом вибуху чи пожежі. Захист об'єктів від прямих ударів блискавки забезпечується шляхом встановлення блискавковідводів. Захист від електростатичної індукції (вторинний прояв блискавки) здійснюється приєднанням устаткування до заземлювача для відведення електростатичних зарядів, індукованих блискавкою, в землю. Захист від електромагнітної індукції полягає у встановленні методом зварювання перемичок між протяжними металоконструкціями в місцях їхнього зближення менше ніж на 10 см.. Інтервал між перемичками повинен становити не більше 20 м. Це дає змогу наведеному струму блискавки переходити з одного контуру в інший без утворення

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		74

електричних розрядів. Захист від занесення високих потенціалів у будівлю здійснюється шляхом приєднання до заземлювача металоконструкцій перед їх введенням у будівлю.

При виборі пристроїв блискавкозахисту за категоріями враховують важливість об'єкта, його висоту, місце розташування серед сусідніх об'єктів, рельєф місцевості, інтенсивність грозової діяльності. Останній параметр характеризується середньорічною тривалістю гроз у годинах для даної місцевості [19].

Таблиця 7.1 - Середня інтенсивність грозової діяльності у різних регіонах (областях) України

№ зп.	Регіони (області) України	Інтенсивність грозової діяльності,
		год/рік
1	Автономна Республіка Крим	40—60
2	Закарпатська, Запорізька, Донецька	80—100
3	Інші області України	60—80

Для захисту об'єкта від прямих ударів блискавки застосовують блискавковідвід — пристрій, який височіє над захищуваним об'єктом, сприймає удар блискавки та відводить її струм у землю. Захисна дія блискавковідводу базується на властивості блискавки уражати найбільш високі та добре заземлені металеві конструкції. За конструктивним виконанням блискавковідводи поділяються на стержневі, тросові та сітчасті, а за кількістю та загальною площею захисту — на одинарні, подвійні та багатократні. Окрім того, розрізняють блискавковідводи встановлені окремо та такі, що розташовані на захищуваному об'єкті. Будь-який блискавковідвід складається з блискавкоприймача (металевий стержень, трос, сітка), який безпосередньо сприймає удар блискавки; несівної опори (спеціальні стовпи, елементи конструкцій будівлі), на якій розташовується блискавкоприймач; струмовідводу (металевий провідник, конструкція), по якому струм блискавки

передається в землю; заземлювача, який забезпечує розтікання струму блискавки в землі.

Блискавковідвід характеризується зоною захисту — частиною простору, навколо блискавковідводу, яка захищена від прямих ударів блискавки з відповідним ступенем надійності.

Таблиця 7.2 - Середньорічна кількість ударів блискавки в 1 км<sup>2</sup> поверхні землі залежно від інтенсивності грозової діяльності

Середня інтенсивність грозової діяльності, год/рік	10–20	20–40	40–60	60–80	80–100	100 і більше
Середньорічна кількість ударів блискавки в 1 км <sup>2</sup> поверхні землі	1	2	4	5,5	7	8,5

7.2 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки

Електротравми відбуваються при потраплянні людини під напругу в результаті доторкання до елементів електроустановки з різними потенціалами, чи потенціал яких відрізняється від потенціалу землі, в результаті утворення електричної дуги між елементами електроустановки безпосередньо, або між осінніми і людиною, яка має контакт з землею, а також в результаті дії напруги кроку.

Електротравматизм як соціальна категорія характеризується сукупністю електротравм за певний проміжок часу, їх абсолютними і відносними показниками, розподілом за тяжкістю, галузями виробництва тощо.

Як попередньо зазначалось, електротравми в загальному виробничому травматизмі складають біля 1%, а в смертельному - біля 15-20%. Останнє свідчить про зміщення виду електротравм у бік тяжких, що є однією з особливостей електротравматизму.

Особливістю електротравматизму є також те, що на електроустановки напругою до 1 кВ припадає до 70-80% електротравм зі смертельними наслідками, а на електроустановки, пащ тою понад 1 кВ, - до 20-30%.

Приведений розподіл електротравм за величиною напруги електроустановок обумовлюється не тільки більшою розповсюдженістю електроустановок напругою до 1 кВ, але, В більшій мірі, ще й тим, що такі установки доступні більшому загалу працівників, які мають недостатньо чіткі уявлення щодо небезпеки електричного струму та вимог безпеки при експлуатації електроустановок.

До установок, напругою понад 1 кВ, має доступ обмежена кількість працівників, які повинні мати достатній рівень підготовки з питань електробезпеки - відповідну вимогам чинних нормативів групу з електробезпеки [18,19].

