

СЫН-ПІКІР

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ
(жұмыс түрінің атауы)

Қаламғали Алтынай Жаңайқызы
(оқушының аты-жөні)

7M07113 - «Электротехника және энергетика»

Тақырыбы: Электр энергиясын жинақтау құралы ретінде криогендік технологияның мүмкіндігін зерттеу

Орындалды:

- а) графикалық бөлім _____ парак
б) түсініктеме _____ бет

Магистрант Қаламғали Алтынай Жаңайқызының «Электр энергиясын сақтауға арналған құрылғы ретінде криогендік технологияны қолдану мүмкіндіктерін зерттеу» тақырыбындағы магистрлік диссертациясы электр энергиясын ұзақ мерзімді, қауіпсіз әрі экологиялық таза түрде сақтау мәселелерін шешуге бағытталған. Тақырыптың өзектілігі жаңартылатын энергия көздерінің үлесі артып келе жатқан қазіргі кезеңде – тор жүйесінің тұрақтылығын қамтамасыз ету және энергия тапшылығының алдын алу тұрғысынан аса маңызды.

Автор криогендік энергияны сақтау жүйелерінің теориялық негіздеріне терең талдау жасап, сұйытылған ауаны сақтау процесін жан-жақты зерттеген. Сұйытылған ауаны сақтауға арналған резервуардың құрылымы жобаланып, жылу окшаулау тиімділігі Fusion 360 ортасында модельденді. Жылу шығыны мен температуралық градиенттер есептеліп, сақтау жүйесінің энергетикалық тиімділігі бағаланды. Сонымен қатар, CES технологиясының экологиялық және экономикалық артықшылықтары көрсетілген.

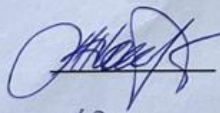
Жұмыс құрылымы жүйелі, иллюстративті материалдар мен есептеулер жеткілікті, ғылыми стиль мен техникалық сауаттылық деңгейі жоғары. Алынған нәтижелер болашақта энергияны сақтау жүйелерін жобалау және жаңартылатын көздермен интеграциялау салаларында қолдануға жарамды.

ЖҰМЫСТЫҢ БАҒАСЫ

Магистрлік диссертация «өте жақсы» (93%) бағаға орындалған, ал оның авторы Қаламғали А.Ж. 7M07113 – «Электротехника және энергетика» мамандығы бойынша «магистр» академиялық дәрежесін иеленуге лайық деп санаймын.

Пікір беруші:

М.Тынышпаев атындағы АЛТ университетінің PhD,ассистент-профессоры

 **Ж.Ж. Калиев**
«18» 06



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

(жұмыс түрінің атауы)

Қаламғали Алтынай Жаңайқызы

(оқушының аты-жөні)

7M07113 - «Электротехника және энергетика»

Тақырыбы: Электр энергиясын жинақтау құралы ретінде криогендік технологияның мүмкіндігін зерттеу

Орындалды:

а) графикалық бөлім _____ парақ

б) түсініктеме _____ бет

Магистрант Қаламғали Алтынайдың магистрлік диссертациясы заманауи және өзекті тақырып – электр энергиясын жинақтау құралы ретінде криогендік технологияларды (LAES – сұйытылған ауа негізіндегі энергия сақтау жүйелері) зерттеуге арналған. Бүгінгі таңда баламалы энергия көздерін тиімді пайдалану мен энергияны ұзақ мерзімді сақтау мәселесі жаһандық маңызға ие. Осы тұрғыда криогендік технологияларды қолдану – болашағы зор бағыттардың бірі болып табылады.

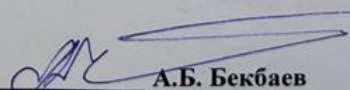
Жұмыс барысында магистрант зерттелетін тақырыпқа жоғары деңгейдегі қызығушылық пен дербестік көрсетті. Ол энергия сақтау жүйелеріне қатысты заманауи ғылыми-техникалық әдебиеттерге жан-жақты талдау жүргізіп, LAES жүйесінің жұмыс принципін, негізгі құрылымдық элементтерін, термодинамикалық үдерістерін және экологиялық-экономикалық тиімділігін зерттеді. Сонымен қатар, Fusion 360 бағдарламалық қамтамасыздандыруы арқылы жүйенің құрылымдық моделін жасақтап, жылу алмасу және қысымды сақтау элементтерінің жұмысын есепке ала отырып, техникалық модельдеу жұмыстарын орындады.

Диссертациялық жұмыста криогендік сұйытту және регазификация сатыларындағы процестердің тиімділігі қарастырылып, оларды оңтайландыру жолдары ұсынылған. Автор энергия тиімділігі мен экологиялық қауіпсіздік көрсеткіштерін салыстырмалы талдау арқылы негіздеп, LAES жүйесін Қазақстан жағдайында қолдану мүмкіндіктерін де қарастырған.

Жұмыс жоғары техникалық сауаттылықпен, логикалық құрылыммен және анық инженерлік тәсілмен орындалған. Барлық зерттеу кезеңдері – теориялық талдаудан бастап модельдік негіздеуге дейін – бірізді және негізделген түрде баяндалған.

Диссертациялық жұмыс барлық талаптарға толық сай келеді және мемлекеттік аттестациялық комиссия отырысында қорғауға ұсынылады. Ал, автор Қаламғали Алтынай 7M07113 – «Электротехника және энергетика» білім беру бағдарламасы бойынша «магистр» академиялық дәрежесіне лайық деп санаймын. Диссертациялық жұмысын «өте жақсы» – 93 баллмен бағалаймын.

Ғылыми жетекші:

Техникалық ғылымдар докторы, профессор  А.Б. Бекбаев

«24» 06 2025 ж.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Қаламғали Алтынай Жанайқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Электр энергиясын жинақтау құралы ретінде криогендік технологияның мүмкіндігін зерттеу

Научный руководитель: Амангельды Бекбаев

Коэффициент Подобия 1: 1.6

Коэффициент Подобия 2: 0.5

Микропробелы: 3

Знаки из других алфавитов: 157

Интервалы: 1

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- ☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- ☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- ☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- ☐ Обоснование:

Дата 25.06.2025

Заведующий кафедрой Энергетики
Сарсебайев БА


Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Қаламғали Алтынай Жаңайқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Электр энергиясын жинақтау құралы ретінде криогендік технологияның мүмкіндігін зерттеу

Научный руководитель: Амангельды Бекбаев

Коэффициент Подобия 1: 1.6

Коэффициент Подобия 2: 0.5

Микропробелы: 3

Знаки из других алфавитов: 157

Интервалы: 1

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- ☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- ☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- ☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- ☐ Обоснование:

Дата 24.06.2025

проверяющий эксперт

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Ө. Бүркітбаев атындағы энергетика және машина жасау институты

Энергетика кафедрасы

Қаламғали Алтынай Жаңайқызы

Электр энергиясын жинақтау құралы ретінде криогендік технологияның мүмкіндігін
зерттеу

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

7М07113 – Электротехника және энергетика

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Ә. Бүркітбаев атындағы энергетика және машина жасау институты

УДК

Қолжазба құқығында

Қаламғали Алтынай Жаңайқызы

Магистр академиялық дәрежесін алу үшін дайындалған

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

Диссертация тақырыбы

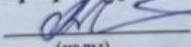
Электр энергиясын жинақтау құралы ретінде криогендік технологияның мүмкіндігін зерттеу

Мамандық бағыты

7M07113 – «Электротехника және энергетика»

Ғылыми жетекші

Техникалық ғылымдар докторы,
профессор

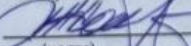
 А.Б. Бекбаев
(қолы)

«24» 06 2025 ж.

Пікір беруші

М.Тынышпаев атындағы АЛТУ университетінің

PhD, ассистент-профессоры

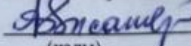
 Ж.Ж. Калиев
(қолы)

«18» 06 2025 ж.

Норма бақылаушы

техн. ғыл. магистры,

аға оқытушы

 А.О. Бердибеков
(қолы)

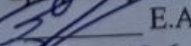
«23» 06 2025 ж.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ



ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
НАО «Казниту им.К.И.Сатпаева»
Институт энергетической техники
и машиностроения
Кафедра менеджмента

PhD, қауымдастырылған
профессор

 Е.А. Сарсенбаев
«23» 06 2025 ж.

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Ә. Бүркітбаев атындағы Энергетика және машина жасау институты

Энергетика кафедрасы

7М07113 – Электротехника және энергетика

БЕКІТЕМІН

Кафедра меңгерушісі

PhD, қауымдастырылған

профессор

Е.А. Сарсенбаев

« » 2025 ж.

**Магистрлік диссертацияны орындауға арналған
ТАПСЫРМА**

Магистрант Қаламғали Алтынай Жаңайқызы

Тақырыбы: «Электр энергиясын жинақтау құралы ретінде криогендік технологияның мүмкіндігін зерттеу»

Университет Ректорының 2023 жылғы "04" 12 № 548-б бұйрығымен бекітілген

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі 2025 жылғы "18" 06

Магистрлік диссертацияның бастапқы деректері: Бұл жұмыста сұйытылған ауаны -196 °C температурада арнайы окшауланған резервуарларда сақтау және сұраныс кезінде оны регазификациялау арқылы электр энергиясын қайта өндіру процесі зерттеледі. Жүйеде ауаны сұйырту, сақтау, қайта газға айналдыру және турбина арқылы электр энергиясын өндіру кезеңдері қарастырылады. Модельдеу Fusion 360 бағдарламасы арқылы жүргізілді. Онда 100 000 литрлік резервуардың жылу өткізгіштік қасиеттері, окшаулау материалдарының (аэрогель, вакуумдық қабат, 304L болат) тиімділігі, жылу ағыны және температуралық өзгерістері зерттелді.

Жылу жоғалту 24 сағат ішінде 13,5 МДж шамасында болды, бұл жалпы сақталған энергияның 0,05%-ын ғана құрайды. Бұл криогендік жүйенің жылу окшаулау тиімділігін көрсетеді. Сонымен қатар, жұмыста энергия сақтау жүйесінің экономикалық және экологиялық аспектілері қарастырылып, басқа балама технологиялармен салыстырылды. Бастапқы параметрлер мен есептік деректер техникалық құжаттамалар мен ғылыми әдебиеттерге сүйене отырып алынды.

Ұсынылған негізгі әдебиеттер саны: 26 атау.

Магистрлік диссертация дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдердің атауы, әзірленетін сұрақтар тізімі	Ғылыми жетекшіге ұсыну мерзімі	Ескертулер
Бөлім 1. Криогендік технологиялар	12.04.2024	Орындалды
Бөлім 2. Сұйытылған ауамен энергия сақтау технологиясы	25.12.2024	Орындалды
Бөлім 3. Криокамераны жобалау және компьютерлік моделін жасау	15.04.2025	Орындалды
Бөлім 4. Криогендік жүйені жалпы энергетикаға енгізу	23.05.2025	Орындалды

Аяқталған магистрлік диссертация үшін, оған қатысты бөлімдердегі диссертация кеңесшілері мен норма бақылаушысының қойған қолдары

Бөлім	Консультант, аты-жөні (ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Криогендік технологиялар	А.Б. Бекбаев, техникалық ғылымдар докторы, профессор	12.04.2024	А.Б. Бекбаев
Сұйытылған ауамен энергия сақтау технологиясы	А.Б. Бекбаев, техникалық ғылымдар докторы, профессор	25.12.2024	А.Б. Бекбаев
Криокамераны жобалау және компьютерлік моделін жасау	А.Б. Бекбаев, техникалық ғылымдар докторы, профессор	15.04.2025	А.Б. Бекбаев
Криогендік жүйені жалпы энергетикаға енгізу	А.Б. Бекбаев, техникалық ғылымдар докторы, профессор	23.05.2025	А.Б. Бекбаев
Норма бақылаушы	А.О. Бердибеков, техника ғылымдарының магистры, аға оқытушы	26.06.2025	А.О. Бердибеков

Ғылыми жетекшісі _____ А.Б. Бекбаев

Тапсырманы орындауға магистрант қабылдады _____ А.Ж. Қаламғали

Күні

« 5 » 12 2023 ж.

АНДАТПА

Бұл жұмыста электр энергиясын ұзақ мерзімді сақтауға арналған балама әдіс ретінде криогендік технологияны қолдану мүмкіндігі қарастырылады. Жаңартылатын энергия көздерінің үзіліссіздігіне байланысты сұйытылған ауаны сақтау жүйесі (LAES) перспективалы шешім ретінде ұсынылады. Зерттеу жұмысы ауаны сұйылту, сақтау және регазификациялау процестерін қамтиды. Резервуардың жылу оқшаулауы Fusion 360 ортасында модельденіп, температура тұрақтылығы мен жылу жоғалуы зерттелді. Сонымен қатар, жүйенің энергетикалық тиімділігі, экологиялық артықшылықтары және басқа сақтау технологияларымен салыстырмалы талдауы ұсынылған. Жұмыс энергияны сақтау жүйелерін жобалау мен жаңғырту саласында қолдануға жарамды.

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассматривается возможность применения криогенной технологии в качестве альтернативного метода для длительного хранения электрической энергии. В связи с непостоянством возобновляемых источников энергии, система хранения сжиженного воздуха (LAES) предлагается как перспективное решение. Исследование охватывает процессы сжижения воздуха, хранения и регазификации. Теплоизоляция резервуара моделирована в среде Fusion 360 с анализом температурной стабильности и теплопотерь. Также представлена оценка энергетической эффективности системы, её экологические преимущества и сравнительный анализ с другими технологиями хранения. Работа может быть использована в области проектирования и модернизации систем хранения энергии.

ABSTRACT

This study explores the use of cryogenic technology as an alternative method for long-term electrical energy storage. Due to the intermittency of renewable energy sources, the liquefied air energy storage (LAES) system is proposed as a promising solution. The research covers air liquefaction, storage, and regasification processes. The thermal insulation of the tank was modeled in Fusion 360, with analysis of temperature stability and heat losses. Additionally, the work provides an evaluation of the system's energy efficiency, its environmental benefits, and a comparative analysis with other storage technologies. The work is applicable in the field of design and modernization of energy storage systems.

МАЗМҰНЫ

	Кіріспе	5
1	Криогендік технологиялар	8
1.1	Энергия сақтаудың қазіргі заманғы технологияларына шолу	8
1.2	Энергияны криогендік сақтау технологиялары	8
1.3	Highview Power энергия сақтауы	11
1.4	Криогеника принциптері: сұйыту және регазификация термодинамикасы	13
1.5	Криогендік технологияның негізгі компоненттері	14
1.6	Энергияны қалпына келтіру жүйесі (турбиналар/генераторлар)	16
2	Сұйытылған ауамен энергия сақтау технологиясы	18
2.1	Төмен температуралы ауа сақтау жүйесі	18
2.2	Түсіру процесі: регазификация және турбогенерация	20
3	Криокамераны жобалау және компьютерлік моделін жасау	23
3.1	Сұйық ауа жинайтын резервуарды жобалау	23
3.2	Энергияны енгізу және шығару талдауы	24
3.3	Жаңартылатын энергия көздерін интеграциялау үшін торды сақтау	26
3.4	Криокамераның моделін жасау	29
3.5	Криогендік камерада төменгі температураның симуляциясын жасау	30
3.6	Резервуардың сақтай алатын энергия көлемі	34
3.7	Басқа да энергия сақтау технологияларымен шығындарды салыстыру	37
3.8	Өмірлік циклді бағалау	38
3.9	Криогендік энергияны сақтаудың экологиялық артықшылықтары және кемшіліктері	39
4	Криогендік жүйені жалпы энергетикаға енгізу	43
4.1	Басқа технологиялармен салыстырғандағы тиімділік	43
4.2	Криогендік жүйелермен баламалы энергия көздерін қосу	44
4.3	Криогенді оқшаулау үшін алдыңғы қатарлы материалдар	51
	Қорытынды	55
	Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	56

КІРІСПЕ

Зерттеудің өзектілігі. Жаңартылатын энергия көздерін (күн, жел) кеңінен енгізу электр энергетика жүйесінің тұрақтылығына жаңа талаптар қояда. Бұл көздердің өндірісі табиғи құбылыстарға байланысты болуына байланысты үзілісті сипатқа ие, ал бұл электр энергиясының артық мөлшерін тиімді сақтау қажеттілігін туындатады. Осы тұрғыдан алғанда энергияны сақтау жүйелері – қазіргі заманғы энергетикадағы басты технологиялық міндеттердің біріне айналды.

Криогендік энергияны сақтау (CES – Cryogenic Energy Storage) — атмосфералық ауаны немесе басқа газдарды терең салқындатып, сұйытылған күйде сақтап, кейін оларды қайта газдандыру арқылы электр энергиясын өндіруге мүмкіндік беретін үнемді әрі экологиялық қауіпсіз технология. Бұл тәсіл энергияны үлкен көлемде және ұзақ мерзімге сақтауға мүмкіндік береді, ал жұмыстық дене ретінде ауаның қолданылуы оны қауіпсіз әрі масштабталатын жүйе етеді.

CES жүйелері сұйытылған ауаны (-196°C температурада) арнайы оқшауланған резервуарларда сақтау арқылы жұмыс істейді. Энергия қажет болған кезде бұл сұйықтық регазификацияланып, турбиналарды айналдыру арқылы электр энергиясына айналады. Бұл жүйе дәстүрлі химиялық аккумуляторларға қарағанда ұзақмерзімді, экологиялық таза және масштабталатын шешім ретінде ерекшеленеді.

Осыған байланысты криогендік энергия сақтау технологияларын зерттеу – қазіргі энергетикадағы өзекті ғылыми-техникалық мәселе болып табылады, оның шешімі энергетикалық қауіпсіздікті, жүйенің икемділігін және жаңартылатын энергия көздерінің үлесін арттыруға мүмкіндік береді.

Зерттеудің мақсаты мен міндеттері. Осы жұмыстың мақсаты – электр энергиясын ұзақ мерзімге қауіпсіз әрі тиімді түрде сақтау үшін криогендік технологияны қолданудың техникалық және технологиялық мүмкіндіктерін кешенді зерттеу және модельдеу.

Жұмыс мақсатына жету үшін келесі міндеттер қойылады:

- 1) Энергияны сақтау саласындағы заманауи технологияларға талдау жүргізу және олардың кемшіліктерін анықтау;
- 2) Криогендік энергияны сақтау жүйесінің физикалық негіздерін және термодинамикалық процестерін зерттеу;
- 3) Сұйытылған ауаны сақтайтын криогендік резервуардың құрылымын жобалау;
- 4) Температуралық модельдер құру арқылы жүйенің жылу оқшаулау тиімділігін бағалау;
- 5) Жүйенің энергия тиімділігіне әсер ететін факторларды анықтау және модельдеу;

6) CES технологиясының техникалық-экономикалық тиімділігін және экологиялық артықшылықтарын негіздеу.

Зерттеу нысаны мен пәні. Зерттеу нысаны – сұйытылған ауаны қолдануға негізделген криогендік энергияны сақтау жүйесі.

Зерттеу пәні – энергияны сұйық күйде сақтауға және оны қайта электр энергиясына айналдыруға арналған криогендік құрылғылардың жұмысы мен олардың тиімділігін арттыру әдістері.

