

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Теплоенергетичний факультет

Кафедра теплоенергетики

«На правах рукопису»
УДК 66.048.5: 629.7.048

«До захисту допущено»

Завідувачка кафедри

Ольга ЧЕРНОУСЕНКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

“ ”

_____ 2022 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 144 «Теплоенергетика»

на тему: «Ефективність використання термоелектричного теплового насосу у відцентровому дистильаторі»

Виконала : студентка II курсу, групи ТП – 01 мн

Ярошевич Марина Віталіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник

доц. к.т.н. Андрій СОЛОМАХА

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студентка

(підпис)

Київ – 2022 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет Теплоенергетичний

Кафедра Теплоенергетики

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність 144 «Теплоенергетика»,

ОНП «Промислова та муніципальна теплоенергетика і енергозбереження»

«До захисту допущено»

Завідувачка кафедри

Ольга ЧЕРНОУСЕНКО

(підпис)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

“ ” _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студентці
Ярошевич Марина Віталіївна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Ефективність використання термоелектричного теплового насосу у відцентровому дистиляторі» _____,

науковий керівник дисертації Соломаха Андрій Сергійович, доц. к.т.н _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 2022 р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації 13.06.22 р.

3. Об'єкт дослідження відцентровий багатоступінчатий дистилятор з термоелектричним тепловим насосом _____

4. Предмет дослідження режимні параметри роботи термоелектричного теплового насоса та оптимальна кількість ступенів відцентрового вакуумного дистилятора.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- 1) Вивчення явища термоелектрики через літературний аналіз наукових джерел
- 2) Дослідження особливостей розробки систем життєзабезпечення на Космічних станціях
- 3) Огляд публікацій існуючих типів дистиляційних установок та їх порівняння
- 4) Літературний огляд публікацій про відцентрові дистиляційні установки на базі термоелектричного теплового насоса

- 5) Експериментальне дослідження впливу режимних параметрів на ефективність роботи ТТН
 - 6) Аналітичне визначення оптимального числа ступенів дистилятора
 - 7) Оформлення та подання дисертації
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу
- 1) Графіки залежності COP від різниці температур, витрати води та електричної потужності ТТН
7. Орієнтовний перелік публікацій Статті в науково-технічних журналах- 2 _____
8. Дата видачі завдання 4.04.22 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Вивчення явища термоелектрики через літературний аналіз наукових джерел	10.04.2022 р.	
2.	Дослідження особливостей розробки систем життєзабезпечення на Космічних станціях	20.04.2022 р.	
3.	Огляд публікацій існуючих типів дистиляційних установок та їх порівняння	01.05.2022 р.	
4.	Літературний огляд публікацій про відцентрові дистиляційні установки на базі термоелектричного теплового насоса	16.05.2022 р.	
5.	Експериментальне дослідження впливу режимних параметрів на ефективність роботи ТТН	23.05.2022 р.	
6.	Аналітичне визначення оптимального числа ступенів дистилятора	05.06.2022 р.	
7.	Оформлення та подання дисертації	13.06.2022 р.	

Студентка

(підпис)

Марина ЯРОШЕВИЧ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Андрій СОЛОМАХА

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на здобуття ступеня магістра за освітньо-науковою програмою підготовки на тему: «Ефективність використання термоелектричного теплового насосу у відцентровому дистиляторі»: 71 с., 28 рис., 4 табл., 2 дод., 35 джерел.

Об'єкт дослідження – відцентровий багатоступінчатий дистилятор з термоелектричним тепловим насосом.

Мета роботи – вивчення впливу режимних параметрів термоелектричного теплового насоса на ефективність роботи системи каскадної дистиляції.

Виконано огляд існуючих розробок, описано принцип їх роботи, переваги та недоліки цих технологій.

Було наведено основні теоретичні відомості про явище термоелектрики, його використання на прикладі термоелектричних теплових насосів, описано їх принцип дії та застосування. Розглянуто конструкцію відцентрового вакуумного дистилятора на базі термоелектричного теплового насоса, методику розрахунку та особливості використання у системах життєзабезпечення пілотованих космічних місій. Розглянуто та описано термоелектричну батарею, наведено її габаритні характеристики, споживану електричну потужність, розрахунковий коефіцієнт ефективності, методику розрахунку основних робочих характеристик.

Виконано серію експериментів для визначення впливу режимних параметрів роботи термоелектричного теплового насоса ALTEC-7005 на його ефективність.

На основі отриманих експериментальних даних аналітично визначено оптимальну кількість ступенів для відцентрового дистилятора з точки зору мінімальної витрати енергії на процес дистиляції.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: дистиляція, стенд, обертова поверхня, термоелектрика, термоелектричний тепловий насос, кількість ступеней, система життєзабезпечення, ефективність роботи.