Крім зазначеного, в порівнянні з іншими видами травматизму, електротравматизму характерні такі особливості:

людина не в змозі дистанційно, без спеціальних приладів, визначати наявність напруги, а тому дія струму, зазвичай, є раптовою, і захисна реакція організму проявляється тільки після потраплення під напругу;

струм, що протікає через тіло людини, діє на тканини і органи не тільки в місцях контакту зі струмопровідними частинами і на шляху протікання, але й рефлекторно, як надзвичайно сильний подразник, впливає на весь організм, що може призводити до порушення функціонування життєво важливих систем організму — нервової, серцево-судинної систем, дихання, тощо;

електротравм можливі без дотику людини до струмопровідних частин — внаслідок утворення електричної дуги при пробіі повітряного проміжку між струмопровідними частинами, або між струмопровідними частинами і людиною, чи землею;

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		77

розслідуванню, обліку і аналізу, в основному, доступні тяжкі електротравми та електротравми зі смертельними наслідками, що негативно впливає на профілактику електротравм

					<i>КРБ.ЕТтаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		78

## ВИСНОВОК

Зараз, коли світ все більше прагне сталого розвитку та зменшення залежності від викопних палив, використання відновлювальних джерел енергії та інноваційних технологій стають надзвичайно важливими. Вітрова енергія та накопичувачі енергії стисненого повітря пропонують ефективно та стабільне рішення для забезпечення електроенергії з чистих джерел.

1. Проведено аналіз європейського ринку виробництва вітрової енергетики. Також проаналізовано ринок вітрової енергетики в Україні.
2. Розглянуто різні види сучасної акумуляції енергії.
3. Проаналізовано роботу акумулятора енергії на стисненому повітрі.
4. Запропоновано використання підводного акумулятора енергії на стисненому повітрі разом з теплоакумулятором фазового переходу як єдиного носія для комплексного постачання споживача теплом, електроенергією, стисненим повітрям.
5. Проведено розрахунок окупності теплоакумулятора фазового переходу. Показано, що зростання ефективності акумулятора енергії на стисненому повітрі при використанні теплоакумулятора становить близько 77%.

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		79

## ЛІТЕРАТУРА

1. [https://ember-climate.org/insights/research/european-electricity-review-2023/?\\_x\\_tr\\_hist=true](https://ember-climate.org/insights/research/european-electricity-review-2023/?_x_tr_hist=true)
2. <https://razumkov.org.ua/statti/sector-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny>
3. <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/energy-security.pdf>
4. Летчер, Т. М., Ло, Р., і Рей, Д. (2016). Зберігання енергії: з особливим посиленням на відновлювані джерела енергії, том. 86 . Оксфорд: Elsevier.
5. Schoenung S.M., Eyer J.M., Iannucci J.J., Horgan S.A. Energy storage for a competitive power market. Annual Review of Energy and the Environment. 1996. Vol. 21 (1). Pp. 347–370. DOI: 10.1146/annurev.energy.21.1.347.
6. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2021.641995/full>
7. <https://habr.com/ru/post/378659/>
8. <https://www.energystorageexchange.org/projects/136/>
9. <https://www.partner-inform.de/partner/detail/2017/6/214/8562/novosti-nauki-podvodnyj-akkumuljator?lang=ru>
10. <https://www.iee.fraunhofer.de/en/topics/stensea.html>
- 11 <https://www.hydrostor.ca/toronto-a-caes-facility/>
- 12 Вассерман, О. А. Технічна термодинаміка і теплообмін : підручник / О. А. Вассерман, О. Г. Слинько.
- 13 ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 "Будівельна кліматологія"
- 14 <https://shwt-warmwasserspeicher.de/800-Liter-PCM-Pufferspeicher-Latentwaermespeicher>

					КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		80

15 [https://www.muctr.ru/upload/iblock/1a1/Spring\\_15th\\_lecture.pdf](https://www.muctr.ru/upload/iblock/1a1/Spring_15th_lecture.pdf)

16 Wilo каталог 2015/2016. Насосы и насосные установки для систем отопления, вентиляции и кондиционирования.

17. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.

18. Купчик М.П., Гандзюк М.П , Степанець І Ф, Вендичанський В.Н., Литвиненко А.М., Іваненко. О. В. Основи охорони праці. - К.: Основа, 2000. - 416 с.

					<i>КРБ.ЕТмаПЕ.1.495-03.4.1.</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>81</i>