Зерттеу әдістері. Жұмыста келесі ғылыми-зерттеу әдістері қолданылады:

- Криогендік процестердің физикалық және термодинамикалық модельдерін талдау;

- Математикалық және сандық модельдеу әдістері

- Fusion 360 бағдарламалық құралы арқылы температуралық және құрылымдық модельдеу;

- Техникалық-экономикалық талдау әдістері;

- Салыстырмалы талдау және параметрлік зерттеу.

Бұл әдістерді қолдану арқылы жүйенің техникалық орындылығы мен тиімділігін кешенді бағалау жүзеге асырылады.

Ғылыми жаңалық Зерттеу барысында алғаш рет сұйытылған ауаны сақтауға арналған көпқабатты оқшауланған резервуардың температуралық моделі құрастырылды және оның жылу жоғалту көрсеткіштері есептелді. Сонымен қатар, криогендік энергияны сақтау жүйесінің жылу өткізгіштік сипаттамалары имитациялық модельдеу арқылы зерттеліп, оның ұзақ мерзімді сақтау тиімділігі негізделді.

Модельдеу нәтижелері криогендік жүйенің жоғары термиялық тұрақтылығын және экологиялық қауіпсіздігін растады, бұл оны болашақта энергия сақтау құрылғысы ретінде қолдануға мүмкіндік береді.

Жұмыс құрылымы мен көлемі. Диссертациялық жұмыс кіріспеден, алты тараудан, қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және қосымшалардан тұрады. Жалпы жұмыс көлемі – шамамен 56 бет. Жұмыста 10 сурет, 5 кесте бар.

Кіріспеде зерттеу тақырыбының өзектілігі, мақсаты мен міндеттері, объектісі мен пәні, қолданылған әдістер мен жұмыс құрылымы сипатталған.

Бірінші және екінші тарауларда энергияны сақтау технологияларына шолу, криогендік процестер және негізгі компоненттер сипатталған.

Үшінші тарауда криогендік резервуардың жобалануы және жылулық модельдеу нәтижелері келтірілген.

Төртінші тарауда экономикалық және экологиялық тиімділік бағаланған.

Қорытындыда зерттеу нәтижелері негізделіп, болашақ зерттеу бағыттары ұсынылған.

Жарияланымдар. Жұмыс тақырыбы бойынша зерттеу жүргізу кезеңінде келесі жарияланымдар жарық көрді:

2024 жылы «International Satbayev Conference» ғылыми-тәжірибелік журналында «Криогендік технологияны пайдалану арқылы электр энергиясын сақтаудың мүмкіндіктерін талдау» тақырыбында мақала жарияланды.

2025 жылы «International Satbayev Conference» ғылыми-тәжірибелік журналында «Криогендік электр машиналарының салқындату жүйелеріне шолу» тақырыбында мақала жарияланды.

2025 жылы «Проблемы энерго и ресурсосбережения» ғылыми-тәжірибелік журналында «Развития зарядной инфраструктуры для электромобилей в Казахстане» тақырыбында мақала жарияланды.

1 Криогендік технологиялар

1.1 Энергия сақтаудың қазіргі заманғы технологияларына шолу

Энергияны сенімді, ірі көлемде сақтау қажеттілігі кең ауқымды зерттеулер мен энергияны сақтаудың түрлі технологияларына инвестициялар салуға түрткі болды. Бұл технологиялардың әрқайсысының қолданылуына, ұзақтығына, тиімділігі мен құнына байланысты бірегей артықшылықтары мен шектеулері бар.

Литий-ионды аккумуляторлар: Бұл қазіргі уақытта тұтынушылық электроника және желілік қосымшалар үшін энергия сақтаудың ең көп тараған түрі болып табылады. Олар энергия тығыздығының жоғарылығымен және тез әрекет ету уақытымен шектеледі, бірақ салыстырмалы түрде қысқа мерзіммен, қауіпсіздік пайымдауларымен (мысалы, қызып кету қаупімен) және шикізатты (литий, кобальт, никель) алу кезінде қоршаған ортаға әсер етумен шектеледі.

Механикалық сорғы арқылы айдалатын сақтау қондырғысы(МСАҚ): Әлемдік сақтау сыйымдылығының 90%-дан астамын құрайтын энергияны жаппай сақтаудың неғұрлым дамыған және кеңінен қолданылатын түрі. МСАҚ тиімділігі жоғары (70-85% екі жаққа тиімді) және ұзақ қызмет ету мерзіміне ие. Алайда ол географиялық жағынан шектеулі және экологиялық және жер пайдаланудың елеулі проблемаларына ие.

Сығылған ауа энергиясын сақтау (САЭС): Артық электр энергиясын ауаны қысу және оны жер асты каверлерінде сақтау үшін пайдаланады. Босағаннан кейін сығылған ауаны қыздырып, электр энергиясын өндіру үшін турбиналарды пайдалана отырып кеңейтеді. Тиімділік, әдетте, қысылу және кеңею кезеңдерінде жылуудың жоғалуына байланысты төмен (40-55%) болады.

Ұшқыш роторлар мен суперконденсаторлар: Бұл жиілікті бақылау және лезде реакция беру үшін қолданылатын қуатты қысқа мерзімді технологиялар. Олар энергияның өздігінен разрядталуына және тығыздығының төмендеуіне байланысты энергияны ұзақ сақтауға жарамсыз.

Бұл технологиялардың рөлі, құны, беріктігі, қоршаған ортаға әсері, масштабтылығы тұрғысынан шектеулер криогендік энергияны сақтау сияқты баламаларды іздеуді жалғастыруда.[1-3]

1.2 Энергияны криогендік сақтау технологиялары

Криогендік энергияны сақтау, атап айтқанда, сұйық ауа энергиясын сақтау атмосфералық ауаны шамамен -196°C -қа дейін салқындату және оны төмен қысымдағы оқшауланған резервуарларда сақтау арқылы сұйытуды көздейді. Энергия қажет болған жағдайда сұйық ауа буланып, электр энергиясын өндіру

үшін турбинаның көмегімен кеңейеді. Бұл процесс физикалық тұрғыдан дәстүрлі жылу электр станциясына ұқсас, бұл қолданыстағы желілік инфрақұрылыммен ықпалдасуды жеңілдетеді.



1.1-сурет – Криогендік құбыр

Негізгі артықшылықтары:

- Энергияның ең аз шығыны кезінде ұзақ сақтау;
- Атмосфералық ауаны пайдалану (жеткілікті мөлшерде, қауіпсіз және инертті) ;
- Географиялық икемділік және геологиялық шектеулердің болмауы;
- Тиімділігін арттыру үшін жылу және суық қалдықтармен біріктірілуі мүмкін.

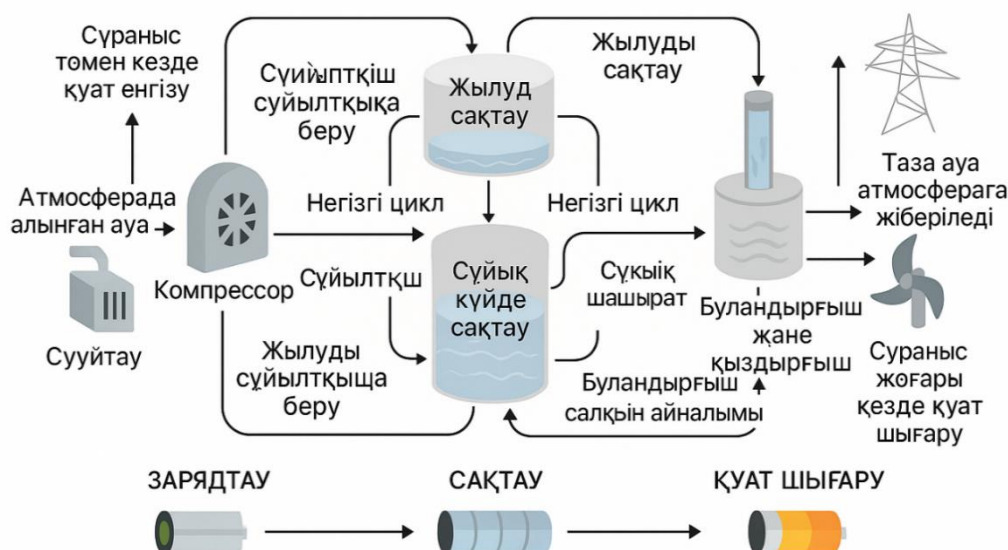
Негізгі кемшіліктері:

- Орташа тиімділік (50-70%);
- Температураны басқару күрделілігі;
- Криогендік жабдықты пайдалану есебінен күрделі шығындардың жоғарылауы.

Криогендік энергияны сақтау жөніндегі зерттеулер 1970 жылдары, негізінен, әскери және аэроғарыштық кен орындарында басталды, әсіресе, криогендік заттарды салқындату жүйелері мен қозғаушы күш жүйелері үшін қолданылды. Алайда 2000-шы жылдары сұраныстың артуына осы технологияға деген қызығушылық жаңартылды.

Соңғы жылдары елеулі ғылыми-өндірістік зерттеулер криогендік жүйелерінде қолданылатын термодинамикалық циклдарды жетілдіруге, оқшаулау материалдарын жақсартуға және жылуды қалпына келтіру тетіктерін енгізуге бағдарланған. Симуляциялық тәсілдерді қолдана отырып жүргізілген әртүрлі зерттеулер масштабта немесе арзан жылу көздерімен үйлесімде өрістету кезінде сақтаудың басқа технологияларымен экономикалық бәсекеге қабілеттілікке қол жеткізу үшін криогендік жүйелерінің әлеуетін көрсетті.[4-6]

Криогендік энергияны сақтау



1.2-сурет – Криогендік энергия сақтау сұлбасы

Сондай-ақ қалдықтарды жылумен қалпына келтіруді оңтайландыру және жалпы энергия тиімділігін арттыру үшін жылу энергиясының біріккен жүйелерімен біріктірілген гибриді конфигурациялар зерттелуде.

1.1-кесте – Энергия сақтау жүйелерінің параметрлерін салыстыру

Параметр	Литий-ион	МСАҚ	САЭС	Криогендік энергия сақтау
Тиімділік (%)	85–95	70–85	40–55	50–70
Ұзақтық	Сағаттар	Сағаттан күнге дейін	Сағаттан күнге дейін	Сағаттан аптаға дейін

1.1-кесте жалғасы

Энергия тығыздығы	Жоғары	Төмен	Орташа	Орташа
Масштаб	Орташа	Жоғары (географиямен шектелген)	Орташа	Жоғары
Қоршаған ортаға әсері	Орташадан жоғары	Жоғары (жер пайдалану)	Орташа	Төмен (шығарындылар жоқ)
Географиялық икемділік	Жоғары	Төмен	Төмен	Жоғары
Кемелдену	Жоғары	Жоғары	Орташа	Енді пайда болды

Жоғарыдағы кестеден литий-ионды аккумуляторлар мен гидравликалық сорғылар өздерінің тиісті бөлімдерінде басым болғанымен, криогендік энергия сақтау бірегей саңылауды толтыратынын көруге болады: ұзақ жұмыс жасайтын, эмиссиясыз, географиялық икемді және масштабты. [7-10]

1.3 Highview Power энергия сақтауы

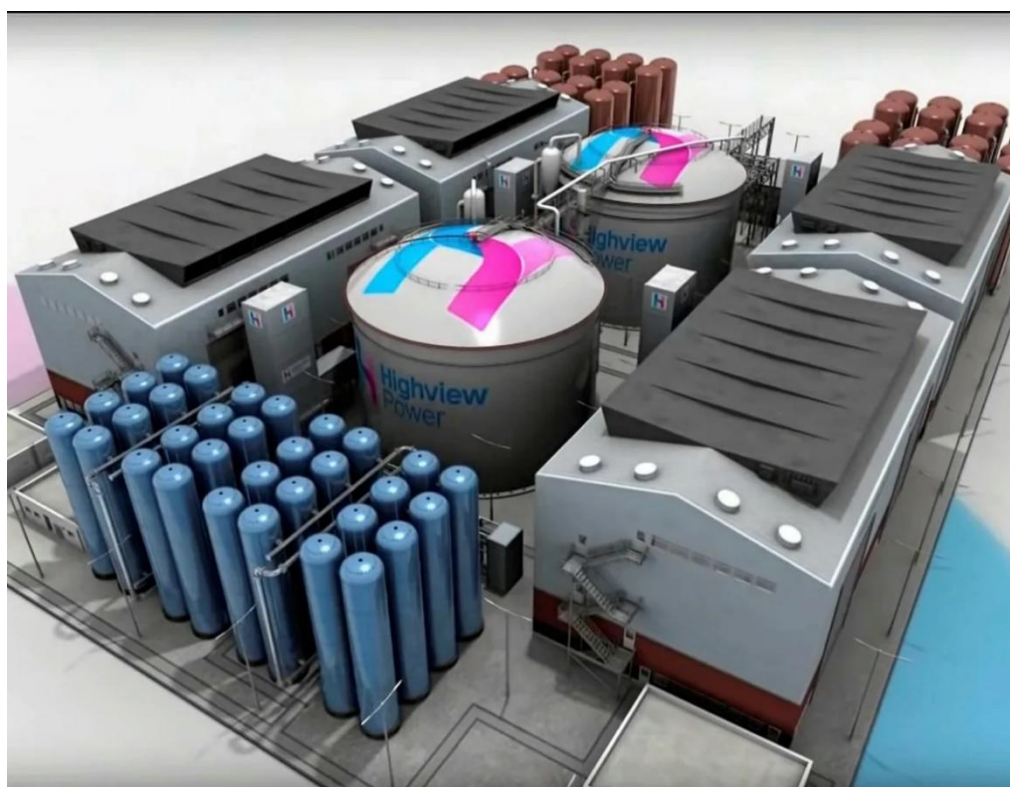
Highview Power, Ұлыбританияның энергия сақтау компаниясы, коммерциялық кригендік технологияларының жетекші әзірлеушісі болып табылады. Компанияның Манчестердегі 2011 жылдан бері жұмыс істеп келе жатқан пилоттық зауытының қуаттылығы 350 кВт және аккумуляторлық батареясының қуаты 2,5 МВт/сағ болып табылады.

Соңғы жаңалықтар бойынша, Highview Power компаниясы криогендік электр сақтау желілік станцияларын, оның ішінде 50МВт/250МВт/сағ электр станцияларын дамыту туралы жариялады. Бұл жобалар Ұлыбритания үкіметінің қолдауымен әзірленеді және жүктемені теңестіру, жаңартылатын энергия көздерін интеграциялау және торларды теңгерімдеу салаларында криогендік энергия сақтаудың нақты әлеуетін көрсетеді.

Highview агрегаттарының негізгі сипаттамалары:

- Екі бағытта да тиімділікті арттыру үшін қалдықтарды жылумен қалпына келтіру жүйелерімен ықпалдастыру;
- Масштабтауға арналған модульдік конструкция;
- Ауа және жабық ілмек жүйелерін пайдалану арқылы қоршаған ортаға ең аз мөлшерде әсер ету.

Жақында Highview Power компаниясы 300 миллион фунт стерлингтік күрделі қаржыландыру раунды сәтті аяқталғаннан кейін Манчестердің Каррингтон қаласында криогендік энергияны сақтаудың ауқымды кешенін салатынын жариялады. Қуаттылығы 300 Мвт / сағ болатын жаңа зауыт 2026 жылы пайдалануға беріледі деп жоспарлануда және Ұлыбританиядағы бес коммерциялық сұйық ауа энергиясын сақтау қондырғысын қамтитын кеңірек орналастыру стратегияның бөлігі ретінде қызмет етеді. Жалпы алғанда, бұл қондырғылар 2030 жылға қарай Арнайы Ұлттық Энергетикалық Жүйе Операторы мақсат қылған болашақ энергетикалық сценарийлердің ұзақ мерзімді энергия сақтау бөлімінің 10%-дан астамын қамтамасыз етеді деп болжануда. Олардың мақсаты біртұтас өтпелі кезеңде 81 Гвт / сағ белгіленген қуатқа дейін жету болып табылады.



1.3-сурет – HighView Energy Storage Ұлыбританиядағы криогендік станция моделі

Әрбір ұсынылған 2,5 Гвт / сағ қондырғысы шамамен 650 000 үй шаруашылығын 12,5 сағаттан астам үздіксіз электр қуатымен қамтамасыз ете алады. Бұл электр желілерінің икемділігіне және ең жоғары жүктемені басқаруға айтарлықтай үлес қосады. Нысандар энергияға деген сұраныс пен ұсыныс арасындағы тепе-теңдікті оңтайландыру, жаңартылатын энергия көздерінің

қысқаруын азайту және қолданыстағы электр жеткізу инфрақұрылымын барынша пайдалану үшін стратегиялық түрде бөлінген.

Бұл жобалар нақты ортада криогендік энергияны сақтаудың өнімділігін, сын-тегеуріндерін, артықшылықтарын түсіну үшін маңызды бастапқы нүкте болып табылады. [11]

1.4 Криогеника принциптері: сұйыту және регазификация термодинамикасы

Криогендік энергияны сақтау жүйелері криогендік ғылымға материалдарды өте төмен температурада зерттеуге және қолдануға негізделген. Энергияны сақтау жағдайында криогендік деп ауаны сұйыту және оны криогендік температурада сақтау, кейіннен сақталған энергияны қалпына келтіру үшін қайта газдандыру процесі түсініледі. Криогендік энергияны сақтау жүйелерінің орындылығы мен тиімділігін бағалау үшін термодинамика қағидаттарын және оған қатысатын негізгі компоненттерді түсіну аса маңызды болып табылады.

Криогендік энергияны сақтаудың негізі болып табылатын іргелі термодинамикалық қағидаты ауаның газ тәрізді күйден сұйық күйге қайтымды түрлендіруі болып табылады. Сұйықтықты газға айналдыру немесе керісінше процесс конверсия булану энтальпиясы есебінен энергияның едәуір мөлшерін қажет етеді.

Сұйыту процесі атмосфералық ауаны шамамен $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (77 K) дейін салқындатудан тұрады, бұл кезде оның негізгі компоненттері, ең алдымен азот пен оттегі сұйыққа айналады. Бұл процесс келесі кадамдардан тұрады:

1)Сығылу: атмосфералық ауаны сорып алады, шаң мен ылғалды жою үшін фильрдан өткізеді, содан кейін жоғары қысымға дейін қысады. Сығылу ауаның температурасын арттырады, бұл кейінгі сатыларда жылудың диссипсиясын қажет етеді;

2)Салқындату: Сығылған ауа жылу алмастқыштар қатарында салқындатылады. Қазіргі заманғы жүйелерде бұл регенеративті салқындатуды қамтуы мүмкін, онда экспансия процесінде шығарылған суық ауа келіп түсетін ауаны алдын ала салқындату үшін пайдаланылады;

3)Кеңею: жоғары қысымдағы салқындатылған ауа кеңейген клапан немесе турбина арқылы кеңейеді, бұл оның температурасын Джоуль-Томсон эффектісі арқылы айтарлықтай төмендетеді, бұл ақырында сұйылтуға әкеледі.

Жалпы, бұл лицелляция процессі энергияны көп қажет етеді, бірақ артық немесе нормадан тыс жаңартылатын электр энергиясын пайдаланған кезде ол басқаша жағдайда босқа кететін энергияны сақтаудың тиімді құралына айналады.