ABSTRACT

Master's Thesis for Master's Degree in Educational and Professional Training Program on the topic: "Development of an experimental stand for the study of a centrifugal distiller with a thermoelectric heat pump":71 pp., 28 figures, 4 tables., 2 appendix, 35 sources.

The object of development is a centrifugal multistage distiller with a thermoelectric heat pump.

The purpose of the work is to study the influence of the operating parameters of a thermoelectric heat pump on the efficiency of the cascade distillation system.

A review of existing developments, the principle of their operation, the advantages and disadvantages of these technologies.

The basic theoretical information about the phenomenon of thermoelectricity, its use on the example of thermoelectric heat pumps was given, their principle of operation and application was described. The design of a centrifugal vacuum distiller based on a thermoelectric heat pump, the method of calculation and features of use in life support systems of manned space missions are considered. The thermoelectric battery is considered and described, its dimensional characteristics, the consumed electric power, the calculated efficiency coefficient, the method of calculation of the main operating characteristics are given.

A series of experiments was performed to determine the influence of the operating parameters of the thermoelectric heat pump ALTEC-7005 on its efficiency.

Based on the obtained experimental data, the optimal number of stages for the centrifugal distiller in terms of the minimum energy consumption for the distillation process was analytically determined.

KEYWORDS: distillation, stand, rotating surface, thermoelectricity, thermoelectric heat pump, number of stages, life support system, work efficiency.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, скорочень, термінів	6
Вступ	10
1 Явище термоелектрики та його застосування (літературний огляд).....	12
1.1 Історія відкриття та вивчення термоелектричного ефекту	12
1.2 Методи підвищення коефіцієнта корисної дії термоелектричного пристрою	16
1.3 Загальні відомості про термоелектричні теплові насоси	20
1.4 Принципова конструкція термоелектричного теплового насоса	24
1.5 Основні переваги термоелектричних теплових насосів.....	25
1.6 Висновки за розділом 1	26
2 Системи каскадної дистиляції у комплексах життєзабезпечення	27
2.1 Концепція комплексу систем життєзабезпечення екіпажів міжпланетних експедицій .	27
2.2 Очищення стічних вод методом термічної дистиляції.....	29
2.3 Еволюція системи відцентрової дистиляції з термоелектричним тепловим насосом для космічних місій	37
2.4 Тестування існуючих моделей систем каскадної дистиляції на стендах NASA	41
2.5 Висновки за розділом 2	44
3 Вплив режимних параметрів на ефективність роботи термоелектричного теплового насосу ALTEC-7005	45
3.1 Опис експериментальної установки	45
3.2 Методика визначення основних експериментальних величин	50
3.3 Математичний аналіз впливу режимних параметрів на ефективність роботи ТТН.....	51
3.4 Висновки за розділом 3	54
4 Визначення оптимальної кількості ступенів для системи дистиляції з термоелектричним тепловим насосом.....	55
4.1 Аналіз останніх досліджень і публікацій.....	55
4.2 Опис установки	56
4.3 Розрахункові формули та обчислення	58
4.4 Висновки за розділом 4	62
Висновки	63

Список використаної літератури	65
Додаток А	
Список наукових праць і творчих досягнень.....	69
Додаток Б	
Перевірка магістерської дисертації на академічний плагіат	71

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

Умовні позначення

S - коефіцієнт Зеебека;	e - холодильний коефіцієнт;
T – температура;	W – електрична потужність;
V – напруга;	μ – опалювальний коефіцієнт;
$d\mu$ – хімічний потенціал;	η - питома витрата енергії;
ZT - термоелектрична добротність матеріалу;	N – електрична потужність;
σ – електропровідність;	F – площа теплообмінної поверхні
K - повна теплопровідність елемента;	G – продуктивність;
Q – потік теплоти;	n – число ступенів;
α – термо-ЕРС матеріалу;	r – середня теплота фазового переходу;
I - сила струму;	C – концентрація розчину;
R - електричний опір;	Δt_{depr} – фізико-хімічна температурна депресія.
ρ – густина;	
l – довжина;	

Індекси

Нижні

p – Пельтьє;	k – конденсації;
$дж$ – Джоуля;	$ТТН$ – термоелектричного теплового насоса;
тепл - теплова;	D – дистиллятора;
$г$ - гаряча;	d – по дистилату;
$х$ - холодна;	i – i -й елемент;
роб - робоча;	vx - вхідна;
max - максимальна;	vix - вихідна
$опт$ - оптимальна;	

Скорочення

$ТТН$ - термоелектричний тепловий насос;
 $МКС$ – міжнародна космічна станція;
 $ХМ$ – холодильна машина;
 $СОР$ - коефіцієнт перетворення теплоти;

СЖЗ – система життєзабезпечення;

VCD – відцентровий парокompресійний дистилятор;

WFRD - відцентровий плівковий скребковий дистилятор;

ВВД – відцентровий вакуумний дистилятор;

CDS - термічний відцентровий дистилятора з термоелектричним тепловим насосом;

VSE - Vision for Space Exploration (план освоєння космосу);

ELS - Exploration Life Support (проект NASA).