Қайта біріктіру процесі энергия қажет болған кезде сақталатын сұйық ауа жоғары қысымға мәжбүр болып, жылу алмастырғыштар немесе аса қыздырғыштар арқылы өтеді, онда ол қоршаған ортаның жылуын немесе қалдық жылуын сіңіреді. Сұйықтық жылу энергиясын сіңіріп жатқандықтан, ол тез буланып, жоғары қысымды газға 700 реттен астам кеңейеді. Бұл кеңейген газ электр энергиясын өндіретін генератордың турбинаға қосылуына әкеледі.

Регазификация фазасы сұйытуға қарағанда энергия жағынан тиімдірек, ал өнеркәсіптік процестерден немесе жақын маңдағы электр станцияларынан пайда болған жылуды пайдалану жүйенің тиімділігін едәуір арттыруы мүмкін. [12]

1.5 Криогендік технологияның негізгі компоненттері

Ауа сұйытқышы криогендік зарядтау процесінің негізі болып табылады. Ол бірнеше негізгі жүйелерден тұрады:

- Ауаны жинау және тазарту блогы: Сұйылту кезінде бітеліп қалудың немесе қаттылықтың алдын алу үшін қатты денелерді, ылғалды және CO_2 -ді алып тастайды;

- Көп сатылы компрессорлар: келіп түсетін ауаның қысымын арттырады. Сатылар арасындағы интеркулярлар сығылу кезінде пайда болған жылуды алып тастайды;

- Пластина немесе спиральді жылу алмастырғыштар: Бұл жүйенің тиімділігін арттыру үшін келіп түсетін сығылған ауа мен шығыс суық ауа арасындағы тиімді жылу алмасуды қамтамасыз етеді;

- Турбиналарды немесе клапандарды кеңейту: Түпкілікті салқындату және сұйылту үшін қолданылады. Джоуль-Томсонның кеңею клапаны ауа температурасын оның сұйылту нүктесінен төмен түсіріп отырады.

Сұйытқыштың өнімділігі жылу оқшаулағыштың тиімділігіне, жылуды қалпына келтіру тиімділігіне және қолданылатын салқындату циклінің түріне байланысты. Клод және Линде циклдері — ауа сұйыту жүйелерінде жиі қолданылатын термодинамикалық циклдар.

Криогенді сақтауға арналған резервуарға келер болсақ, ауаны сұйытқаннан кейін, буланудың алдын алу үшін өте төмен температурада және төмен қысымда сақтау керек. Оған келесі сипаттамаларға ие арнайы әзірленген криогендік сақтау резервуарларын пайдалану арқылы қол жеткізуге болады:

- Қос қабырғалы конструкция: Цистерналардың әдетте жылудың енуін азайту үшін қабаттар арасында вакуумдық жабындысы немесе оқшаулау материалы (перлит сияқты) бар қос қабырғалары болады;

- Төменгі қысымды жұмыс: Сұйық ауа кенеттен қайнау және қысымның өсу қаупін барынша азайтатын атмосфералық қысымға жақын сақталады;

- Қайнауды басқару жүйелері: Оқшауланудың жоғары дәрежесіне қарамастан, біраз уақытқа дейін қайнауға жол берілмейді. Криогендік жүйелерге қауіпсіздікті қамтамасыз ету үшін қайта сұйыту схемалары немесе желдету жүйелері кіруі мүмкін;

- Материалды таңдау: Цистерналар тот баспайтын болат немесе алюминий қорытпалары сияқты криогендік температурада беріктігі жоғары және жылу өткізгіштігі төмен материалдардан жасалады.

Резервуардың өлшемі мен конструкциясы энергияны сақтаудың талап етілетін қуатына, сақтау ұзақтығына және жылу шығынына сәйкес анықталады. Энергия шығынын барынша азайту және жүйенің денсаулығын сақтау үшін тиімді оқшаулау және қайнауды бақылау өте маңызды.

Жылу алмастырғыштар сұйыту және регазификация процестерінде басты рөл атқаратын криогендік энергияны сақтау жүйелерінің сыни компоненттері болып табылады. Олардың негізгі функциясы әр түрлі температурадағы сұйықтықтар арасындағы жылуды беру болып табылады, олар ең аз энергия шығыны мен максималды жылу тиімділігін қамтамасыз етеді.

Сұйылту фазасы кезінде сығылған ауа кеңейгенге дейін едәуір салқындатылуы тиіс. Жылу алмасқыштар регенеративті салқындатуды қамтамасыз етеді, онда келіп түсетін сығылған ауаны алдын ала салқындату үшін кеңею кезеңінде пайда болған суық қолданылған газдар пайдаланылады. Бұл қадам сыртқы салқындату көздерінен қажетті энергияны азайту есебінен жүйенің тиімділігін айтарлықтай арттырады.

Криогендік қондырғыларда қолданылатын жылу алмастырғыштардың түрлеріне мыналар жатады:

- Фин пластинкасының жылу алмастырғыштары: беткі ауданы мен көлем арақатынасының жоғарылығымен танымал, олар шағын көлемді әрі тиімді, бұл оларды криогеникада қолдану үшін өте қолайлы етеді. Олар сұйықтықтардың контр-ток тәсілімен ағып кетуіне мүмкіндік беретін арналарды қалыптастыру үшін бір-бірінің үстіне салынған көптеген жұқа пластиналардан тұрады;

- Қабықшалы-түтікті жылу алмастырғыштар: неғұрлым сенімді және тазалауға жеңілрек, оларды кейде үлкен сыйымдылықта немесе өнеркәсіптік ауқымдағы қосымшаларда қолданады;

- Спиральді жылу алмастырғыштар: жақсы жылу өнімділігі бар және ойластырылған кеңістіктерде қолдануға жарамды.

Регазификациядағы рөліне келер болсақ, пайдаланылған фазада сұйық ауаны қайтадан газға айналдырғанда қыздыру үшін жылу алмасқыштар қолданылады. Сіңірілген жылудың тез кеңеюіне себепші болады, бұл сұйық ауаның турбиналарды басқаруына мүмкіндік береді. Бұл кезеңде жылудың тиімді алмасуы кеңею кезінде барынша қысым мен энергия өндіру үшін өте маңызды.

Қазіргі заманғы жүйелерде сұйыту кезінде қалдық жылуды ұстап тұру және оны қайта газдандыру кезінде босату үшін жылу энергиясын сақтау құралдары

(мысалы, балқытылған тұздар, фазалық өзгеретін материалдар) қолданылады, бұл екі жаққа тасымалдаудың тиімділігін арттырады.

1.6 Энергияны қалпына келтіру жүйесі (турбиналар/генераторлар)

Энергияны рекуперациялау жүйесі сұйық ауада жиналған жылу мен қысым энергиясын разрядтау фазасы кезінде қайтадан электр энергиясына түрлендіреді. Ол үшін сұйық ауаны жоғары қысымға айдайды, газ тәрізді күйге дейін қыздырып, кеңейту турбиналары немесе ауа қозғалтқыштары арқылы өткізеді.

Радиалды ауа ағынының турбиналары тығыздығы жоғары, ауыспалы ағынды сұйықтықтармен жұмыс істеу қабілетіне байланысты криоген жүйелерінде кеңінен қолданылады. Сұйық ауаны қайта газдандырып, кеңейеді де, ол турбина қалақшалары арқылы өтіп, кинетикалық энергияны білікке береді. Бұл біліктің осі механикалық энергияны электр энергиясына түрлендіретін генератормен қосылады. Турбинаның тиімділігі, материалды таңдау (криогендік температураға байланысты), сондай-ақ термиялық басқару жүйенің өнімділігіне әсер ететін маңызды факторлар болып табылады. Сондай-ақ кейбір жүйелер әр түрлі қысым деңгейінде энергияның кеңеюі мен қалпына келуін жақсарту үшін көп сатылы турбиналармен жабдықталған.

Генераторларға тоқталсақ, әдетте синхронды немесе асинхронды генераторлар қолданылады. Энергия электроникасы мен желілік синхрондау жүйелері тұрақты және реттеліп отыратын электр энергиясын, жаңартылатын энергия көздерімен біріктіру кезінде қамтамасыз етеді.

Криогендік циклдарға көз жүгіртсек, Клод циклі - сұйытылған газбен жұмыс жасауда тиімділігінің жоғары болуына байланысты криогендік қондырғыларда кеңінен қолданылатын тоңазыту циклдерінің бірі. Клод циклінің негізгі кезеңдеріне мыналар жатады:

- Ауаның жоғары қысымға дейін қысылуы;
- Механикалық жұмыстардың бір бөлігін қалпына келтіру кезінде ауаны салқындататын турбинаның жартылай кеңеюі;
- Жылу алмастқыштардың одан әрі салқындатуы;
- Сұйылтуға қол жеткізу үшін Джоуль-Томсон клапанының ақырғы кеңеюі.

Аралық кеңейту үшін турбинаны пайдалану энергияны қалпына келтіруге мүмкіндік береді, бұл Линде циклі сияқты қарапайым циклдармен салыстырғанда сұйылту процесінің жалпы тиімділігін арттырады.

Джоуль-Томсон эффектсі сыртқы жұмыстарды орындамай және қоршаған ортамен жылу алмаспай жоғары қысымнан төмен қысымға дейін кеңейтуге мүмкіндік бергенде нақты газ температурасының өзгеруін сипаттайды. Бөлме температурасындағы газдардың көпшілігі үшін кеңею салқындауға әкеледі, ал

бұл эффект ауаны сұйылтудың соңғы қадамында қолданылатын негізгі принцип.Джоуль- Томсон клапандары қарапайым механикалық құрылғылар болып табылады, бірақ олар қамтамасыз ететін салқындату ауа температурасын сұйылту нүктесінің астына жеткізу үшін аса маңызды.Алайда Джоуль-Томсон эффектісінің өзі салыстырмалы түрде тиімсіз, сондықтан ол әдетте жалпы өнімділікті оңтайландыру үшін Клод цикліндегі турбо экспансия сияқты басқа процестермен бірге қолданылады.

Қазіргі криогендік жүйелер күрделілік, тиімділік және өзіндік құн теңгерімін жасау үшін Клод және Линде циклдерінің элементтерін жиі біріктіреді. Бұл гибриді жүйелер сақтау масштабына, қолда бар қалдық жылу көздеріне, торға қызмет көрсетудің нақты талаптарына байланысты жобаланады.

Сондықтан жылу алмастырушылар мен энергияны қалпына келтіру жүйелері криоген технологиясының табыстылығы үшін өте маңызды, ол энергияны тиімді беруді және бүкіл цикл бойы қалпына келтіруді қамтамасыз етеді. Клод және Джоуль-Томсон циклдары сияқты оңтайландырылған криогенді циклдерді пайдалану энергияны ауқымды сақтау үшін техникалық тұрғыдан өміршең және әлеуетті трансформациялық шешімге айналдырады.[13]

2 Сұйытылған ауамен энергия сақтау технологиясы

2.1 Төмен температуралы ауа сақтау жүйесі

Криогендік энергияны сақтау электр энергиясын сұйытылған ауа түрінде сақталатын потенциалды энергияға айналдыратын және кейіннен оны пайдалануға жарамды электр энергиясына қайта жабдықтау процестерінің бірізділігі арқылы жұмыс істейді. Бұл бөлімде екі сатыдан тұратын тетік сипатталады: артық энергияны пайдалана отырып ауа сұйытылған жүктеу процесі және криогендік сұйықтық жоғары оқшауланған резервуарларда сақталатын сақтау сатысы.

Жүктеу процесі: артық энергияны пайдалана отырып ауаны сұйылту болса, зарядтау процесі криогендік энергияны сақтаудың негізі болып табылады. Оның барысында электр энергиясы сақталған жылу энергиясына және атмосфералық ауаны сұйыту арқылы фазалық өзгеру энергиясына айналады. Бұл үдеріс әдетте артық электр энергиясының есебінен жүзеге асырылады, әсіресе тұрақты емес жаңартылатын энергия көздерінен алынған — мысалы, жел немесе күн энергиясы — олар шыңы емес кезеңдерде шамадан тыс қуат өндіруі мүмкін.

1-қадам: Ауаны қабылдау және сүзу. Қоршаған ауа алдымен жүйеге вентильдер арқылы түседі. Ауаның құрамында қатты заттар, ылғал, көмірқышқыл газы және басқа қоспалар бар болғандықтан, оны төмен температурада мұздың немесе қатты CO_2 (құрғақ мұздың) пайда болуын болдырмау үшін сүзіп, тазартқан жөн. Сүзгілер мен кептіргіштер келесі сатыға тек таза ауаның жетуін қамтамасыз ете отырып, ластаушы заттарын алып тастайды.

2-қадам: Сығылу. Тазартылған ауаны жоғары қысымға дейін, яғни, 6-дан 10 МПа-ға дейін қысады. Сығылу процесі кезінде ауа температурасын адиабатикалық қыздыру арқылы көтереді, сондықтан жылуды диссоциациялау және сығылу тиімділігін арттыру үшін қысу сатыларының арасына аралық салқындатқыштар орнатылады.

3-қадам: Жылу алмастырғыштармен алдын ала салқындату. Жоғары қысымды ауа жылу алмастырғыштар арқылы өтеді, онда оны алдын ала суық ауамен салқындату регазификация процесінен шығады немесе салқындатудың қосымша схемаларымен жүргізіледі. Бұл қадам жүйенің барынша термодинамикалық тиімділігіне қол жеткізу үшін шешуші мәнге ие.

4-қадам: Кеңейту және сұйыту. Алдын ала дайындалған жоғары қысымды ауа кеңейту турбинасын немесе Джоуль-Томсон клапанын пайдалана отырып кеңейтіледі, соның нәтижесінде температура тез төмендейді. Ауа сұйылту нүктесінің астында (азот үшін шамамен -196°C) салқындап, криогендік сұйықтыққа айналады. [14]

Осы сұйытылған ауа кейін жиналып, криогендік сақтауға арналған резервуарларға тасымалданады. Энергияны қалпына келтіру үшін турбоаппараттың кеңейтуін қамтитын Клод циклі көбінесе Линденің қарапайым Джоуль-Томсон негізіндегі циклымен салыстырғанда тиімділігі жоғары болып келеді.

Бұл процесте пайдаланылатын энергия жоғалмайды, бірақ сұйытылған ауаны буландырудың латентті жылуы түрінде сақталады, ол кейін түсіру процесінде шығарылады. Бұл әдіс артық электр энергиясын сақтауға жарамды криогендік сұйықтыққа айналдыратындықтан, ол электр желісіндегі теңгерімсіздіктерді және жаңартылатын энергия көздерін пайдаланудағы ауытқуларды жоюдың тұрақты тәсілін қамтамасыз етеді.

Сақтау фазасы. Ауаны сұйытқаннан кейін булану мен энергияның жоғалуын болдырмау үшін қатаң белгіленген жағдайларда сақтау қажет. Осы мақсатта жылудың ағуын барынша азайта отырып, аса төмен температураны ұстап тұруға арналған арнайы криогендік резервуарлар қолданылады.

Криогендік сақтауға арналған резервуарлар — тот баспайтын болаттан немесе алюминий қорытпаларынан жасалған, температураға төзімділігі жоғары және құрылымдық беріктігі төмен материалдардан жасалған екі қабырғалы қысымды ыдыстар. Ішкі резервуардың құрамында сұйытылған ауа болады, ал сыртқы қабығы құрылымдық тірек пен оқшаулауды қамтамасыз етеді.

Вакуумдық оқшаулау екі қабырғаның арасына өткізгіш және конвективті жылу беруді болдыратын вакуум арқылы жасалады.

Перлитті немесе көп қабатты оқшаулағыш : Сәулелі жылу берілуін одан әрі азайту үшін майда ұнтақты оқшаулау немесе шағылыстырғыш пленканың бірнеше қабаты жиі қосылады.

Қайнауың алдын алу: Жоғары сапалы жылу оқшаулауына қарамастан, аз мөлшерде жылудың бөлінуі сөзсіз, соның салдарынан мардымсыз қайнап кетеді. Криогендік энергия сақтау жүйелері қайнауың қауіпсіз алдын алу үшін реконденсация қондырғыларымен немесе желдету механизмдерімен жабдықталады.

Сақтау шарттары:

- Қысым: КЭС цистерналары әдетте төмен қысымда (1-2 тор) жұмыс істейді, бұл жарылу қаупін және құрылымдық кернеуді төмендетеді;

- Температураға қызмет көрсету: Цистерналар сұйытылған ауа компоненттерінің қайнау нүктесіне жақын, тұрақты температураны ұстап тұруға арналған (әдетте -196°C). Тұрақтылықты қамтамасыз ету үшін температураны бақылау жүйелері қолданылады;

- Масштабтылығы: Цистерналар модульді болуы мүмкін, бұл жүйе дизайнерлеріне энергияға сұранысты немесе генерацияның артық деңгейін негізге ала отырып, сақтау сыйымдылығын масштабтауға мүмкіндік береді.

Қауіпсіздік үшін келесі бөліктерге назар аударамыз:

- Қысымды жеңілдету клапандары: Қоршаған ортаның жоғары температурасы немесе жүйенің ақаулығы салдарынан қысымның күтпеген өсуін болдырмау үшін;
- Инертті материал: Жұмыс сұйықтығы ауа (негізінен азот пен оттегі) болғандықтан, жүйе аккумуляторлық батареялардың кейбір химикаттарымен байланысты уыттылықтан және химиялық қауіптіліктен аулақ болады;
- Өрт қаупі жоқ: Криогендік энергия сақтау жүйелерінде жалпы қауіпсіздікті арттыратын жанғыш материалдар қолданылмайды. [15]

2.2 Түсіру процесі: регазификация және турбогенерация

Криогендік энергияны сақтау жүйесіндегі айдау процесі сақталған сұйық ауаны қайтадан электр энергиясына айналдыруды көздейді. Бұған турбинаны пайдалана отырып, регазификация мен электр энергиясын өндіруді қамтитын термодинамикалық түрлендірулер тізбегі арқылы қол жеткізіледі.

1-қадам: Сұйық ауа қысымының артуы.Топ желіден қуатты қажет еткен кезде сақталатын сұйық ауа криогендік резервуарлардан алынады және криогендік сұйықтық сорғыларын пайдалана отырып, жоғары қысымға дейін айдалады. Бұл сорғылар тиімді және сұйық фазасының тығыздығы жоғары және тұтқырлығының төмендеуі салдарынан сығылған газға қарағанда энергияны едәуір аз қажет етеді.

2-қадам: Қайта жіктеу.Сығылған сұйық ауа кейін қыздырылады және бақыланатын процесте қайта газдандырылады. Сыртқы көзден жылуды сіңіре отырып, ол қайтадан газ тәрізді күйге айналады. Бұл конверсия көлемінің айтарлықтай өсуіне әкеледі , сұйық ауа атмосфералық қысым кезінде шамамен 700 рет буланып, турбиналарды жүргізуге жарамды жоғары қысымды газды құрайды.

Регазификацияға арналған жылу бірнеше көздерден келуі мүмкін:

- Қоршаған ортаның ауасы немесе қоршаған ортаның жылуы
- Өнеркәсіптік процестерден немесе жақын маңдағы электр станцияларынан жылу қалдықтары
- Зарядтау процесі кезінде немесе жаңартылатын көздерден жылуды сақтайтын арнайы жылу энергиясының жинақтағыштары.

Бұл кезеңде тиімді жылу алмасу шешуші мәнге ие. Жылу алмастырғыштар немесе аса қыздырғыштар энергияны суық сұйық ауаға ластағыштарсыз немесе қысым тербеліссіз түрлендіреді.

3-қадам: Электр энергиясын кеңейту және өндіру.Қазіргі уақытта жоғары қысым мен температурада тұрған регазификацияланған ауа электр генераторларына қосылған кеңейту турбиналары арқылы жіберіледі. Турбина

калақшалары арқылы кеңейе отырып, газ ротор білігін айналдырып, ол генераторды басқарып, электр энергиясын өндіреді.

Криогендік энергия сақтаудың қазіргі заманғы жүйелері:

- Энергияны оңтайландырылған қалпына келтіруге арналған бір сатылы немесе көп сатылы турбиналар;
- Тормен байланысқан жүйелерге арналған синхронды генераторлар;
- Тұрақты және сапалы электр энергиясын өндіруді қамтамасыз етуге арналған инверторлар мен қуат бақылаушылары.

Қуатты модуляциялау мүмкіндігі тек жаппай электрмен жабдықтау үшін ғана емес, сонымен қатар жиілікті реттеу және қуатты резервтеу сияқты тор теңгерімдеу қызметтері үшін де жарамды етеді.

Жүйе тиімділігін талдауда энергияны конверсиялаудың барлық технологиялары сияқты криогендік энергияны сақтау әр кезеңде тиімсіздіктермен үрейленеді. Криогеника жүйесінің жалпы тиімділігі, әдетте, жобалауға, интеграциялауға, сондай-ақ пайдалану шарттарына байланысты 50%-дан 70%-ға дейінгі аралықта болады.

Шығын көздері:

- Сығылу шығыны: тұтынылатын энергияның едәуір бөлігі ауаның қысылуына жұмсалады. Өзара пісіру мен оңтайландыруға қарамастан, бұл қадам энергия шығынын едәуір арттырады;
- Сақтау кезінде жылудың жоғалуы: Сақтауға арналған резервуарлар жақсы жылытылғанымен, әсіресе ұзақ сақтау кезінде аздап қайнау орын алуы мүмкін;
- Регазификация кезінде жылудың жоғалуы: жылу алмасудың тиімсіздігі немесе жылу көздерінің жеткіліксіздігі кеңею кезінде энергия өндіруді төмендетуі мүмкін;
- Механикалық және электрлік шығындар: Турбиналық және генераторлық жүйелер де үйкеліс, кедергі, энергияны тиімсіз түрлендіру салдарынан шығынға ұшырайды.

Осы кемшіліктерге қарамастан, криогеника жүйелері кейбір қосымшаларда тиімділік көрсеткішін аздауын өтейтін бірегей артықшылықтар ұсынады:

- Ұзақ сақтау мүмкіндігі (бірнеше сағаттан бірнеше аптаға дейін);
- Географиялық икемділік;
- Қалдықтарды энергиямен жабдықтау көздерінде пайдалану;
- Қоршаған ортаға ең аз әсер ету және қауіпсіздік.

Екі бағытта да жұмыс істеу тиімділігін арттыру үшін жылу энергиясын біріктіру қажет. Криогеника жүйелерінің тиімділігін арттырудың ең тиімді стратегиялары: жылу энергиясын интеграциялау, қалдықтарды азайту және негізгі процестерде энергия тұтынуды азайту үшін жылу мен суық қалдықтарын пайдалану болып табылады.

Жылу энергиясын регазификациялау кезінде интеграциялау. Қайта газдандыру кезеңінде төмен сұрыпты немесе қалдық жылуды ұстай отырып,

криогендік энергия сақтау жүйелері электр қыздырғыштардың немесе арнайы қазандықтардың қажеттілігін болдырмайды. Жарамды дереккөздерге мыналар жатады:

- Газ турбиналарынан немесе қозғалтқыштардан шығатын газдар;
- Өнеркәсіптік пештерден немесе химиялық процестерден жылу қалдықтары;
- Аудандық жылумен жабдықтау желілерінен жылуды қалпына келтіру.

Мұндай интеграция тек тиімділікті арттырып қана қоймай, сонымен қатар жаңартылатын энергия көздері жүйелерін энергетикалық тораптар (мысалы, электр энергетикасы, жылыту, өндіріс) ретінде тартымды етеді, бұл оларды әртүрлі секторлар арасында тасымалдауға мүмкіндік береді.

Сұйылту кезінде суықты қалпына келтіру. Сұйылту процесі суық жылу энергиясын сақтау жүйелерін пайдалана отырып қалпына келтіруге және сақтауға болатын суық энергияның едәуір мөлшерін өндіреді. Бұл сақталған суық кейін ауаны алдын ала салқындату жүйесінде қайтадан пайдалануы мүмкін:

Жылу және электрлік сақтауды біріктіру арқылы КЭС жүйелері неғұрлым тиімді жұмыс істей алады және олардың үнемділігі мен өзін-өзі ақтау уақытын арттыра отырып, энергияны әр түрлі қолдану үшін пайдаланылуы мүмкін.

Жылу энергиясын сақтау. Криогениканың кейбір заманауи қондырғылары жылу энергиясын сақтаудың арнайы құрылғыларымен жабдықталған, мысалы:

- Балқытылған тұздар;
- Фазаны өзгерту материалдары;
- Ыстық қиыршық тасты қабаттар.

Бұл құрылғылар зарядтау кезінде артық жылу энергиясын сақтайды және оны қайта газдандыру, температураның ауытқуын тегістеу және температураны басқаруды жақсарту кезінде босатады.

Энергияны криогендік сақтау жүйелерінде түсіру процесі мұқият әзірленген термодинамикалық циклдің шарықтау шегін білдіреді. Сығымдау, қайта газдандыру және кеңейту арқылы жинақталған сұйық ауа қоршаған ортаға ең аз әсер ете отырып, қайтадан электр энергиясына айналады. КЭС жүйелері қазіргі уақытта екі бағытта да бірқатар тиімділік көрсетсе де, жылу энергиясын интеграциялау және жүйені оңтайландыру едәуір жетілдіруге жол ашады.

Бүкіл цикл бойы жылу мен суықты қалпына келтіру және пайдалану арқылы КЭС жүйелері тиімді ғана емес, сонымен қатар жаңартылатын энергия көздерін интеграциялауды, тордың тұрақтылығын, сондай-ақ сектордың өзара іс-әрекетін таза және масштабты тәсілмен қолдауға қабілетті интеграцияланған энергетикалық жүйелер үшін жан-жақты құралдарға айналуы мүмкін. [16-20]

3 Криокамераны жобалау және компьютерлік моделін жасау

3.1 Сұйық ауа жинайтын резервуарды жобалау

Криогендік энергияны сақтау жүйесінің жұмыс қабілеттілігін бағалау үшін Fusion 360 жылу модельдеу құралдарын пайдалана отырып, жеңілдетілген концептуалды модель жасалды және имитацияланды. Бұл симуляцияның мақсаты ауа сұйытқышы, криогенді сақтауға арналған резервуар, жылу алмастыру жүйесі сияқты негізгі компоненттердің температуралық сипаттамаларын, жылудың жоғалуын, тиімділік үрдістерін зарядтау-түсірудің толық циклы бойынша талдау болды.

Криогендік энергияны сақтау жүйелері табиғатта күрделі және көпфизикалы болғанымен, бұл оңайлатылған симуляция энергия шығыны мен оқшаулау сипаттамаларын анықтау үшін өте маңызды болып табылатын температуралық және жылу өткізгіштік өзгерістеріне арнайы бағдарланған.

Симуляция Fusion 360 программасында орындалды, ол 3D модельдердің есептеу жылулық талдауын ұсынады.

Ішкі және сыртқы қабықтары, оқшаулағыш қабаттары, сондай-ақ ішкі/ауыспалы клапандары бар жеңілдетілген криогендік резервуарларды құрастырудың 3D моделін жасау.

Материалдық қасиеттерін тағайындау:

- Ішкі резервуар: Тот баспайтын болаттан жасалған (жылу өткізгіштігі: $16 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$);

- Оқшаулау: Аэрогель ($0,02 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$);

- Сыртқы резервуар: Алюминий ($237 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$).

Бастапқы шарттарды орнату:

- Ауаның ішкі температурасы: -196°C (77 К , сұйық азот деңгейі);

- Қоршаған ортаның температурасы: 25°C (298 К);

- Тәулік бойы сақтау кезеңінде стационарлық жылу беру имитациясы;

- Сыртқы беттерде (қоршаған ауада) конвективті жылу трансфертін және қабаттар арқылы жылу өткізгішті қолдану;

- Температураны модельдеу.

Стандартты сыртқы жағдайлармен виртуалды тәулік бойы симуляцияны іске қосқаннан кейін:

- Ішкі және сыртқы беттер арасындағы бастапқы температура градиентінің іші шамамен 273 К болды (-196°C ішінен $+25^\circ \text{C}$);

- 24 сағат бойы жылу беру сақтау резервуарының ішіндегі температураның $\sim 2,8 \text{ К}$ -ке көтерілуіне себеп болды;

- Жалпы жылу беру шамамен $13,5 \text{ МДж}$ құрады, бұл шамамен сақталған энергияның шамамен $0,05\%$ -ына тең (сақталған энергияның $\sim 6,7 \text{ ГДж}$ бар 100 000 литрлік резервуар негізінде).

Негізгі термиялық бақылаулар:

- Аэрогельді оқшаулау қабаты бір тәулік бойы температураның 3 К-тан төмен көтерілуін шектей отырып, өте тиімді екенін дәлелдеді;
- Сыртқы қабықша беткі температураның айтарлықтай көтерілгенін көрсетті, бұл жылу берудің бар екенін растайды, сонымен қатар тежеудің тиімділігін көрсетеді;
- Клапандар мен жалғағыштарға жақын аудандарда жылудың локализацияланған ағуы байқалды, бұл осы аудандарда күшейтілген оқшаулаудың қажеттілігін көрсетеді.

3.2 Энергияны енгізу және шығару талдауы

1 МВт/4 МВт/сағ БЭК электр станциясы үшін энергия ағынының жеңілдетілген болжамдарын пайдалана отырып, біз барлық сақтау циклы бойынша энергияның кіруі мен шығуын бағаладық.

Зарядтау фазасы (сұйылту)

- 1 тонна ауаны сұйытуға қажетті энергия: ~700 кВт/сағ;
- 4 МВт/сағ сақтау үшін (~5,7 тонна сұйытылған ауаға барабар);
- Енгізу заряды $\approx 4000 \text{ кВт/сағ} \div 0,6$ (тиімділік) $\approx 6666 \text{ кВт/сағ}$.

Сақтау сатысы

- 24 сағат ішінде жылу шығыны (симуляциядан): ~13,5 МДж;
- Шығындар $\approx 3,75 \text{ кВт/сағ}$, жалпы сақталған энергияның 0,09%-ына тең.

Түсіру фазасы (регазификация және генерациялау)

- Сұйық ауаны регазификациялау үшін жылу қалдықтарын пайдалану;
- Жылу көзінің температурасы: 300 °С (өнеркәсіптік газдардан тыс);
- Қалпына келтіру тиімділігі: ~85%;
- Таза электр қуаты (турбина шығыны болғаннан кейін): ~60% сақталған энергия = 2400 кВт/сағ электр энергиясы жеткізілді.

Қабылдау және кері алу дағы тиімділігі:

$$RTE = \frac{\text{Энергия шығуы (заряд беру)}}{\text{Энергия кіруі (заряд алу)}} = \frac{2,400}{6,666} \approx 36\%$$

$$RTE = \text{Заряд енгізу шығысы} = 6\,662\,400 \approx 36\%$$

Алайда бұл базалық сценарий жылуды оңтайландырылған қалпына келтіруді немесе гибриді интеграцияны әлі қамтыған жоқ. Жылу интеграциясының көмегімен тиімділікті 65-70%-ға дейін ұлғайтуға болады.

Fusion 360-тың жылу симуляциясы жылуды басқару және жүйені оқшаулау тиімділігі туралы құнды мағлұматтар берді. Энергияны конверсиялау процесі (құлдырату/кеңейту) MATLAB/Simulink немесе Aspen HYSYS сияқты құралдармен жақсы модельделгенімен, температуралық мінез-құлық жалпы тиімділікке тікелей әсер ететін сыни жобалау шектеуі болып табылады.

Негізгі қорытындылар:

- Булануды барынша азайту және ұзақ уақыт бойы энергияны сақтау үшін жылу оқшаулағышы аса маңызды;

- Жергілікті ысыраптарды болдырмау үшін клапандар мен жалғауларды оқшаулау күшейтілуі тиіс;

- Жүйенің тиімділігі айтарлықтай дәрежеде арзан жылу көздерін біріктіруге байланысты;

- Сақтау шығындары ең аз ($<1\%$), бұл КЭС-тің энергияны ұзақ сақтауға жарамдылығын растайды.

Жылу менеджменті - энергияны криогендік сақтау жүйесінің маңызды инженерлік аспектілерінің бірі. Тиімді жылу менеджменті энергияны ұстап тұруға, пайдалану тиімділігіне, жүйенің қызмет ету мерзіміне тікелей әсер етеді. Температураның өте төмен болуына байланысты ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа дейін төмен) температура градиенттеріне төтеп беру, булануды барынша азайту және сұйытуда да, регазификацияда да жылу алмасуды оңтайландыру үшін мұқият жоспарлау және берік материалдар қажет.

1. Криогендік компоненттерді оқшаулау

Жүйеге жылудың енуін барынша азайтудың негізгі әдісі - өнімділігі жоғары оқшаулағышты қолдану. КЭС-тің қазіргі заманғы жүйелерінде бұл әдетте мыналарды қамтиды:

- Көп қабатты оқшаулау : Шағылыстырғыш фольга мен ғарыш материалының кезектесіп тұратын қабаттардан тұратын сәулелі жылу беруін азайтуда өте тиімді;

- Вакуумдық күртешелер: Сақтауға арналған резервуардың немесе құбырлардың қос қабырғалары арасындағы вакуум конвективті жылу беруін болдырмайды және өткізгіштіктің жоғалуын айтарлықтай төмендетеді;

- Аэрогельді оқшаулау: клапандар мен байланыстар сияқты сыни нүктелерде жиі қолданылатын аса төмен жылу өткізгіштігі бар ($\sim 0,02\text{ Вт/м}\cdot\text{K}$) кремний негізіндегі алдыңғы қатарлы материалдар.

Бұл әдістер жүйеге жылудың қажетсіз берілуін азайтады, олай болмаған жағдайда уақытынан бұрын регазификацияға және энергия шығынына әкеледі.

2. Температураны бақылау және реттеу

Криогендік датчиктерді (мысалы, платинаға төзімділік термометрлерін немесе кремний диодты датчиктерді) пайдалана отырып, ішкі және сыртқы температураларды нақты уақыт режимінде бақылау келесі процесстерден тұрады:

- Жылудың ағуын немесе оқшаулаудың тозуын анықтау;
- Тұрақтылықты сақтауға арналған қысымды немесе ағынды автоматты реттеу;

- Қашықтықтан диагностикалау және қауіпсіздікті қамтамасыз ету үшін басқару жүйелерімен интеграциялау.

3. Жылу беру жүйелерін оңтайландыру

Жылу тиімділігі тиеу-түсіру фазалары кезінде жылу алмастырушыларды оптимизациялау арқылы одан әрі жақсартылады:

- Қарсы ағынды конфигурацияларға артықшылық беріледі, өйткені олар сұйықтықтар арасындағы температураның ең жоғары градиентін қамтамасыз етеді, жылуды беруді жақсартады.

- Рекуперативті жылу алмастыра алатындар сұйытылған қалдықтарды регазификациялау кезінде ұстай және сақтай алады және оны сұйытудың келесі циклында қайта пайдалана алады.

- Модульді жылу алмастырғыш аккумуляторлар тиімді масштабтауға және қызмет көрсетуге мүмкіндік береді.

4. Жылу энергиясын сақтау құрылғылары

КЭС-тің негізгі жүйелеріне ыстық және суық жылу энергиясын сақтауға арналған резервуарлар жатады:

- Ыстық резервуарлар қайта газдандыру кезінде пайдалану үшін артық жылуды (күн жылу панельдерінен, өнеркәсіптік қалдықтардан немесе компрессорлардан) сақтайды;

- Салқындатуға арналған резервуарлар келіп түсетін ауаны алдын ала салқындату немесе өнеркәсіптік салқындату қызметтерін көрсету үшін сұйылтудан төмен деңгейдегі салқындату энергиясын қалпына келтіреді.

Бұл қосарлы сақтау стратегиясы энергия ағындарын тегістейді, екі жаққа да тиімділікті арттырады, сондай-ақ КЭС-ке жылу және электр энергиясының интеграцияланған торабы ретінде әрекет етуге мүмкіндік береді.

3.3 Жаңартылатын энергия көздерін интеграциялау үшін торды сақтау

Криогендік энергия сақтауды практикалық жолмен масштабтау және өрістету жолдарын көрсету үшін шағын қала немесе өнеркәсіптік өңір үшін жаңартылатын энергия көздерін ықпалдастыруды көздейтін жағдайды мысалға келтірейік.

- Өңір: Күн сәулесінің енуі жоғары болатын орташа қала (мысалы, 100 МВт күн электр станциясы);

- Ең жоғары жүктеме: 80 МВт;

- Күннің тәуліктік профициті (шыңнан тыс): ~40 МВт/сағ;

- Қажетті сақтау сыйымдылығы: 200 МВт сағ;
- Разрядтың ұзақтығы: 5 сағат (мысалы, 5 сағат ішінде 40 МВт);
- Мақсаты: Күн энергиясының артық мөлшерін түске дейін сақтау және оны кешкі шыңға жіберу.

КЭС жүйесін өлшеу

Сақтауға қойылатын энергияға қажеттілік:

$$E_{\text{керекті}} = 200 \text{ МВт}$$

- Қабылдау және түсіру кезінде есептік тиімділік (жылудың қалдықтарын біріктіру кезінде):

$$\eta = 65\%$$

- Сұйылтуға арналған енгізу энергиясы:

$$E_{\text{кіру}} = \frac{E_{\text{керекті}}}{\eta} = \frac{200}{0.65} \approx 308 \text{ МВт}$$

- Ауаның қажетті криогенді массасы (сақтау энергиясының тығыздығы ~200 кВТ/т):

$$M_{\text{ауа}} = \frac{200,000 \text{ кВТ}}{200 \text{ кВТ/тон}} = 1,000 \text{ тонна}$$

- Цистерна көлемі (сұйық ауаның тығыздығы ~870 кг/м³):

$$V_{\text{ауа}} = \frac{1,000,000 \text{ кг}}{870 \text{ кг/м}^3} \approx 1,150 \text{ м}^3$$



3.1-сурет – Криогендік камера резервуары

Сөйтіп, жүйе модульді резервуарлардың үстіне таратылған, әрқайсысының өлшемі шамамен 100-200 м² болатын ~1150 м² криогенді сақтауды қажет етеді.

Жабдықтың өлшемдері:

- Ауа сұйытқышының сыйымдылығы: ~30-35 МВт (10 сағат өңдеу инсталляторы);

- Кеңейту турбиналары: 40-50 МВт;

- Жылу сақтау орны: 300 МВт/сағ жылу (ыстық) + 150 МВт/сағ суық (интеграция қажет болса).