ВСТУП

У сучасних тенденціях розвитку технологій гостро стає потреба в оптимізації параметрів роботи теплових приладів для підвищення ефективності їх використання в усіх сферах.

Сьогодні термоелектричні пристрої мають широку сферу застосування, починаючи від вироблення електроенергії і закінчуючи термоелектричними приймачами випромінювання. Надійність і простота термоелектричних пристроїв дозволяє використовувати їх навіть тоді, коли традиційні джерела енергії більш ефективні. Крім термопар, досить широко використовуються пристрої, що працюють на принципі ефекту Пельтьє: охолоджувачі для різних продуктів, оптоелектронні прилади, невеликі холодильники, системи охолодження / обігріву сидінь в автомобілях.

Головний напрямок в побутовому застосуванні термоелектричних теплових насосів - це енергозбереження, отримання тепла / холоду / електроенергії в невеликому (достатньому для побуту) об'ємі. Також можна привести приклад ефективного застосування, що пов'язане з унікальними перевагами таких насосів. Системи регенерації води з рідких відходів життєдіяльності на борту пілотованих космічних апаратів потребують низького енергоспоживання, легку та малогабаритну конструкцію, високу надійність.[1] Через ці та ряд інших особливостей дистиляційні системи на основі термоелектричних теплових насосів є найперспективнішим з відомих та вивчених рішень.

Також ефективним є використання термоелектричних теплових насосів при створенні спеціального захисного одягу для роботи людини в умовах екстремальних температур. З подальшим вивченням проблематики можлива розробка «активного» одягу, що реагує на зміни температурних умов діяльності людини та здатного підтримувати комфортні умови залежно від механічних навантажень організму. [2-3]

Головним недоліком є низька ефективність таких систем, через яку термоелектрика не знаходить широкого застосування і майже не використовується в промислових потребах. Складні технології синтезу матеріалів з потрібними властивостями, досить висока їх вартість. Так що термоелектрики як правило виявляються економічно невігідним рішенням.

Все ж, з огляду на очевидну перспективність застосування термоелектричних теплових насосів для вузькоспеціалізованих галузей постає питання у вивченні впливу режимних параметрів на ефективність їх роботи для можливості подальшої оптимізації, що дозволить досягти підвищення енергоефективності.

Як вже було зазначено вище, термоелектричні теплові насоси є найефективнішим з представлених на сьогодні варіантом забезпечення регенерації рідких відходів життєдіяльності людини при малих габаритах та низькому енергоспоживанні. Це досить актуальне для успіху тривалих польотів на Місяць і Марс і роботи команд астронавтів, як на цих космічних об'єктах, так і на Міжнародній космічній станції (МКС) [4].

Метод багатоступінчастої відцентрової вакуумної дистиляції (БВВД) був використаний у системі регенерації стічних вод, розробленій спеціалістами «Термодистиляція» Со («TD» Со) спільно з інженерами КПІ ім. Ігоря Сікорського й Інституту термоелектрики НАН і МОН України (ІТЕ). В якості джерела тепла було обрано термоелектричний тепловий насос.

Після дослідження публікацій, що були присвячені дослідженням роботи відцентрових дистиляторів [4], було систематизовано отримані данні стосовно робочих циклів, характеристик. Проте в працях практично відсутня інформація про вплив на ефективність дистилятора потужності теплового насоса $N_{\text{ТН}}$ та швидкості обертання ротора дистилятора. Саме це відкриває напрям подальших досліджень.

1 ЯВИЩЕ ТЕРМОЕЛЕКТРИКИ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ

1.1 Історія відкриття та вивчення термоелектричного ефекту

Історія відкриття і подальшого вивчення термоелектрики налічує більше двох століть і починається з ввійшла в історію дискусії між Луїджі Гальвані і Алессандро Вольта [5]. В середині XVIII століття популярною темою в науці стало вивчення електричних явищ, в тому числі тваринного електрики, наприклад, що породжується електричними скатами.

Зважаючи на це професор Болонського університету фізіолог Луїджі Гальвані став вивчати, що відбувається з препарованою жабою при пропущенні через неї струму. В результаті численних експериментів Гальвані переконався, що кожен раз, коли він, торкаючись до нервів жаби, приєднаним до електричної машини провідником, видобував із неї іскру, жабу охоплювали судоми.