Операциялық стратегия

- Күндізгі уақыт: Артық күн энергиясы сұйытқышты пайдалану және агрегаттарды зарядтау үшін пайдаланылады;

- Кеш: Сұйық ауа сақталатын жылуды пайдалана отырып, турбиналарды ең жоғары жүктемелерді қанағаттандыру үшін қайта газдандырылады;

- Бір түнде: суық энергия қайта өңделеді немесе өнеркәсіптік салқындату үшін пайдаланылады.

Конфигурацияның артықшылықтары:

- Диспетчерлік жаңартылатын энергия көздері: Айнымалы күн энергиясын сенімді түрде кешкі қуатқа түрлендіреді;

- Төмендетілген ең жоғары жүктемелер: Тор кептелістерін және қазба отынмен жұмыс істейтін шың электр станцияларына сүйенуді төмендетеді;

- Ұзақ мерзімді үнемдеу: Күрделі шығындардың жоғарылығы, операциялық шығындардың төмендігі, сондай-ақ ұзақ қызмет ету мерзімі (20+ жыл);

- CO₂ шығарындыларының азаюы: жаңартылатын энергия көздерімен үйлескен нөлдік эмиссиялық энергиямен жабдықтауды қамтамасыз етеді.

Криогендік энергияны сақтауды үлкен масштабта орналастыру үшін жылу менеджментінің стратегиялары дәл жүйе өлшемдерімен үйлескен өмірлік маңызы бар. КЭС-тің жақсы әзірленген жүйесі жаңартылатын энергия көздерінің артық көлемін сақтап қана қоймай, тордың сенімділігін қамтамасыз етеді, жылу шығынын барынша азайтып, энергия икемділігін арттырады. Бұл жағдайды зерттеу ұзақ мерзімді, таза және масштабты шешім ретінде БЭК-ті өңірлік электр желісіне кіріктірудің практикалық орындылығын көрсетеді. [21-23]

3.4 Криокамераның моделін жасау

Бұл криогенді сақтауға арналған резервуар сұйық ауа немесе сұйық азот сияқты сұйытылған газдарды өте төмен температурада, әдетте -196°С шамасында қауіпсіз ұстауға арналған.



3.2-сурет – Жобаланған криогендік камера

3.2-суретте көрсетілген - биіктігі 1865 мм және диаметрі 700 мм цилиндрлік құрылымы бар резервуар ықшам өлшемдерді сенімді термиялық өнімділікпен теңестіреді. Оның жалпы салмағы 758 кг құрылымдық тұтастық пен ұзақ мерзімді тұрақтылықты қамтамасыз ететін, берік, криогендік қолайлы материалдарды пайдалануды көрсетеді. Резервуар қалыңдығы 5 мм тот баспайтын болаттан жасалған 304л ішкі ыдыстан басталатын төрт қабатты қабырға жүйесі арқылы жасалған, оның тамаша криогендік беріктігі мен коррозияға төзімділігі үшін таңдалған. Оның айналасында аэрогельді оқшаулаудың 7 мм қабаты бар, бұл өте төмен жылу өткізгіштігімен танымал заманауи материал. Жылу беруді одан әрі басу үшін конвективті және өткізгіштік шығындарды тиімді түрде жоя отырып, 13 мм вакуумдық саңылау қосылады. Ең

сыртқы қабат ішкі жүйені қоршаған орта мен механикалық кернеуден қорғайтын 4 мм қорғаныш болат қабықтан тұрады.

Бұл көп қабатты конфигурация термиялық модельдеу арқылы бағаланды, бұл резервуардың сыртқы ортаның температурасы $43,9^{\circ}\text{C}$ -қа дейін көтерілсе де, ішкі криогендік температураны сақтай алатынын көрсетті. Бұл конструкцияның жылудың түсуін азайтудағы, ең аз қайнатуды қамтамасыз етудегі және тұрақты сақтау жағдайларын сақтаудағы тиімділігін растайды. Жетілдірілген материалдар мен инженерлік дәлдіктің үйлесімі бұл резервуарды криогендік энергияны сақтаудың заманауи қолданбалары үшін, әсіресе жаңартылатын энергия көздерін біріктіруді қолдау жүйесі ретінде өте қолайлы етеді. Оның сенімді жылу оқшаулауы, құрылымдық тұрақтылығы және қауіпсіз, инертті жұмыс сұйықтықтарымен үйлесімділігі оның энергияны ұзақ уақыт сақтау қажеттіліктері үшін практикалық және тұрақты шешім ретіндегі әлеуетін көрсетеді.



3.3-сурет – Криокамераның ішкі құрылысы

3.5 Криогендік камерада төменгі температураның симуляциясын жасау

Қоршаған ортаның нақты жағдайында көп қабатты криогенді сақтауға арналған резервуар қабырғасының оқшаулау өнімділігін бағалау үшін термиялық модельдеу жүргізілді. Модельдеу резервуардың қоршаған ортаның әртүрлі температураларына ұшыраған кезде -196°C (сұйытылған ауаға немесе азотқа тән) мақсатты ішкі температурасын қаншалықты жақсы сақтайтынын тексеруге бағытталған.

Қабатты қабырға конфигурациясы

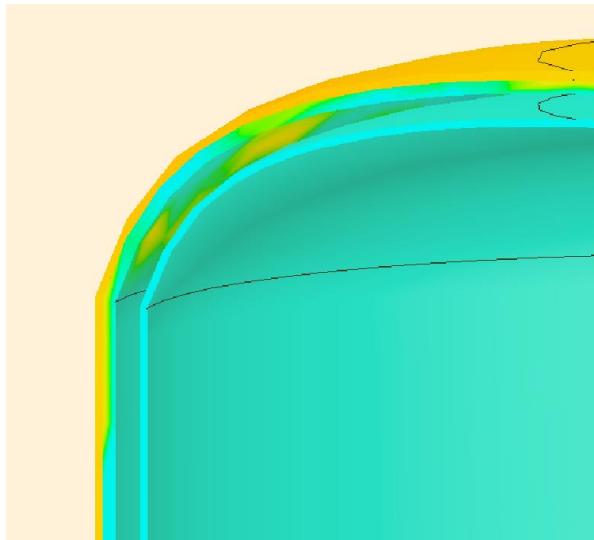
Имитацияланған резервуар қабырғасы келесі төрт қабатты құрылыммен жобаланған:

- Ішкі қабық (5 мм – тот баспайтын болат 304): құрылымдық тұтастық пен криогендік үйлесімділікті қамтамасыз етеді. Тот баспайтын болат 304 криогендік температурада тамаша икемділігі мен беріктігі үшін таңдалды, бұл сұйық ауаның қауіпсіз сақталуын қамтамасыз етеді.

Оқшаулау қабаты (7 мм – аэрогель): аэрогель-өте төмен жылу өткізгіштігімен ($\sim 0,01-0,02$ Вт/м·К) белгілі жоғары өнімді нанокеуекті материал. Бұл қабат жылу өткізгіштікке және радиациялық жылу берілуіне қарсы негізгі тосқауыл ретінде қызмет етеді, жылу тұрақтылығына айтарлықтай ықпал етеді.

Вакуумдық саңылау (13 мм): вакуумдық қабат оқшаулау мен сыртқы қабық арасындағы конвективті және өткізгіш жылу беруді іс жүзінде жояды. Аэрогельмен біріктірілген бұл қабат жылудың түсуін күрт төмендететін қос термиялық тосқауыл жасайды.

Сыртқы қабық (4 мм – құрылымдық болат): қоршаған ортаны қорғау қызметін атқарады және механикалық қолдауды қамтамасыз етеді.



3.4-сурет - Температураны қысым астындағы камера температурасы

Құрылымдық болат сыртқы қабат арқылы минималды жылу беруді қамтамасыз ете отырып, беріктігін сақтайды. 3.4-суретте симуляция кезіндегі криогендік камераның ішіндегі және сыртындағы температура өзгеруі көрсетілген.

Модельдеу шарттары:

- Ішкі температура: -196°C (77 K) – сұйық ауа температурасы;
- Қоршаған ортаның бастапқы температурасы: 25°C ;

- Шекті сыни сынақ: қабырға құрылымы арқылы жылу беріле бастаған еңіс нүктені анықтау үшін қоршаған ортаның температурасы бірте-бірте көтерілді.

Модельдеу нәтижелері:

- Жүйе -196°C тұрақты ішкі температураны $43,9^{\circ}\text{C}$ сыртқы температураға дейін ұстап тұрды;

- Осы сәттен кейін оқшаулағыш қабаттар арқылы жылу берудің басталуын көрсететін шамалы жылу түсуі басталды;

- Осы шекті деңгейге дейін қабатты құрылым криогендік сұйықтықтың өлшенетін жылынуын сәтті болдырмады.

Өнімділігіне келер болсақ, материалдың бұл конфигурациясы қоршаған ортадан криогендік температура градиентіне шамамен 240°C ішкі жылу өсімінсіз төтеп бере отырып, тамаша жылу кедергісін көрсетеді. Аэрогельді және вакуумды оқшаулауды криогендік рейтингі бар тот баспайтын болатпен бірге қолдану төмен ішкі температураны сақтауда жоғары тиімділігін дәлелдеді.

Сонымен, осындай құрылым қайнауың жоғалуын азайтады, қайта салқындату үшін энергия шығынын азайтады, қоршаған ортаның құбылмалы жағдайында ұзақ мерзімді жылу сенімділігін қамтамасыз етеді.

Бұл нәтижелер таңдалған материалдардың комбинациясы сенімді, пассивті жылу оқшаулау жүйесін қамтамасыз ететінін растайды. Ол криогендік энергияны сақтау қолданбаларында пайдалану үшін өте қолайлы, мұнда ұзақ уақыт бойы өте төмен температураны ұстап тұру өте маңызды болғандықтан осы шарттар тиісінше орындалды:

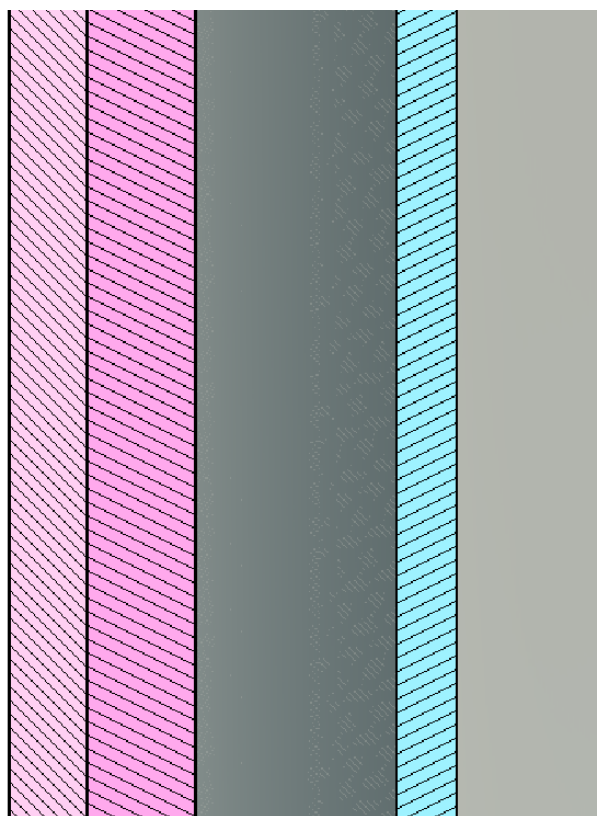
- Сақталған сұйытылған ауаны сақтау;
- Энергия шығынын азайту;
- Сақталған қуатты сенімді түрде жіберуге мүмкіндік беру.

3.1-кесте – Криогендік сақтауға арналған резервуар – негізгі параметрлер

Параметр	Мән	Бірлік	Жазбалар
Жалпы биіктігі	1865	Мм	Кемені және тірек құрылымын қамтиды
Сыртқы диаметрі	700	Мм	Сыртқы қабықшаның диаметрі
Жалпы массасы	758	Кг	Шамаланған жалпы салмағы (бос цистерна)
Қабырға құрылымы	4 қабатты	—	Тот баспайтын болат + аэрогель + вакуум + сыртқы қабық
Ішкі кеме қалыңдығы	5	Мм	304L тот баспайтын болаттан жасалған
Аэрогель оқшаулағышы	7	Мм	Жоғары өнімді жылу оқшаулағышы

3.4-кесте жалғасы

Вакуумдық саңылау ені	13	мм	Конвекция мен өткізгіштіктің алдын алу
Сыртқы қабықшаның қалыңдығы	4	мм	Болаттан немесе тот баспайтын болаттан жасалған конструкция
Жұмыс сұйықтығы	Сұйық ауа / Азот	—	Криогендік температурада сақталады
Ішкі температура	−196	° С	Сұйық ауаны пайдалану температурасы
Қоршаған ортаның макс температурасы	43.9	° С	Ішкі температураның өзгеруіне дейінгі шекті мән

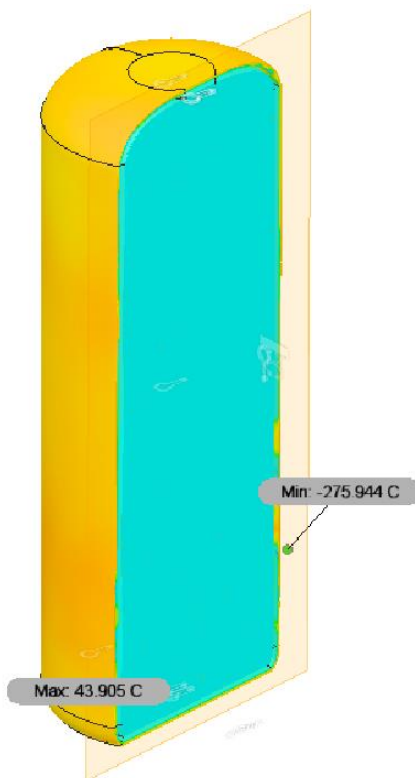


3.5-сурет – Резервуар және оқшаулағыш араларындағы вакумдық саңылау

Ұзақ мерзімді энергияны сақтау технологияларына әлемдік сұраныстың артып келе жатқанын ескере отырып, бұл оқшаулауды орнату болашақта КЭС-ті енгізу үшін техникалық тұрғыдан тиімді және экономикалық тұрғыдан тартымды шешім болып табылады.

Модельдеу 5 мм 304 баспайтын болаттан, 7 мм аэрогельден, 13 мм вакуумдық саңылаудан және 4 мм сыртқы болат қабықтан тұратын криогендік

резервуардың конструкциясы ішкі криогендік ортаға әсер етпестен қоршаған ортаның температурасына шамамен 44°С дейін төтеп бере алатынын растайды. Бұл нәтижелер әртүрлі климаттық жағдайларда криогендік сақтау жүйелерінің практикалық тиімділігін растайды, олардың болашақ жаңартылатын энергия көздері желілері үшін қауіпсіз, масштабталатын және өнімділігі жоғары энергия сақтау шешімдері ретіндегі әлеуетін көрсетеді.



3.6-сурет – Минималды және максималды температуралар

3.6-суретте сыртқы температура көрсетілген, ол 43,9 °С құрайды, осы температурадан асқан соң ішкі сұйытылған ауа сақталатын тот баспайтын болаттан жасалынған камера ішінде температура өзгере бастайды. Қоршаған ауа температурасы 25 °С деп есептесек, бізде 18,9 °С температуралық артықшылық бар. Бұл жобаланған жүйенің тиімділігін көрсетеді.

3.6 Резервуардың сақтай алатын энергия көлемі

Ішкі көлемі 0,576 м³ цилиндрлік криогендік резервуардың энергия сақтау көрсеткіштерін бағалау үшін термодинамикалық есептеулер сериясы орындалды.

1) Сақталатын криогенді сұйықтықтың массасы

Жұмыс ортасы - сұйық ауа, оның бар болуы және инертті қасиеті үшін іріктеледі. Стандартты тығыздығы 870 кг/м^3 негізінде цистерна ұстай алатын сұйық ауаның массасы есептелді:

$$M = 0.576 \text{ м}^3 \times 870 \text{ кг/м}^3 = 501.1 \text{ кг}$$

2) Сақталған энергия (латентті жылу құрамы)

Резервуарда сақталатын энергия сұйық ауаның булануының латентті жылуына сәйкес келеді. $213\,000 \text{ Дж/кг}$ мәнін пайдаланып, сақталған энергияның жалпы көлемі мынадай деп табылды:

$$E_C = 501.1 \times 213,000 \text{ Дж} = 1.07 \times 10^8 \text{ Дж} = 29.74 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}$$

3) Пайдалануға жарамды энергия шығару

Шығару кезеңінде пайдалануға жарамды энергияны бағалау үшін регазификацияланған ауа турбинада кеңейеді деп болжанған, орташа тиімділігі 65% және нақты энтальпия өсімі $200\,000 \text{ Дж/кг}$:

$$E_{II} = 501.1 \times 200,000 \times 0.65 = 65.14 \times 10^6 \text{ Дж} = 18.09 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}$$

4) Энергия шығыны

Сақталатын энергия мен қалпына келтірілетін энергияның (11.65 кВтсағ) арасындағы айырмашылық жылу шығынын, механикалық үйкелісті, сондай-ақ жүйедегі басқа да тиімсіздіктерді білдіреді.

$$E_{III} = 11.65 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}$$

5) Екі жаққа сапардың тиімділігі

Ауаны сұйыту үшін 21 кВт/сағ енгізу энергиясының талабын болжау:

$$\eta_A = \frac{18.09}{21} \times 100\% = 86.1\%$$

6) Энергияның көлемдік тығыздығы

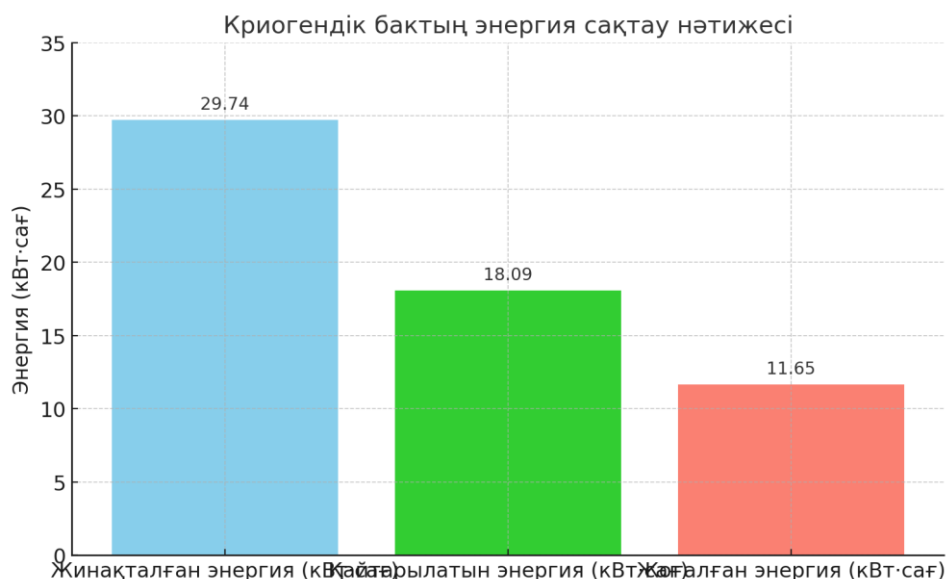
Криогенді сұйықтықтың 1 текше метріне сақталатын энергия:

$$W_E = \frac{29.74}{0.576} = 51.65 \text{ кВт} \cdot \text{сағ/м}^3$$

Есептеулер көрсеткендей, криогендік резервуар энергияның жоғары көлемдік тығыздығын және айналмалы циклдің жоғары тиімділігін қамтамасыз етеді, бұл оны жаңартылатын энергия интеграциясы мен желіні теңестіру жүйелерінде энергияны ұзақ уақыт сақтауға жарамды етеді.