Ще одне експериментальне обставина настільки привернуло увагу Гальвані, що він спеціально згадує про нього в своїй праці: скорочення м'язів жаби виявляється значно сильнішим, якщо металева дуга складена послідовно з двох різних металів: наприклад, заліза і міді або ж, що набагато краще, срібла. Ці експерименти привели знаменитого італійця до висновку про те, що електрика може генеруватися самої тканиною тварини.

Алессандро Вольта повторює описані в роботі Гальвані досліди. Він формулює наступне питання: чи дійсно металеві провідники служать лише для того, щоб, стикаючись один одним, встановити зв'язок, яка надає електричному флюїду шлях, по якому той природним чином прагне перейти з одного місця в інше? Він піддає сумніву теорію того, що роль металів пасивна, та припустив, що вони є активними агентами, що приводять в рух електричний заряд. У подальших своїх дослідях (рис. 1) Вольта показує, що м'яз, по суті, не бере участі в створенні самого явища, її скорочення є ефект протікання заряду, що генерується контактом двох різних металів. Таким чином, фактично, він відкриває явище, яке пов'язане з контактною різницею потенціалів.

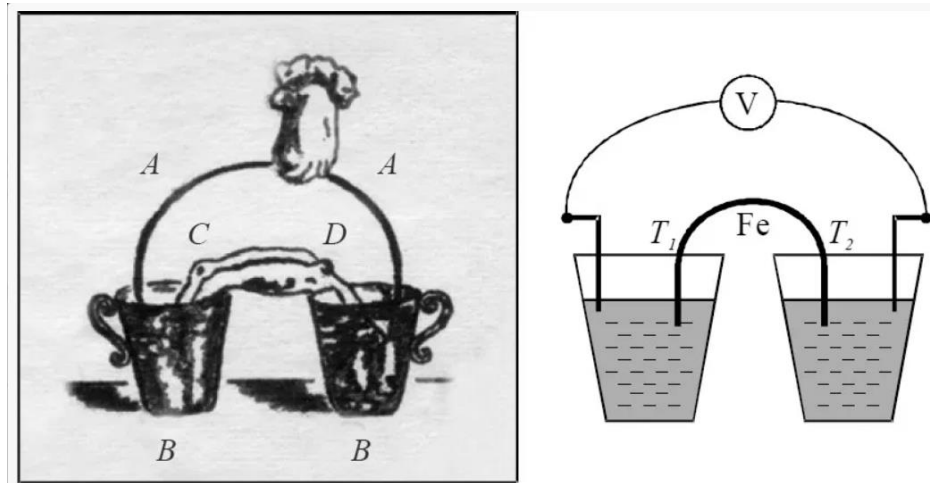


Рис. 1.1 – Схема експерименту Алессандро Вольта, що привів до відкриття термоелектрики

В якості дуги він використовує провідник з одного металу, але поміщає кінці м'язи жаби і кінці дуги в посудини з холодною і гарячою водою. М'яз скорочується і в цьому експерименті, що дозволяє вченому пояснити перебіг електричного флюїду (заряду) нерівномірним нагріванням металевго провідника. Так було виявлено зв'язок між електричним струмом і різницею температур.

Прийнятий сьогодні термін «термоелектрика» ввів Томас Зеєбек, як і кількісну характеристику термоелектричного ефекту - коефіцієнт Зеєбека (мкВ/К): різниця потенціалів між кінцями провідника ΔV , що виникає при підтримці між ними різниці температур ΔT :

$$S = -\frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{E}{\nabla T} \quad (1.1)$$

Де $E = \frac{-\Delta V}{\Delta \chi}$ - величина виникає в провіднику електричного поля,

$\nabla T = \frac{\Delta T}{\Delta \chi}$ - градієнт температури.

Відповідно, напругу, що виробляється термопарою, створеної двома різними металами, мають температури T_1 і T_2 , визначається різницею напруг між їх кінцями:

$$V = S_B(T_2 - T_1) - S_A(T_2 - T_1) = (S_B - S_A)(T_2 - T_1) \quad (1.2)$$

В звичайних металах воно виявляється досить малим (див. табл. 1).

Таблиця 1.1 – Коефіцієнти Зеєбека деяких металів

Метал	Коефіцієнт Зеєбека (мкВ/К)	Метал	Коефіцієнт Зеєбека (мкВ/К)
Вісмут	-73,0	Срібло	+7,1
Нікель	-16,4	Мідь	+7,4
Палладій	-5,6	Залізо	+16,0
Калій	-9,0	Сурма	+47,0

Далі дослідження відкритого Зеєбеком явища продовжилися в роботах Жана Шарля Атаназа Пельтьє, який виявив зворотний термоелектричний ефект: нагрівання або охолодження стику двох провідників при протіканні через нього електричного струму. Пізніше Ленц провів експеримент, що розкрив суть цього ефекту: помістив краплю води в поглиблення на стику двох стрижнів з вісмуту і сурми (з опором R) і виявив, що при протіканні електричного струму I в одному напрямку крапля перетворювалася в лід, при зміні ж напрямку на протилежне лід танув. Цей простий і вражаючий експеримент показав, що при протіканні через контакт двох різних металів струму, крім відомого тепла I^2R , виділяється або поглинається додаткове тепло, пропорційне першого ступеня струму. Останнє отримало назву тепла Пельтьє.

У числі інших нових понять Гіббс в 1875 році вводить хімічний потенціал μ - енергія, яку слід затратити для додавання в систему великої кількості частинок ще однієї частки. В умовах рівноваги ця величина залишається постійною по всьому об'єму системи. Поняття хімічного потенціалу легко узагальнити і на випадок перебування системи в зовнішньому полі (під яким в подальшому маємо на увазі електричне поле з потенціалом ϕ): для цього до хімічного потенціалу μ потрібно додати відповідну потенційну енергію частки з зарядом q , отриману

нею при попаданні в систему. Отже умовою рівноваги є сталість електрохімічного потенціалу ($\mu + q\phi$).

З вищезгаданого досліду Вольта: протилежні кінці залізного провідника були поміщені в киплячу і крижану воду, створюючи тим самим в системі вільних електронів, що знаходяться у металі, градієнт температури[5]. Ця система, разом з нагрівачем і холодильником рівноважною не є: для підтримки різниці температур до неї слід безперервно підводити і відводити теплоту. Якщо кінці дроту не з'єднані між собою в електричний ланцюг, електрони переміщуються в перший момент так, щоб їх щільність відповідала локальній температурі.

Електрохімічний потенціал в провіднику залишається постійним, отже, його похідна по координаті дорівнює нулю. Ця обставина дозволяє зв'язати виникає в провіднику електричне поле з градієнтом температури, а саме ставлення цих двох величин, згідно з формулою (1.2), і визначає коефіцієнт Зеебека. Таким чином, ми приходимо до так званої формулою Кельвіна, що зв'язує коефіцієнт Зеебека з похідною хімічного потенціалу по температурі, мкВ/К:

$$S = \frac{E}{\nabla T} = \frac{1}{q} \left(\frac{d\mu}{dT} \right) \quad (1.3)$$

де μ – хімічний потенціал електронів.

Існують оцінки, що показують, що вартість електроенергії, що виробляється на початку ХХ століття безпосереднім спалюванням палива в паровому котлі і перетворенням тиску пара в механічну роботу, була майже в 40 разів нижче вартості електроенергії, що виробляється доступними в той час термоелектричними джерелами.

Хімічний потенціал електронів в металі при низьких температурах (що означає і при температурі навколишнього нас середовища) величезний ($\mu \approx 3$ еВ), проте від них він залежить дуже слабо. Тому і відповідний коефіцієнт Зеебека в металах виявляється дуже малий, мкВ/К:

$$S = \frac{-\pi^2 k_B^2 T}{3e \mu} \approx 10^{-8} T \frac{V}{K} \quad (1.4)$$

Так, для кімнатних температур наша оцінка призводить до величини коефіцієнта Зеебека порядку декількох мікрвольт на кельвін, що робить метали малопридатними для використання в якості термічних генераторів напруги.

При оцінці коефіцієнта Зеебека в металах ми використовували той факт, що концентрація електронів в ньому величезна, і хімічний потенціал виродженого електронного газу з ростом

температури змінюється слабо. У напівпровідниках це не так: концентрація носіїв заряду експоненціально залежить від температури, приводячи до набагато більш сильної залежності хімічного потенціалу від неї. Це і обумовлює великі значення коефіцієнта Зеебека в напівпровідниках. Вони особливо великі в так званих легованих напівпровідниках, у них для зміни електричних властивостей спеціально додаються домішки, які, вбудовуючись в кристалічну решітку, віддають або приймають зайві електрони. В результаті в такому напівпровіднику, подібно до того, як це відбувається в металі, утворюється газ вільних електронів. Оскільки концентрація домішок в порівнянні з концентрацією атомів самого напівпровідника завжди мала, то в порівнянні з металевим малим виявляється і відповідний хімічний потенціал [6].

При досить низьких температурах цей газ виявляється виродженим, і для коефіцієнта Зеебека напівпровідника можна скористатися наведеною вище формулою для металу, тільки μ в ній буде складати не електронвольт, а десятки або сотні міліелектронвольт. Відповідно, і коефіцієнт Зеебека зросте в десятки або сотню разів в порівнянні з його значеннями в металах (див. табл. 2).