3.2-кесте – Сақталатын энергия параметрлері

Параметр	Мән
Ішкі көлем	0,576 м ³
Сұйық ауа массасы	~501,1 кг
Сақталған энергия	~29,74 кВт/сағ
Қалпына келтірілетін энергия	~18,09 кВт/сағ
Энергия тығыздығы	~51,65 кВт/м ³
Айналғандағы тиімділік	~86,1%



3.7-сурет – Криогендік энергия сақтау диаграммасы

Жинақталған энергия: 29.74 кВт·сағ

Қайтарылатын энергия: 18.09 кВт·сағ

Жоғалған энергия: 11.65 кВт·сағ

Бұл диаграмма 0.576 м³ көлеміндегі криогендік сұйық ауа сақтайтын бактың энергия сақтау мүмкіндігін көрсетеді. Есептеу барысында сұйық ауаның тығыздығы 870 кг/м³, ал булану үшін қажет жасырын жылу мөлшері 213 000 Дж/кг деп алынды.

Нәтижесінде:

- Жалпы энергия қоры: 29.74 кВт·сағ;
- Турбина арқылы қайтарылатын энергия: 18.09 кВт·сағ;
- Жоғалатын энергия: 11.65 кВт·сағ (негізінен жылулық және механикалық шығындардан).

Жүйенің дөңгелек тиімділігі 86.1% құрайды. Бұл криогендік технологияның ұзақ мерзімді энергия сақтау үшін тиімділігін және болашағын дәлелдейді.

3.7 Басқа да энергия сақтау технологияларымен шығындарды салыстыру

Энергияны таза, икемді және масштабты сақтауға әлемдік сұраныстың өсуіне қарай бәсекелес технологиялардың экономикалық өміршеңдігі мен қоршаған ортаға тигізетін әсерін бағалау өте маңызды. Криогендік энергияны сақтау жүйелері коммерциялық кеңістікте пайда болғанымен, олардың ұзақ қызмет ету мерзіміне, масштабтылығына, қоршаған ортаға ең аз әсер етуіне байланысты уәде береді. Бұл бөлімде шығындарды салыстырмалы талдау, өмірлік циклді бағалау және литий-ионды аккумуляторлар және айдалатын сақтау электр станциялары сияқты неғұрлым қалыптасқан технологиялармен салыстырғанда экологиялық пайдаға шолу келтіріледі.

Энергия сақтаудың кез келген шешімін бағалау кезінде екі негізгі қаржылық көрсеткіш ескеріледі:

- Күрделі шығындар (белгіленген сыйымдылықтың \$/кВт/с)
- Сақтаудың нивелирленген құны (жүйенің қызмет ету мерзімі ішінде жеткізілген энергияның \$/кВт/с)

3.3-кесте – Энергия сақтау технологияларының қолдану қымбаттылығы

Технология	Күрделі шығындар (\$/кВт/с)	Энергияны сақтау бойынша бірліктік (нормаланған) құны (\$/кВт)	Екі жаққа да тиімділік	Өмір сүру уақыты
Литий-ионды аккумулятор батареясы	300–600	150–250	85–95%	8-15 жыл (3000-5000 цикл)

3.3-кесте жалғасы

Гидравликалық сорғылар жүйесі	150–300	100–200	70–85%	40-60 жас
Сығылған ауа (САЭС)	100–250	120–200	40–55%	20-30 жас
Криогендік сақтау орны	250–500	140–220	50–70%	25-30 ас

Бақылау:

- КЭС-тің күрделі шығыстары САЭС және гидроэнергетикаға қарағанда жоғары, бірақ жоғары қуаттылыққа масштабтау кезінде литий-ионмен салыстырылады;

- КЭС технологияларының ілгерілеуіне, жаппай өндірістің, жылу интеграциясының жақсаруына қарай төмендейді деп күтілуде;

- КЭС ұзақ уақыт (4-10 сағаттан астам) пайдалануда үнемді, онда литий-ионды аккумуляторлар экономикалық тұрғыдан тиімсіз болады.

КЭС-тің артықшылықтарының бірі жетілген жеткізу тізбектері мен инженерлік стандарттардан пайда көретін жалпы өнеркәсіптік жабдықтарды (мысалы, компрессорларды, жылу алмастырғыштарды, цистерналарды) пайдалану болып табылады. Соған қарағанда, литий-ионды аккумуляторлар қымбат материалдарды (литий, кобальт) және кәдеге жарату үшін мамандандырылған инфрақұрылымды қажет етеді.

3.8 Өмірлік циклді бағалау

Өмірлік циклді бағалау жүйенің өндірістен пайдаланудан шығаруға дейінгі жалпы экологиялық және энергетикалық әсерін бағалайды. КЭС жүйелері көптеген санаттар бойынша қолайлы балл жинайды:

Өндіріс сатысындағы негізгі факторлар:

- Негізгі материалдар (болат, алюминий, оқшаулағыш) мол және қайта өңдеуге ыңғайлы;

- КЭС-те сирек кездесетін жерді немесе улы металдарды пайдаланбайды;

- Құрылыс-монтаждау жұмыстары ірі гидравликалық жүйелерге немесе САЭС жүйелеріне қарағанда аз бұзылады.

Пайдалану кезеңіне келер болсақ:

- КЭС жүйелерінде пайдалану кезінде тікелей шығарындылар болмайды;

- Ауа уытты емес, инертті және жанартылатын жұмыс сұйықтығы ретінде пайдаланылады;

- Литий-ионды жүйелерге қарағанда химиялық тозудың жоқтығынан техникалық қызмет көрсету қажеттілігі салыстырмалы түрде төмен.

Қызмет мерзімінің аяқталуы кезінде криогендік резервуарлар мен ілеспе жабдықтар қайта өңделуі немесе қайта бейінделуі мүмкін. Қауіпті қалдықтар пайда болмайды және пайдаланудан шығаруға әсері ең аз болып табылады. Соған қарағанда литий-ионды аккумуляторлар елеулі экологиялық қиындықтар туғызады:

Литий мен кобальт өндіру топырақтың тозуына, судың ластануына, кейбір өңірлерде адам құқықтарына қатысты алаңдаушылыққа әкеп соғады. Аккумуляторлық батареяларды кәдеге жарату қымбат әрі энергияны көп қажет ететін процесс болып табылады, жаһандық инфрақұрылым шектеулі. Тиісінше кәдеге жарату өрт қаупіне және улы химикаттардың ағуына әкеп соғуы мүмкін.

3.9 Криогендік энергияны сақтаудың экологиялық артықшылықтары және кемшіліктері

Криогендік энергияны сақтау қазіргі уақытта әзірленіп жатқан энергияны сақтаудың ең таза технологияларының бірі болып табылады. Оның экологиялық артықшылықтар мынадай:

- Нөлдік эмиссиялық операция. КЭС зарядтау немесе шығару кезінде CO_2 , NO_x , SO_2 және басқа да ластаушы заттарды бөлмейді. Барлық процесс артық жаңартылатын энергия көздері бойынша жүрсе, ол тиімді көміртекті бейтарап болып табылады;

- Отынсыз және жанбайтын. САЭС немесе газ шыңы қондырғыларына қарағанда КЭС жүйелері қазба отынды немесе жануды қажет етпейді. Бұл отынды сақтауға, ағып кетуге және жануға байланысты қауіптерді жояды;

- Жаңартылатын энергия көздерін интеграциялауды қолдау. КЭС күн және жел энергиясының өзгергіштігін теңестіруге көмектеседі, бұл жаңартылатын энергия көздеріне оларды азайтпай үлкен енуге мүмкіндік береді. Бұл парниктік газдар шығарындыларын жанама түрде азайта отырып, резервтік қазба отын электр станцияларының қажеттілігін төмендетеді;

- Суды тұтынбайды. Гидро және жылу электр станциялары көбінесе салқындату немесе пайдалану үшін едәуір мөлшерде суды қажет етеді. КЭС құрғақ процесс болып табылады, бұл қуаң аймақтарға немесе су тапшылығына тап болған аудандарға өте қолайлы;

- Қауіпсіз және уытты емес. Жұмыс ортасы (ауа немесе азот) зиянсыз. КЭС жарылыс, өрт немесе химиялық қауіптілік тудырмайды, бұл қалалық және өнеркәсіптік аудандарда орналасуды қауіпсіз етеді;

- Қалдықтардың жылуды қалпына келтіру әлеуеті. КЭС жүйелері басқаша жоғалтатын төмен сұрыпты өнеркәсіптік қалдықтар жылуын пайдалану арқылы жүйенің жалпы тиімділігін арттыра алады. Бұл айналымдағы энергия ағындарына септігін тигізіп, энергия тиімділігін арттырады;

- Пайдалану кезіндегі нөлдік шығарындылар. Криогендік энергияны сақтаудың КЭС маңызды экологиялық артықшылықтарының бірі олардың нөлдік шығындылар болып табылады. Жылу алу үшін табиғи газды қажет ететін қазба отын электр станцияларынан немесе ауа энергиясын сақтаудың сығылған жүйелерінен айырмашылығы, КЭС жүйелері қандай да бір жанусыз немесе зиянды өндіріссіз жұмыс істейді.

Зарядтау кезеңінде КЭС жүйелері, әдетте, жел немесе күн энергиясынан бастап, компрессорлар мен ауаны сұйыту процестеріне дейін жаңартылатын электр энергиясын пайдаланады. Осының салдарынан энергия сақтау циклы кезінде парниктік газдар шығарындылары жоқ. Сұйытылған ауа қайтадан отынды жағусыз немесе ластаушы заттарды бөлмей-ақ жылытылған цистерналарда сақталады, содан кейін электр энергиясын алу үшін кеңейтіледі. Бұл жабық, шығарындысыз цикл КЭС-ті декарбонизация стратегиялары үшін қолайлы серіктес етеді: Жаңартылатын көздерден (мысалы, түнде немесе тыныш ауа райында) аз энергия өндіретін кезеңдерде жіберу мүмкіндігімен таза электр энергиясын өндіруге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, көміртекті көп қажет ететін технологияларды пайдалана отырып, резервтік қондырғыларды іске қосу қажеттілігін болдырмайды. Тордың көміртегінің жалпы қарқындылығын төмендетуге көмектеседі.

Нетто-нөлге қол жеткізуге ұмтылған коммуналдық қызметтер мен электр желілері операторлары үшін КЭС сенімділікке нұқсан келтірмей, экологиялық және нормативтік талаптарға жауап береді.

Тағы бір экологиялық пайда – ауаны инертті, мол және қауіпсіз ортаны жұмыс сұйықтығы ретінде пайдалану. Бұл энергияны сақтаудың немесе электр энергиясын өндірудің басқа технологияларына қарама-қайшы келеді, олар:

- Жанғыш отындар (табиғи газ, сутегі);
- Улы химиялық заттар (қорғасын-қышқыл аккумуляторлары);
- Тапшы немесе қауіпті материалдар (литий, кобальт).

КЭС әдетте қоршаған ауаны немесе кейбір конструкцияларда таза азотты пайдаланады. Бұл газдар мыналар болып табылады:

- Уытты емес;
- Жанбайтын;
- Химиялық тұрақты;
- Барлық жерде бар.

Бұл КЭС жүйелерінің химиялық ағу, жарылыс немесе өрт қаупі жоқ екендігін білдіреді және халық тығыз қоныстанған немесе өнеркәсіптік аудандарда орнату үшін қолайлы етеді. Ағып кеткен немесе үзілген жағдайда жүйеден шығатын ауа немесе азот зиян келтірмей, атмосфераға шығады.

Бұдан басқа, ауаны пайдалану шығынды және ресурсты көп қажет ететін өндіру немесе кәдеге жарату процестерінің қажеттілігін жойып, технологияның бүкіл өмірлік циклі ішінде қоршаған ортаға жалпы әсерін төмендетеді.

Осы артықшылықтарға қарамастан, криогендік энергияны сақтау техникалық, экономикалық және экологиялық жағынан кемшіліктері ие. Бұл факторларды нақты іске асыруды және ұзақ мерзімді орындылықты қамтамасыз ету үшін қарастыру қажет:

Күрделі шығындардың жоғары мөлшері, оның ішінде, КЭС-ті кең ауқымда қабылдау үшін негізгі кедергілердің бірі капиталдың жоғары аванстық шығындары болып табылады. Жүйеге мыналар кіреді:

- Өнеркәсіптік газды сұйылтуға арналған компрессорлар мен қондырғылар;
- Криогендік өнімді сақтауға және оқшаулағышқа арналған резервуарлар;
- Тиімділігі жоғары турбиналар мен жылу алмастырғыштар.

Бұл компоненттердің көбі газ бен тоңазытқыштың алдыңғы қатарлы технологиясын пайдаланғанымен, КЭС-ті қолдану үшін қажетті мамандандыру және дәлдік машина жасау бастапқы инвестицияларды ұлғайтады. Мысалы, екі қабырғалы вакуумды жылы цистерналар мен төмен температуралы құбырлар өндіріс және монтаждау шығындарын едәуір арттырады.

Пайдалану шығындарының төмендігіне қарамастан (отынға ең аз қызмет көрсету және нөлдік тұтыну есебінен) литий-ионды аккумуляторлық батареялар бағасының құлдырауымен салыстырғанда аванстық күрделі шығындар коммуналдық қызметтерді немесе тез пайда іздеп жүрген инвесторларды қорқытуы мүмкін.

Жеңілдету стратегиясы бойынша ауқым экономикасы, мемлекеттік ынталандыру, сондай-ақ қалдық жылу көздерімен бірлесіп орналасу уақыт өте келе осы шығындарды азайтуға көмектесе алады.

Криогендік сақтау орны химиялық аккумуляторларға немесе қазба отынға қарағанда, энергияның көлемдік тығыздығы төмен болады. Демек, КЭС-те сақталатын энергияның бірдей көлемі үлкен физикалық инфрақұрылымды қажет етеді. Яғни, 1 МВт сағ электр энергиясын сақтау үшін 5-7 тонна сұйытылған ауа және жалпы көлемі 10 м³ асатын сақтауға арналған резервуарлар керек.

Бұл КЭС-ті ғарыштық шектелген орталарда (мысалы, тұрғын немесе жылжымалы қосымшалар) пайдалануға шектеулі және жерді пайдалану аз

шектелген желілік, коммуналдық немесе өнеркәсіптік объектілер үшін неғұрлым қолайлы етеді.

Жұмсарту стратегиясында модульдік резервуар конструкцияларын және жер асты сақтау нұсқаларын пайдалану еңбек өнімділігін арттыру кезінде кеңістікті оңтайландырады.

КЭС энергияның көптеген түрлендірулерін болжайды: электрлік механикалық (сығылу), жылулық (салқындату), фаза (сұйылту), және механикалық (кеңею). Әр кезеңде жылулық және механикалық ысыраптар орын алады, бұл екі ұшындағы жалпы тиімділікті төмендетеді (әдетте 50-70%-ға).

Негізгі шығындарға мыналар жатады:

- Қысу тиімсіздігі және жылу диссипсиясы;
- Жетілмеген оқшаулау салдарынан сақтау кезінде қайнату;
- Регазификация кезіндегі жылу беру шығындары.

Жылу мен суық қалпына келтіру интеграциясынсыз энергия үнемдеу қысқа мерзімді пайдалану кезінде КЭС-тің бәсекеге қабілеттілігін төмендетуі мүмкін. КЭС-ті өнеркәсіптік қалдықтармен немесе күн жылу коллекторларымен интеграциялау тиімділікті арттырады. Жылу энергиясын сақтау жүйелерін ыстық және суық энергия үшін пайдалану энергияның таза шығынын одан әрі төмендетеді. Осы міндеттерді шешу үшін алдыңғы қатарлы оқшаулау материалдарында және неғұрлым тиімді циклдарда (мысалы, Клод регенеративтік циклдарда) зерттеулер жүргізілуде.

Литий-ионды аккумуляторлар немесе гидравликалық сорғылармен салыстырғанда КЭС әлі күнге дейін коммерциялық қолдануды аз табатын, енді қалыптасып келе жатқан технология болып табылады. Бұл мынаған әкеледі:

- Ұзақ мерзімді тиімділігі туралы шектеулі деректер;
- Инвесторлар мен коммуналдық қызметтердің шешімсіздігі;
- Стандартталған жобалау хаттамаларының болмауы.

Жеңілдету стратегиясы: Табысты жобалар (мысалы, Highview Power-тың Ұлыбритания мен АҚШ-тағы жобалары) операцияларға деген сенімді арттырады және КЭС-тің әлеуетін көрсетеді. Ғылыми-зерттеу және тәжірибелік-конструкторлық және саяси қолдауды жалғастыру КЭС-ті кеңінен қабылдау үшін өте маңызды.

4 Криогендік технологияларды жалпы энергетикаға енгізу

4.1 Басқа технологиялармен салыстырғандағы тиімділік

Криогеника ұзақ сақтау, географиялық икемділік, сондай-ақ нөлдік эмиссиялық операция сияқты көптеген артықшылықтарды ұсынса да, ол сондай-ақ кеңінен қабылдау үшін мұқият шешуді қажет ететін сын-тегеуріндердің нақты кешенімен келеді. Екі маңызды шектеулер салыстырмалы түрде төмен тиімділік және инфрақұрылымның маңызды қажеттіліктері болып табылады, бұл оның орындылығына, үнемділігіне, масштабтылығына әсер етеді.

Тиімділік энергияны сақтау жүйелері қызметінің маңызды көрсеткіші болып табылады. Ол заряд-разряд циклі кезінде қанша энергия жоғалғанын көрсетеді. КЭС энергияның ұзақ өмір сүруі мен қауіпсіздігі тұрғысынан өте тиімді болуы мүмкін болғанымен, оның ішінде тиімділігі неғұрлым жетілген технологияларға қарағанда төмен болады. 5 кестеде көрсетілген.

4.1-кесте –Өнімділік эталондары

Технология	Екі жаққа жүрудің типтік тиімділігі
Литий-ионды аккумуляторлар	85–95%
Айдалатын сақтау электр станциялары	70–85%
Сығылған ауаны сақтау	40–55%
Криогендік энергияны сақтау (БЭК)	50–70%

КЭС жүйелері, әдетте, конструкциясына, жылу интеграциясына, сондай-ақ компоненттерді оңтайландыруға байланысты атмосфера коэффициентінің 50-70%-ына қол жеткізеді. Бұл жоғары энергия тиімділігі мен жылдамдығына байланысты салалық стандартқа айналған литий-ионды аккумуляторларға қарағанда едәуір төмен.