Таблиця 1.2 – Порівняння коефіцієнтів Зеебека для різних речовин[5]

Речовина	Електричні	Коефіцієнт Зеебека (мкВ/К)
Вісмут	метал	-73
Константан	метал	-35
Нікель	метал	-15
Платина	метал	0
Алюміній	метал	3,5
Германій	напівпровідник	300
Кремній	напівпровідник	440
Телур	напівпровідник	500
Селен	напівпровідник	900

1.2 Методи підвищення коефіцієнта корисної дії термоелектричного пристрою

Коефіцієнт корисної дії термоелектричного пристрою визначається відношенням енергії електричного поля, що виділяється на навантаженні за час Δt до повної теплової енергії, поглиненої контактом за цей же час. Безрозмірний показник якості, $ZT = \sigma \cdot S^2 / K$ (де σ - електропровідність, а K - теплопровідність) характеризує ефективність термоелектричного пристрою (рис.1.2), а саме число Z називається термоелектричної добротністю матеріалу, або числом Іоффе. На жаль, для металів показник якості видається дуже малий: при характерних робочих температурах термоелектричних пристроїв він становить величини порядку $10^{-3} \div 10^{-4}$.

Для підвищення ефективності термоелектричного пристрою слід зменшувати теплопровідність використовуваного матеріалу при одночасному збільшенні його провідності і коефіцієнта Зеебека. Як вже було зазначено вище, останній в металах дуже малий через величезної концентрації електронів. Однак ті ж електрони забезпечують металу і високу провідність. При цьому метал має також високу теплопровідність. Провідність металу жорстко пов'язана з електронним внеском в теплопровідність, і їх ставлення обернено пропорційне температурі.

Однак, крім електронів, тепло в металі передається також і його решітками. Її внесок при кімнатних температурах може виявитися досить значним, тому термоелектрична добротність включити в себе суму обох теплопровідностей.

Таким чином, підвищення ефективності термоелектричного пристрою на практиці зводиться до:

- збільшення коефіцієнта Зеебека матеріалу;
- збільшення його провідності;
- зниження теплопровідності решітки.

Для того щоб термоелектричні пристрої стали конкурентоспроможними порівняно з іншими технологіями поновлюваних джерел енергії (наприклад, сонячної або геотермальної), необхідно досягти значень їх ефективності $ZT \gtrsim 4$.

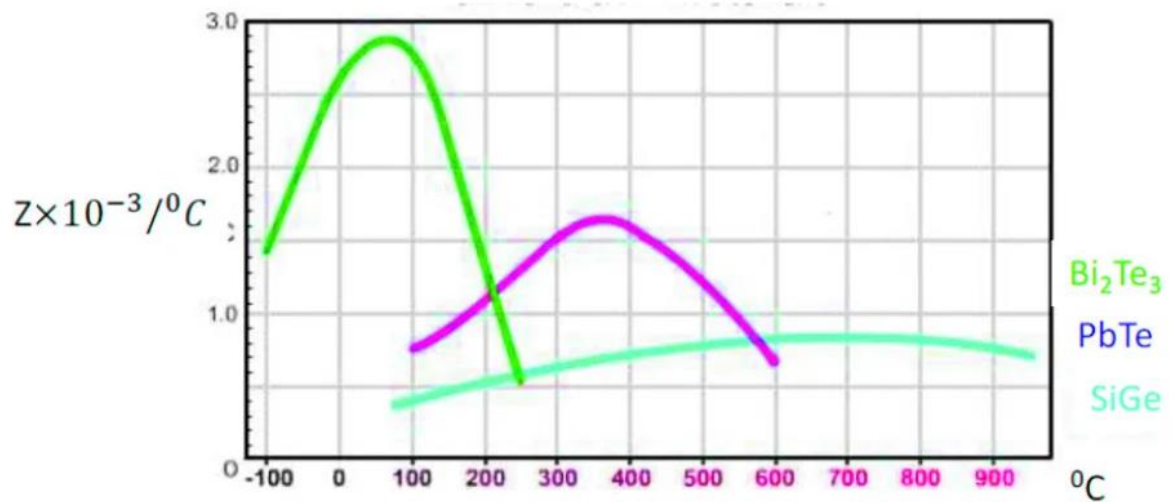


Рисунок 1.2 - Залежність термоелектричної добротності від температури для різних термоелектричних матеріалів[7].

1.2.1 Термоелектричні матеріали з «різномасштабною» структурою дефектів

Зниження теплопровідності багато в чому пов'язане зі структурою матеріалу. Решітка передає тепло за допомогою поширюються по ній пружних хвиль. Ці хвилі потрібно розсіювати, подібно до того, як хвилерізи відображають штормові хвилі біля берегів морів і океанів. Проблема з теплопровідністю полягає в тому, що розсіювати потрібно коливання решітки у всіх масштабах, від атомних до мікронних. Цього можна домогтися, наноструктуруючи об'ємні термоелектрики нового покоління, вводячи в них різномасштабні розсіювачі коливань решітки. Таке «різномасштабне» використання мікроструктурних дефектів підсилює розсіювання пружних хвиль на різних довжинах, не пригнічуючи при цьому електронну провідність, що дозволяє створювати термоелектричні матеріали з високими характеристиками.

У наноструктурованих термоелектричних матеріалах переносять тепло хвилі з малими довжинами можуть розсіюватися вбудованими в решітки домішками з характерними розмірами в нанометри, в той час як хвилі великих довжин розсіюються на дефектах мікронного діапазону з точно вивіреною архітектурою.

Стратегії поліпшення термоелектричних матеріалів спрямовані як на сучасні об'ємні матеріали, так і на використання малорозмірних систем.

Наноструктурування термоелектричних матеріалів на основі напівпровідників, що знижує теплопровідність решітки при збільшенні коефіцієнта Зеебека, призвело до помітних поліпшень в перетворенні теплової енергії в електричну. Однак навіть самі «перспективні» матеріали поки не подолали мінімальну вимогу $ZT = 4$ (див. Табл. 3).

Крім того, створені на сьогоднішній день наноструктуровані матеріали мають ряд технологічних, екологічних і економічних недоліків, таких як їх обмежені розміри, чималі витрати на виробництво і зміст рідкісних і токсичних матеріалів.

Таблиця 1.3 – Безрозмірний показник якості різних матеріалів

Матеріали	ZT	Примітки
Оксиди з шаруватою структурою $(\text{SrTiO}_3)_n(\text{SrO})_m$	$\sim 0,34$ при 1000 K	Дуже перспективні для застосувань при високих температурах
Халькогеніди вісмута $(\text{Bi}_2\text{Te}_3, \text{Bi}_2\text{Se}_3)$	$\sim 0,8 - 1,0$ при кімн. темп.	Не залежить від температури
Наноструктуровані халькогеніди вісмуту (тришарові $\text{Bi}_2\text{Te}_3, \text{Bi}_2\text{Se}_3$)	$\sim 2,4$ при кімн. темп.	Мають високу електропровідність
Кремній-германієві сплави	$\sim 0,7$ при кімн. темп.	Найкращі термоелектричні матеріали при температурах ~ 1000 K

1.2.2 Термоелектрика в електролітах і феромагнітних рідинах

Вчені продовжують шукати екологічно чисті і економічні нові типи термоелектричних матеріалів, таких як полімери, іонні провідники та ін. Одним з таких об'єктів недавно стали рідкі електроліти. Виявляється, що значення коефіцієнта Зеебека у них зазвичай на порядок більше ($S \approx 0,5 \text{ mV} / \text{K}$), ніж у напівпровідникових матеріалів, навіть наноструктурованих. Крім того, вони складаються з доступних і нетоксичних елементів. На жаль, електрична провідність таких рідин на кілька порядків менше, ніж у легованих напівпровідників, тому рідкі електроліти вважалися неефективними для використання розсіюється тепла.

Не так давно новий імпульс пошукам придатних для практичного застосування термоелектричних матеріалів надали дослідження іонних рідин. Останні являють собою розплавлені солі, рідкі як при кімнатній температурі, так і при температурах, набагато перевищують 100°C (деякі можуть перевищувати і 300°C). На відміну від рідких електролітів, поряд з великими коефіцієнтами Зеебека, іонні рідини мають високу електропровідність, що забезпечує їх високу ефективність ($ZT \approx 2$). На сьогодні найвище значення коефіцієнта Зеебека, отримане в широкому діапазоні температур в системі з іонною рідиною, перевищує $2 \text{ mV} / \text{K}$. Таким чином, іонні рідини є перспективними кандидатами для утилізації теплових втрат, наприклад, перетворення тепла вихлопної труби автомобіля в електроенергію, якої буде достатньо для роботи кондиціонера, що охолоджує його салон.

Коефіцієнт Зеебека рідких електролітів може бути також збільшений за допомогою введення в їх обсяг магнітних наночастинок. Їх повільний дрейф під впливом різниці температур і взаємодія з електродами покращують термоелектричні властивості рідини.

Наявне розуміння термоелектрохімічної природи складних рідин ще далеко від повноти, однак в цій захоплюючій області ведуться активні експериментальні і теоретичні дослідження, котрі обіцяють довгоочікуване застосування в утилізації теплових втрат, які завдають шкоди не тільки економічний, але і екологічний.