КЭС-те тиімділіктің тозу көздеріне мыналар жатады:

- Ауаның қысылуы енгізу энергиясының көп бөлігін тұтынады;
- Тиімсіз сұйыту регенеративті салқындату және жылулық интеграция кезінде ауаның сұйылтылуы энергияны көп қажет ететін процесс болып табылады;
- Булану шығыны вакуумды-оқшаулағыш сақтауға арналған резервуарларға қарамастан, кейбір жылу беру ұзақ сақтау кезінде буланудың мардымсыз шығынын тудырады;
- Жылу беру кезіндегі жылу ысыраптары регазификация процесі жылу қалдықтарымен немесе жылу энергиясының сыртқы көздерімен тиімді үйлескен кезде пайда болады;

- Механикалық шығындар: Турбиналық және генераторлық жүйелер үйкеліс, жылыту, электр кедергісі салдарынан шығынға ұшырайды.

Тиімділігінің төмендігі кемшілік болса да, оны контексте ескеру қажет. КЭС ең алдымен энергияны ұзақ уақыт сақтауға арналған – 4-тен 10 сағатқа дейін және одан да көп, онда литий-ионды аккумуляторлар сияқты технологиялар тозу мен жоғары шығындардың салдарынан экономикалық және техникалық тұрғыдан әлсіз болып келеді.

КЭС белгілі бір қосымшалардағы, әсіресе мынадай жағдайларда тиімділіктің кемшілігінен асып түсуі мүмкін беріктік пен масштабтылықты қамтамасыз етеді:

- Өнімділікті арттыру үшін қол жетімді қалдық жылуы;
- Энергия артық және басқаша шектелген болар еді (мысалы, артық күн немесе жел энергиясы);
- Ұзақ сақтау мерзімі тікелей тиімділіктен басымдылыққа ие.

4.2 Криогендік жүйелермен баламалы энергия көздерін қосу

КЭС жүйесін енгізу маңызды және мамандандырылған инфрақұрылымды талап етеді, бұл аккумуляторлық батареялардың модульдік жүйелеріне қарағанда өрістетуді қиындатады. Инфрақұрылымға қойылатын осы талаптар техникалық та, қаржылық та сын-тегеуріндерді ұсынады.

1) Ауаны сұйылту және сығу агрегаты.

Ауаны сұйылту үшін өнімділігі жоғары компрессорлар, пілләаралық және кеңейту турбиналары қажет. Бұл компоненттер жоғары қысымда және өте төмен температурада жұмыс істеуі тиіс, бұл өнеркәсіптік жабдықты және білікті пайдалануды талап етеді.

Сұйытуға қойылатын энергияға қойылатын талаптар едәуір, көбінесе сұйық ауаның 1 тоннасы үшін 600-700 кВт/сағ диапазонында болады.

2) Криогенді сақтауға арналған резервуарлар

Цистерналар вакуумды-оқшаулағыш, екі қабырғалы және айтарлықтай шығынсыз -196°C -та сұйық ауаны ұстап тұруға қабілетті болуы тиіс. Бұл цистерналар қолданбалы, қымбатқа түсіп, едәуір көлемді кеңістік алады. Декокацияны бақылау және қауіпсіздік жүйелері біріктірілуі тиіс, бұл тапсырманы одан әрі қиындатады.

3) Қуатты регазификациялау және қалпына келтіру жүйесі

Түсіру кезінде сұйық ауаның жылулық кеңеюін механикалық энергияға айналдыру үшін жоғары тиімді жылу алмасқыштар мен турбиналар қажет. Жылу энергиясын сақтау жүйелерімен (ыстық/суық) немесе сыртқы жылу көздерімен интеграциялау инфрақұрылымның қосымша қабаттарын қосады.

4) Желімен интеграциялау

КЭС жүйелері электр энергиясын инверторларды, трансформаторларды, сондай-ақ коммуналдық жүйелермен синхрондау үшін басқару элементтерін қоса алғанда, желіге қосылу үшін инфрақұрылымды талап етеді.

Қуатты электроника сұраныс циклдарына байланысты ауыспалы жүктемемен және диспетчерлік сценарийлермен жұмыс істеуі тиіс.

5) Жер учаскелеріне және олардың орналасқан жеріне қойылатын талаптар КЭС жүйелері мынадай жеңілдіктерге байланысты өнеркәсіптік немесе муниципалдық өтінімдер үшін ең қолайлы болып табылады:

- Цистерналар мен жабдықтардың физикалық өлшемдері;
- Қорғаныш буферлік аймақтары;
- Компоненттерге техникалық қызмет көрсету және ауыстыру үшін болуы;
- Аккумуляторлық батареяларға қарағанда БЭК жылжымалы, тұрғын немесе автономды қашықтықтан қолдану үшін жарамсыз.

6) Білікті жұмыс күші және техникалық қызмет көрсету

- Криогендік жүйелерді пайдалану және оларға техникалық қызмет көрсету үшін төмен температуралы және жоғары қысымды жабдықтарды пайдалануға үйретілген мамандандырылған жұмыс күші қажет;

- Пломбаларды, клапандарды, оқшаулау және қауіпсіздік жүйелерін тексеруді қоса алғанда, профилактикалық қызмет көрсету ұзақ мерзімді сенімділік пен қауіпсіздікті қамтамасыз ету үшін аса маңызды болып табылады.

Екі жаққа да тиімділіктің төмендеуі және инфрақұрылымға қойылатын ауқымды талаптар энергияны криогендік сақтауды өрістету үшін нақты міндеттер қояды. Алайда, бұл шектеулер КЭС-тің бірегей күшті жақтарымен, атап айтқанда оның географиядан тәуелсіз қауіпсіз, эмиссиясыз, ұзақ мерзімді сақтауды қамтамасыз ету мүмкіндігімен теңдестіріледі.

Ұзақ өмір сүру және масштабтау ықшамдықтан немесе тиімділіктен гөрі маңызды болатын өтінімдерде КЭС мықты үміткер ретінде ерекшелінеді. Неғұрлым тиімді интеграция, технологияларды стандарттау, сондай-ақ қолдаушы саясат шеңберлері арқылы инфрақұрылым мен тиімділік үшін кедергілерді шешу оны ауқымда табысты іске асырудың негізі болады.

Энергияны сақтаудың кез келген технологиясының тиімділігі айтарлықтай дәрежеде оның қолданыстағы энергетикалық инфрақұрылыммен қаншалықты жақсы ықпалдасуына байланысты. Энергияны криогендік сақтау жағдайында қолданыстағы энергия жүйелерімен интеграциялау перспективалық мүмкіндіктерді де, нақты техникалық аспектілерді де ашады.

Power System үйлесімділігі

КЭС жүйелері дәстүрлі электр станцияларына ұқсас тәсілмен қазіргі заманғы электр желілеріне біріктірілуі мүмкін, өйткені олардың турбиналық электр энергиясын өндіру сияқты пайдалану сипаттамалары қолданыстағы

желілік стандарттарға толық сәйкес келеді. Үйлесімділіктің негізгі факторларына мыналар жатады:

- Турбиналы генераторлардан ауысатын токтың қоректендіруі, олардың қоректендіру немесе тарату жүйелеріне тікелей кіріктірілуіне мүмкіндік береді;
- КЭС-ке қосалқы желілік қызметтерді қолдауға мүмкіндік беретін жиілік пен кернеуді реттеу мүмкіндіктері;
- Жылдам әрекет ету уақыты (әдетте секундтан минутқа дейінгі диапазонда) БЭК-ке максималды өнімділікті, жүктемені теңестіруді және артық қуатты қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.
- БЭК-тің қазіргі заманғы жүйелеріне тор жиіліктерімен және кернеу деңгейлерімен, әсіресе әртүрлі жаңартылатын энергия көздерімен біріктіру кезінде синхрондауды қамтамасыз ету мақсатында инверторлар мен түрлендіргіштер сияқты қуат электроникасы да кіреді.

Энергия менеджменті жүйелері

Тиімді интеграциялау үшін КЭС желі операторларымен өзара іс-қимыл жасайтын алдыңғы қатарлы бақылау және мониторинг жүйелерімен жабдықталуы тиіс. Энергия менеджменті жүйелерінің платформалары мыналарға мүмкіндік береді:

- Электр энергиясына баға белгілеу және торға сұраныс негізінде нақты уақыт режимінде диспетчерлік қызмет көрсетуді жоспарлау;
- Жаңартылатын энергия көздерінің шыңнан тыс кезеңдерінде немесе артық кезеңдерінде автоматты зарядтау;
- Ең жоғары жүктемелер немесе сұранысқа ден қою іс-шаралары кезіндегі разрядтарды үйлестіру;
- Тор икемділігін арттырады және КЭС-ке энергетикалық нарықтарға қатысуға мүмкіндік береді, бұл оларды коммуналдық қызметтер үшін құнды активке айналдырады;
- Жаңартылатын көздермен бірге орналасу.

Криогендік сақтау жел және күн электр станциялары сияқты жаңартылатын энергия көздері қондырғыларымен интеграциялау үшін ерекше қолайлы. Жаңартылатын энергия көздері басқаша азайтылатын артық электр энергиясын өндіргенде, КЭС бұл энергияны түсіріп, оны төмен генерация кезеңдерінде пайдалану үшін сақтай алады.

Бұл КЭС-ті күн және жел энергетикасының негізгі шектеулерінің бірі – өшіруді жойып, жаңартылатын энергия көздерінің тиімді баламасы етеді.

КЭС-тің ерекше белгілерінің бірі оның масштабтылығы болып табылады. Оның құрамдас бөліктерінің модульдік сипаты – сұйыту қондырғылары, резервуарлар, жылу алмастырғыштар, турбиналар индустриялық парктерден

бастап коммуналдық кәсіпорындарға дейінгі қосымшалар үшін технологияны масштабтауға мүмкіндік береді.

КЭС бірнеше тәсілмен масштабталуы мүмкін:

- Қуатын (МВт) турбиналық генераторларды көбірек қосу арқылы ұлғайтуға болады;

- Сақтау уақыты (МВт/сағ) криогенді резервуарларды көбірек қосу арқылы ұлғайтылуы мүмкін;

- Жылу қуатын ыстық та, суық та жылу энергиясын сақтау бірліктерін (ТЭС) біріктіру арқылы ұлғайтуға болады;

- Географиямен (мысалы, гидравликалық сорғылармен) немесе химиялық шектеулермен (мысалы, аккумуляторлық батареялар жасушаларының тозуы) тежелген технологиялардан айырмашылығы БЭК қауіпсіздікке, қызмет ету мерзіміне немесе өнімділігіне нұқсан келтірмей масштабтауы мүмкін. КЭС-тің ірі масштабты зауыттары (мысалы, 50-250 МВт/сағ) пилоттық жолмен іске асырылды, гигаватт-сағаттық жүйелер техникалық тұрғыдан жүзеге асырылуда.

Экономикалық орындылыққа келер болсақ, КЭС-тің экономикасы бастапқы күрделі шығыстар, сондай-ақ ұзақ мерзімді пайдалану құны тұрғысынан ең жақсы бағаланады.

КЭС жүйелері, әдетте, литий-ионды аккумуляторларға немесе кіші масштабты технологияларға қарағанда аванстық капиталдың неғұрлым жоғары құнын талап етеді.

- Шығындардың негізгі құрауыштары мыналарды қамтиды:

- Өнеркәсіптік компрессорлар мен сұйытқыштар;

- Қолданбалы криогендік цистерналар;

- Тиімділігі жоғары турбиналар мен жылу алмастқыштар;

- Құрылыс жұмыстары және қосалқы жүйелер.

КЭС-тің коммуналдық-масштабты жүйелерінің күрделі құны бүкіл жүйе үшін масштабына, орналасқан жеріне және интеграцияның күрделілігіне қарай бүкіл жүйе үшін 300-500 АҚШ доллары мөлшерінде бағаланады.

Операциялық шығындарды есептеу барысында КЭС аккумуляторлар немесе газ турбиналарымен салыстырғанда пайдалану шығындары өте төмен.

Отынға жұмсалатын шығындардың болмауы, қоршаған ортаны қорғауға жұмсалатын ең аз шығындар және ұзақ жүйенің қызмет ету мерзімі (20-30 жыл) өмірлік цикл шығындарының төмендеуіне ықпал етеді.

Техникалық қызмет көрсету негізінен механикалық сипатқа ие, ол химиялық энергияны сақтау жүйелерінде таралған тозу проблемаларын болдырмайды.

Қамқорлыққа алу құнының ұлғаюы жүйенің қызмет ету мерзімі ішінде жинақталған кВт/сағ электр энергиясын жеткізудің орташа құнын білдіреді. КЭС үшін ерте жүйелерде қамқорлыққа алу құны 1МВт/сағ 140-220 АҚШ долларын құрады.

Тиімділік пен жаппай өндірісті арттыру кезінде бұл көрсеткіш ұзаққа созылатын литий-ионды аккумуляторлармен және сығылған ауа аккумуляторларымен бәсекелесе отырып, 1МВт/сағ үшін 100-150 АҚШ долларына дейін төмендейді деп болжануда.

КЭС бірнеше кіріс ағынын пайдалана алады:

- Энергия арбитражы: арзан энергия алу, сұраныстың ең жоғары кезеңінде демпинг;
- Желілік қызметтер: жиілікті бақылау, қуаттың артықлығы, қуатты кеңейтуді қолдау;
- Өткізу нарықтары: электр энергиясының кепілдендірілген диспетчерлік қолжетімділігі;
- Өнеркәсіптік интеграция: электр және жылу энергетикасы саласындағы біріккен шешімдер.

Құнды жинақтаудың бұл моделі КЭС-ті икемділікті және ұзақ сақтау мерзімін ынталандыратын дамушы энергетикалық нарықтарда қаржылық тартымды етеді.

Криогендік энергияны сақтау желінің үйлесімділігінің жоғары деңгейін, модульдік масштабтың жоғары болуын және әлеуетті үнемділікті, әсіресе ауқымды және ұзақ мерзімді қосымшаларда қамтамасыз етеді. Қомақты бастапқы инвестицияларға қарамастан, КЭС оны ұзақ қызмет ету мерзімімен, пайдалану шығындарының төмендігімен, сондай-ақ желідегі көпфункционалдылықпен құрайды.

Икемді, таза энергетикалық технологияларды қолдайтын нормативтік базаның дамуына қарай және жаңартылатын энергия көздерін пайдаланудың өсуіне қарай КЭС жаңартылатын энергия көздерін артық өндіру мен сенімді, диспетчерлік электр энергиясы арасындағы алшақтықты жоя отырып, энергетикалық ауысудың құнды құрамдас бөлігі болып табылады.

Криогендік энергияны сақтау энергияны ұзақ уақыт сақтау үшін, әсіресе желілік-масштабты жүйелер үшін перспективалы шешім ретінде пайда болады. КЭС коммерциялық қабылдаудың бастапқы сатысында тұрғанымен, жүргізіліп жатқан зерттеулер оның төмен көміртекті, сенімді және икемді энергетикалық жүйеге көшуде іргетас бола алатынын көрсетеді. КЭС-тің болашағы оның жаңартылатын энергия көздерін пайдалану, смарт-жылу

менеджменті, сондай-ақ тиімділік пен үнемділікті арттыратын технологиялық инновациялармен интеграциялауында жатыр.

Гибридті жүйелер: КЭС + Күн/Жел

КЭС-тің болашақтағы ең қызықты перспективаларының бірі оның күн фотоэлектрлік (ПВ) зауыттары және жел генераторлары сияқты жаңартылатын энергия көздерінің ауыспалы көздерімен интеграциясы болып табылады. Бұл гибридті жүйелер жаңартылатын энергия көздері саласындағы ең үлкен сын-қатерлердің бірі – өшірудің синергетикалық шешімін ұсынады.

Проблема: Жаңартылатын энергия көздерінің алуан түрлілігі

Күн және жел энергиясы экологиялық таза және үнемді болғанымен, өзіне тән үзік-үзік болып табылады. Күн энергиясы күндіз шарықтау шегіне жетіп, түнде нөлге дейін төмендейді, ал жел энергиясын өндіру тұрақты емес және ауа райы жағдайларына тәуелді. Өнім шығару мен сұраныс арасындағы бұл сәйкессіздіктің себептері:

- Шарықтау кезеңінде артық өндіру және азаю;
- Аз өндірістік сағаттарда энергияның жетіспеушілігі;
- Энергетикалық жүйенің тұрақсыздығы және экономикалық тиімсіздік.

Шешім: КЭС буфер және баланстаушы ретінде

КЭС генерациялау мен тұтыну арасындағы буфер ретінде әрекет ете алады. Артық өндіріс кезеңдерінде артық электр энергиясы ауаны сұйылту процесін қоректендіру үшін қолданылады. Алынған сұйық ауа кейіннен пайдалану үшін сақталады.

Ең жоғары сұраныс немесе жаңартылатын энергия көздерін өндірудің төмендігі кезеңдерінде сақталатын криогендік энергия электр энергиясын өндіру үшін турбиналарды пайдалана отырып, регазификацияланады және кеңейтіледі. Бұл жаңартылатын энергия көздерінің артықшылықтарын және ұшуда энергияны сақтау мүмкіндігін біріктіретін гибридті электр станцияларын құруға мүмкіндік береді:

Күн + БЭК: Күн энергиясын күндіз сақтайды және түнде электр энергиясымен қамтамасыз етеді.

Жел + БЭК: Тыныш жағдайда қолдану үшін қатты жел кезінде жел энергиясын сақтайды.

Торлар мен микрогридтерді пайдалану гибридті жүйелерді орталықтандырылған желілерде де, орталықсыздандырылған микрогридтерде де орналастыруға болады. Мысалы, шалғайдағы аралдар немесе ауылдық жерлер дизель-генераторларға деген сенімді азайту үшін КЭС-ті күн энергиясымен біріктіре алады.

Жанартылатын энергия көздерін пайдаланатын қондырғылары бар индустриялық парктер КЭС-ті сұраныстың ауытқуын басқару және энергияның ең жоғары шығындарын азайту үшін пайдалана алады.

КЭС-тің өміршеңдігі мен тиімділігін арттыратын тағы бір маңызды жаңалық – қалдық жылуды регазификация процесіне біріктіру.

Қайта біріктіру проблемасы сұйытылған ауаны қайта газдандыру сақталған криогендік сұйықтықты қайтадан жоғары қысымды газға айналдыру үшін жылуды енгізуді талап етеді. Жылулық интеграциясыз бұл қадам жүйенің жалпы тиімділігін төмендеті отырып, қосымша энергияны тұтынады.

Өндірістік немесе коммерциялық процестерден жылу қалдықтарын қалпына келтіру жоғары тиімді шешім болып табылады. Көптеген кәсіпорындар, мысалы, жылу электр стансалары, металлургия зауыттары, цемент зауыттары және химиялық өңдеу кәсіпорындары қалыпты жағдайда пайдаланылмайтын төмен және орташа қуатты қалдықтар жылуының үлкен көлемін өндіреді.

КЭС-ті осы кәсіпорындармен ықпалдастыру арқылы қалдық жылуды жылу алмастқыштар түсіріп, сұйық ауаны регазификациялау үшін пайдалана алады. Бұл сыртқы қуат көздеріне деген қажеттілікті айтарлықтай төмендетеді, кейбір конфигурацияларда екі бағытта да тиімділікті 70%-дан астамға арттырады.

Екі сектордың тиімділігі интеграциясы негізгі жабдықтың энергия тиімділігін де арттырады: КЭС механикалық тұрғыдан ыдырайтын жылуды сіңіру арқылы жылу раковинасы ретінде әрекет етеді. Бұл қоршаған ортаға әсерін төмендетеді және зауыттың жалпы тиімділігін арттырады.

Нақты қолданбаларға сүйенсек, Ұлыбританиядағы Highview Power LAES зауыты өнеркәсіптік қалдықтармен жылу көздерімен ынтымақтастық арқылы қалдықтарды жылу интеграциялаудың тиімділігін көрсетті. Қалдық жылудың едәуір мөлшерін өндіретін дата-орталықтар КЭС-ті орналастыру жөніндегі әлеуетті әріптестер ретінде де қарастырылады.

Қазіргі уақытта КЭС-ті өміршең әрі тиімді ететін басқа да бірқатар перспективалық жаңалықтар зерттелуде. Жылу шығынын азайту және сақтау мерзімін ұлғайту үшін аса төмен өткізгіштік оқшаулау және наноматериалдар саласында зерттеулер жүргізілуде. Герметикалаудың алдыңғы қатарлы технологиялары қайнау қаупін төмендетуге және қауіпсіздікті арттыруға мүмкіндік береді.

Қазіргі уақытта БЭК-ті ыстық және суық жылу энергиясын сақтаумен біріктіретін гибриді жүйелер әзірленуде. Бұл тәсіл бір агрегаттан электрмен, жылытумен және салқындатумен қамтамасыз етуге қабілетті көп векторлы энергетикалық жүйелерді құруға мүмкіндік береді.

Машиналық оқыту мен жасанды интеллекттің интеграциясы зарядтау және разрядтау циклдарын оңтайландыруға, температураны басқаруға, нарыққа қатысуға мүмкіндік береді. Интеллектуалды желілік байланыс нақты уақыт режимінде энергия энергиясының тор жағдайлары мен бағасын негізге ала отырып, түзетулер енгізуге мүмкіндік береді.

Контейнерлердегі КЭС құрылғылары модульді, қалта құрылғылары мобильді қосымшаларға немесе жедел өрістетуге арналған. Бұл құрылғылар төтенше жағдайлар кезінде немесе әскери операциялар кезінде электр желілерінің уақытша сұранысын қолдауы мүмкін.

4.4 Криогенді оқшаулау үшін алдыңғы қатарлы материалдар

Криогендік энергияны сақтаудың маңызды аспектілерінің бірі сұйытылған ауаны айтарлықтай жылу шығынынсыз ұзақ уақыт сақтау мүмкіндігі болып табылады. Энергия өте төмен температурада (әдетте сұйық азот үшін -196°C) криогендік сұйықтық ретінде сақталатындықтан, тіпті аз мөлшерде жылу ұстағыштың өзі қайнап, энергияның жоғалуына әкелуі мүмкін. Осы проблеманы шешу үшін қазіргі заманғы жылу оқшаулағыш материалдар мен жүйелер инновациялардың негізгі саласына айналууда.

Криогенді оқшаулаудың дәстүрлі әдістері мыналарға негізделеді:

- Вакуумды оқшаулауы бар қос қабырғалар;
 - Оқшаулағыш толтырғыштар ретіндегі перлит ұнтағы немесе шыны талшық;
 - Шағылыстырғыш пленкадан және гаслеттерден тұратын көп қабатты оқшаулағыш.
- Олардың тиімділігіне қарамастан, бұл материалдардың өз шектеулері бар:
- Олар цистернаның көлемі мен салмағын ұлғайта отырып, көлемді болуы мүмкін;
 - Қондырғы уақытты қажет етеді және жоғары дәлдікті талап етеді;
 - Уақыт өте келе вакуумдық тығыздамалардың үзілуі мүмкін, бұл оқшаулаудың тиімділігін төмендетеді.

Осы сын-тегеуріндерді еңсеру және КЭС-тің ұзақ өміршеңдігін арттыру үшін зерттеушілер мен инженерлер жылуға төзімділігі едәуір жақсы, салмағы жеңіл, механикалық тұрақтылығы жақсарған жаңа буын материалдарын әзірлеуде.

Жылу оқшаулаудың инновациялық материалдары

- 1) Аэрогельдер

Аэрогельдер — өте төмен жылу өткізгіштігі бар, кейде 0,01 Вт/м-ден төмен, кремнезем немесе көміртек сияқты материалдардан құралған болады. Артықшылықтарына тоқталсақ, криогендік температура кезінде температураның өте жақсы төзімділігі, жеңілдетілген конструкция (ауаның 90%-дан астамы), ылғалға төзімділік және физикалық бұзылулар.

Аэрогельдер өнімділікті сақтау немесе жақсарту кезінде оқшаулау қалыңдығын төмендетуі мүмкін, бұл оларды КЭС-тің ғарыштық тежелген жүйелерінде қолдану үшін қолайлы етеді.

2) Вакуумды жылы панельдер

Вакуумды-оқшаулағыш панельдер ішкі вакуумы бар газ өткізбейтін қабықшамен қапталған қатты ядродан (көбінесе фумигациялық кремнеземнен) тұрады. Бұл панельдер кәдімгі көбіктің жылуға төзімділігінен 10 есе көп болады. Айтар кетер ерекшеліктері, модульді резервуарлар құрылысына жарамдылық пен ондаған жылдар бойы тұрақты өнімділікті дұрыс тығыздаумен қамтамасыз ету.

3) Нанокұрылымды материалдар

Материалдардың алдыңғы қатарлы зерттеулері жылу өткізгіштік пен конвекцияны шектейтін наномасштабты бастықтарда ауаны ұстап тұруға арналған нанокөмірмен мен нанофоамдарға баса назар аударады. Бұл материалдар әлі дамудың бастапқы сатысында тұр, бірақ үлкен потенциалға ие: Сипаттайтын болсақ, өте төмен жылу өткізгіштік және күрделі танк геометрияларына арналған реттелетін пішіндерден тұрады.

4) Гибридті оқшаулау жүйелері

Композиттік оқшаулау жүйелеріндегі аэрогель жабындары мен вакуум қабаттарының үйлесімі шығынды одан әрі барынша азайта түседі. Бұл гибридті тәсілдер температураның әртүрлі айырмашылықтарында, резервуарлардың беттерінде, сондай-ақ буындарда оқшаулауды оңтайландырады, қазіргі заманғы конструкцияларда қайнауды тәулігіне 0,05%-дан кем төмендетеді.

Бұл КЭС-тің тиімділігіне және ұзақ уақыт өмір сүруіне әсер ететін болады. Қазіргі заманғы материалдардың мақсаттары:

- Ұзақ уақыт сақтау кезінде энергия үнемдеуді жақсарту;
- Сұйытуға және сұйытуға жұмсалатын шығындарды азайту;
- Цистернаның өлшемі мен ізін азайту;
- Жылжымалы немесе модульді БЭК қондырғыларын жасау.

Бұл технологиялардың дамуына қарай олар КЭС-ті коммерциализациялауда коммуналдық және орталықсыздандырылған ауқымда маңызды рөл атқаратын болады.

Криогендік энергияны сақтау үшін олардың толық әлеуетіне жету үшін қолдаушы саясат негіздері мен нормативтік стандарттар қажет. Технологиялық инновациялар шешуші мәнге ие болғанымен, оны кеңінен қабылдау экономикалық сигналдарға, инфрақұрылымдық инвестицияларға, сондай-ақ нақты реттеуші нұсқауларға жоғары тәуелді.

Литий-ионды аккумуляторлар мен су электр станцияларымен салыстырғанда КЭС әлі де салыстырмалы түрде жаңа технология болып табылады және энергетикалық саясатта әлі де кеңінен қабылданбаған. Кейбір сын-тегеуріндерге мыналар жатады:

Жіктелімнің жоқтығы: КЭС ұлттық энергетикалық жоспарларда энергияны сақтау технологиясына әрдайым жатқызылмайды;

Қаржылық ынталандырудың жоқтығы: Көптеген ынталандыру бағдарламалары (мысалы, салық жеңілдіктері, гранттар) КЭС үшін емес, мақсатты аккумуляторлық батареялар немесе нақты жаңартылатын энергия көздеріне бағытталған;

Қосылымның түсініксіз стандарттары: Желі операторларында КЭС-тің ауқымды жүйелерін қосудың стандартталған рәсімдері жиі жетіспейді.

Саясатты қолдаудың басым бағыттары

1) Нарықты тану және қосу. Үкіметтер мен реттеуші органдар КЭС-ті энергияны сақтаудың білікті технологиясы деп ресми түрде мойындауға тиіс әрі электр желілерін және қуаттар нарығын жоспарлау керек. Жаңартылатын энергия көздерін интеграциялау стратегиялары болуы қажет. Коммуналдық қызметтерді сатып алу бағдарламаларын енгізу керек.

КЭС-ті қуаттылық нарығына қосу операторларға энергиямен қамтамасыз ету үшін ғана емес, энергия қорын ұстап тұрудан табыс табуға мүмкіндік береді.

2) Ынталандыру және қаржыландыру

КЭС-ке мемлекеттік инвестициялар жеке сектордың қабылдануына ынталандыра алады. Қолдау тетіктері мыналарды қамтуы мүмкін:

- Пилоттық жобалар бойынша күрделі салымдарды немесе төмен пайызды кредиттерді субсидиялау;

- Өнімділікке негізделген азықтандыру тарифтері немесе сақталатын энергияны пайдаланғаны үшін ынталандыру шаралары;

- Материалдар, тиімділік және интеграция саласындағы гранттар.

Табысты модельдерді, мысалы, Ұлыбританиядағы КЭС ұшқыштарында қолданылатын модельдерді немесе Германияда энергия сақтауды субсидиялауды бүкіл әлемде көбейтуге болады.

3) Инфрақұрылым және қосылым стандарттары

Энергожүйемен жіксіз интеграцияны қамтамасыз ету үшін реттеуші органдар айналысуы тиіс шаралар:

- КЭС жүйелеріне арналған қосылым нұсқауларын әзірлеу;
- Сақтау жобаларына жылдамырақ авторизациялауды қосу;
- КЭС гибриді жүйелері үшін жылу-энергетикалық инфрақұрылымға инвестицияларды қолдау.

4) Қоршаған ортаны қорғау және қауіпсіздік ережелері

Саясат сондай-ақ мыналарға бағытталуы тиіс:

- Криогендік операцияларды жүргізу кезінде нақты қауіпсіздік және экологиялық нормаларды белгілеу;
- Азот және ауа сияқты уытты емес инертті материалдарды қолдануды ынталандыру;
- Энергетикалық жобаларды бағалау кезінде өмірлік циклді бағалауды бағалауға жәрдемдесу.

Бұл халықтың сенімін арттыруға, экологиялық тәуекелдерді болдырмауға, сондай-ақ КЭС-ті орнықты даму мақсаттарына сәйкес келтіруге көмектеседі.

5) Кадрларды даярлау және олардың біліктілігін арттыру

Үкіметтер мен оқу орындары КЭС-ке бағдарланған оқу бағдарламаларын әзірлеу мақсатында ынтымақтасуға тиіс:

- Криогендік инженерия;
- Энергияны сақтау жүйесін пайдалану;
- Техникалық қызмет көрсету және қауіпсіздік техникасы хаттамалары.

Бұл КЭС-ті ауқымды іске асыруды қолдау үшін білікті жұмыс күшінің болуын қамтамасыз етеді.

КЭС-тің болашағы оқшаулау материалдарының технологиялық жетістіктеріне де, қолайлы саяси ортаға да тығыз байланысты. Аэрогельдер, вакуумды жылу панельдік материалдары мен наноматериалдарды қолданып оқшаулау жақсарған сайын КЭС жүйелері неғұрлым тиімді, жинақы және үнемді бола бастайды.

Бұл ретте криогендік сақтауды таза энергияға көшудің маңызды құрамдас бөлігі ретінде тану және ілгерілету мақсатында мемлекеттік саясат дамуы тиіс. Инновациялар мен реттеудің дұрыс үйлесімі кезінде КЭС энергияны қауіпсіз, икемді және тұрақты сақтауға өсіп келе жатқан сұранысты қанағаттандыру үшін жедел кеңейе алады. [23-25]

ҚОРЫТЫНДЫ

Жаһандық энергетикалық ландшафт декарбонизацияға, орталықсыздандыруға, цифрландыруға қарай жылжыған сайын энергияны сақтаудың тиімді, масштабты және тұрақты шешімдеріне сұраныс қарқынды өсуде. Бұл жұмыста энергияны ұзақ уақыт сақтау үшін жаңа буын шешімдері ретінде криогендік энергияны сақтаудың мүмкіндіктері мен әлеуеті зерттелді. Техникалық қағидаттарды, жүйені жобалауды, экономикалық және қоршаған ортаға әсер етуді, сондай-ақ болашақ перспективаларды кешенді талдау арқылы зерттеу нәтижесінде КЭС өте перспективалы әлі де қалыптасып келе жатқан дәстүрлі сақтау технологияларының баламасын ұсынатыны анықталды.

Жұмыс Fusion 360-пен температураны модельдеуді қамтыды, бұл тиісті оқшаулау және жобалау кезінде КЭС жүйелері энергияны ең аз жылу шығынымен (тәулігіне $<0,1\%$) сақтай алатынын көрсетті. 200 МВтс тор қосымшасына арналған өлшемді зерттеу КЭС-тің жаңартылатын буферлеу және торды қолдау үшін техникалық өміршеңдігін көрсетті. Fusion 360 бағдарламасында жүргізілген температуралық симуляция нәтижесінде 100 000 литрлік резервуарда 24 сағат ішінде жылу жоғалту 13,5 МДж болды, бұл жалпы энергия көлемінің небәрі 0,05%-ын құрайды. Бұл көрсеткіш аэрогель негізіндегі оқшаулау құрылымының жоғары тиімділігін дәлелдеді.

Сондай-ақ, энергетикалық тиімділік тұрғысынан зарядтау және түсіру циклдері толық есептеліп, бастапқы тиімділік 36% шамасында анықталды. Бірақ қалдық жылу мен суықты пайдалану арқылы бұл көрсеткішті 65–70%-ға дейін арттыруға болатыны негізделді. КЭС үлкен уәде бергенімен, оның орындылығы әр түрлі көзқарастар бойынша бағалануы тиіс:

Жалпы алғанда, криогендік энергия сақтау технологиясы — жаңартылатын энергия көздерімен үйлесетін, ұзақ мерзімді, сенімді және экологиялық қауіпсіз шешім болып табылады. Зерттеу нәтижелері Қазақстан энергетикасындағы тұрақтылық пен энергия қауіпсіздігін қамтамасыз етуде осындай жүйелерді қолданудың болашағы зор екенін көрсетті.

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Морган, Р., Нельмес, С., Гибсон, Э., Бретт, Г. (2015). Liquid air energy storage – Analysis and first results from a pilot scale demonstration plant 137, 845-853.
- 2 Чжан, Х., Ол, М., Чжан, Я. (2016). Ауа энергиясын сақтаудың сығылған жүйелерінде ауаның қысылу процесі бойынша зерттеулерге шолу. Жаңартылатын және тұрақты энергия көздеріне шолулар, 60, 1475-1489
- 3 Ding, Y., Li, Y. (2017). Криогендік энергияны сақтау: қазіргі және перспективалық. Энергия сақтау ғылымы және технологиясы, 6 (5), 759-773.
- 4 Ван, Л., т.б. (2019). Күн жылу қондырғысымен интеграцияланған криогендік энергияны сақтау жүйесін тиімді оңтайландыру. Жаңартылатын энергия көздері, 133, 810-823.
- 5 Таң, Q., және т.б. (2020). Криогендік резервуарларда қолданылатын вакуумды оқшаулау панельдеріне арналған алдыңғы қатарлы материалдар: Шолу. Энергияны сақтау журналы 32. 101796.
- 6 Кусксу, Т., Брюель, П., Жәмилә, А., Эль-Рафики, Т., — Зераули, Ю. (2014). Энергияны сақтау: Қосымшалар мен міндеттер. Күн энергиясы материалдары мен күн жасушалары, 120, 59-80.
- 7 Ли, Я., т.б. (2015). Сұйық ауа энергиясын сақтау жүйелері үшін жылуды интеграциялаудың алдыңғы қатарлы тәсілдері. Энергияны конверсиялау және басқару 106, 662-672.
- 8 Го, С., т.б. (2018). Қалдықтарды жылумен қалпына келтірумен интеграцияланған сұйық ауа энергиясын сақтаудың жаңа жүйесін жобалау және термодинамикалық талдау. Қолданбалы жылу техникасы, 130, 1007-1017.
- 9 Chjao, X., Bu, Q., Hu, S., Cu, H., & Rasmussen, C. N. (2015). Жел энергетикасын интеграциялауды қолдау үшін энергия сақтау жүйесіне шолу. Қолданбалы энергетика, 137, 545-553.
- 10 Li, H., & Sun, Q. (2021). Таза энергия жүйелеріне көшудегі энергияны сақтау технологияларының рөлі: Шолу. Энергия туралы есептер, 7. 1070-1083.
- 11 Highview Power (2020). Сұйық ауа энергиясын сақтау технологиясына шолу. <https://highviewpower.com>
- 12 Жаңартылатын энергия көздері жөніндегі халықаралық агенттік (IRENA) (2017). Электр энергиясын сақтау және жаңартылатын энергия көздері: шығындар мен нарықтар 2030. <https://www.irena.org/publications>
- 13 BloombergNEF (2021). Аккумуляторлық батареялардың бағасын зерттеу. <https://about.bnef.com>
- 14 McKinsey & company (2020). Энергияны сақтау: Электр энергетикасындағы келесі жойқын технология. <https://www.mckinsey.com>
- 15 Халықаралық энергетикалық агенттік (ХЭА) (2023). Торлы-масштабты сақтау үрдістері және технологиялар. <https://www.iea.org/reports/energy-storage>

- 16 ASME B31.3 - Процесс құбырлары
- 17 ISO 21010:2017 – Криогендік кемелер – Газ/материалдың үйлесімділігі
- 18 NFPA 55 – Сығылған газдар мен криогендік сұйықтықтар коды
- 19 ХЭК 62933-1-1:2017 – Электр энергиясын сақтау жүйесі – жалпы аспектілер
- 20 АҚШ Энергетика министрлігі (DOE) (2021). Энергия сақтау Grand Challenge Жол картасы. <https://www.energy.gov>
- 21 Еуропа комиссиясы (2020). Энергияны сақтау: Еуропалық жасыл мәміленің негізгі іске қосшысы. <https://ec.europa.eu>
- 22 БҰҰ-ның Қоршаған ортаны қорғау жөніндегі бағдарламасы (2022 жыл). Технологияның жай-күйі: энергияны тұрақты сақтау. <https://www.unep.org>
- 23 Энергия сақтау қауымдастығы (ESA). Технологияны салыстыру – БЭК Ли-ионға қарсы. <https://energystorage.org>
- 24 Ұлыбританияның Бизнес, энергетика және өнеркәсіптік стратегия департаменті (BEIS). Жылу және криогендік сақтау саясаты Қысқаша. <https://www.gov.uk/beis>
- 25 Дүниежүзілік банк (2020). Энергия сақтау саласындағы серіктестіктер – энергияны сақтау жобаларының жаһандық ландшафты. <https://www.worldbank.org>
- 26 СТ КазНИТУ - 09 - 2023. Работы учебные. Общие требования к построению, изложению, оформлению и содержанию текстового и графического материала.- КазНИТУ, 2023.

Қосымша А