1.3 Загальні відомості про термоелектричні теплові насоси

Пристрій теплового насоса схоже з холодильною машиною (ХМ). В ХМ основним завданням є відведення тепла від об'єкта тобто його охолодження, в тепловому насосі відведена теплота використовується для обігріву будь-якої середовища. Тобто в першу чергу створення теплового насоса було обґрунтовано економічно. Такі машини бувають парокомпресійними, абсорбційними, термоелектричними. Але якщо в перших двох випадках холодильну машину потрібно переробити, вдосконалити і ускладнити для отримання бажаного

ефекту, то в третьому випадку справа йде трохи інакше. Термоелектричний холодильник вже є і радіатором і також генератором електроенергії, в залежності від режиму роботи, і поняття теплового насоса відображає не мета, з якою використовується машина, а саму суть її роботи і тих фізичних процесів, які в ній протікають. Тому існує певна різниця в розумінні теплового насоса для різних видів машин.

1.3.1 Фізична основа процесу

Зазначені пристрої містять термоелектричний модуль, сформований у вигляді матриці термоелектричних елементів, що складаються з провідників або напівпровідників P- і N-типу, з'єднаних послідовно по току і з'єднаних паралельно по потоку теплоти.

Загалом термоелементам дані різні назви. Найбільш розповсюджені з них, принцип роботи яких базується на використанні поздовжнього ефекту Зеебека або Пельтьє, мають назву термопарного елемента або термопари. Саме вони використовуються у конструкції термоелектричних теплових насосів. Термоелементи, в яких термоелектричне перетворення досягається поперечними ефектами Зеебека або Пельтьє, називаються анізотропними термоелементами, і т.д.[6].

Термоелектричні елементи розміщені на підкладках з електроізоляційного теплопровідного матеріалу, як правило, кераміки. Термоелектричні модулі з'єднані з теплообмінниками для формування теплового насоса, призначеного для використання в побуті та промисловості.

Відомі термоелектричні теплові насоси мають певні недоліки, пов'язані зі способами з'єднання теплообмінників з термоелектричними модулями і підключення цих термоелектричних модулів до джерела живлення, а також до контролера.

Тепер опишемо ефект Пельтьє, який є корисним. Є певний провідник, що складається з двох різнорідних матеріалів, спаяних між собою. Електрон при переході в систему з енергією вище його власної, втрачає частину своєї енергії, охолоджується, а значить, знижує температуру системи. Таким чином виникає ефект охолодження. І навпаки, при переході в систему з енергією нижче власної, електрон віддає частину своєї енергії, а відповідно вивільняється теплота, відбувається підвищення температури системи. Виникає різниця температур. Варто зауважити, що кількість електронів дуже велике, а рух їх не строго направлено, тому свій шлях окремий електрон може пройти тільки за кілька десятків років. Ефект Пельтьє відбувається на тлі теплоти Джоуля, яка виділяється рівномірно і прогріває всю систему. Тому поверхню теплового контакту слід стабілізувати при температурі навколишнього

середовища, тобто організувати скидання теплоти, як тієї, яку скидає охолоджуване тіло, так і теплоту Джоуля. Таким чином термоелектричний тепловий насос переміщує теплоту від середовища з більш низькою температурою до середовища з більш низькою температурою, всупереч другим законом термодинаміки.

Робота базується на трьох основних принципах. Перший - ефект Пельтьє, що дозволяє відводити теплоту. Теплота Джоуля, що виділяється по всьому об'єму, половина якої надходить на гарячий, а половина на холодний спай. І також ефект теплопровідності - природної передачі теплоти від більш гарячого спаю до менш гарячого[8].

Кількість тепла Q_1 , що поглинається, залежить від різниці коефіцієнтів термоелектричних сил зварених матеріалів, сили струму, температури холодного зварювання, а також часу. „Привідною” енергією у такому насосі є енергія E_w , отримана із джерела електричного струму. Якщо записати ці три теплоти з урахуванням знаків, для випадку роботи в режимі охолодження отримаємо:

$$Q_n - Q_{дж} - Q_{тепл} = \alpha \cdot I - 1/2(I^2 R) - K (T_z - T_x), \quad (1.5)$$

де α – термо-ЕРС матеріалу;

T - температура контакту °C;

I -сила струму, А;

R - електричний опір, Ом;

K - повна теплопровідність елемента, Вт/(К).

Зі зростанням різниці температур відбувається збільшення ефекту теплопровідності.

Після досягнення певного значення сили струму, теплота Джоуля починає переважати над ефектом Пельтьє, так як в вираженні для теплоти Джоуля сила струму знаходиться в квадраті. Значить, існує межа ефекту охолодження. І можливо досягнення максимуму різниці температур при компенсації всіх трьох ефектів. Тоді можна прирівняти вираз (1.5) до нуля:

$$\alpha \cdot I - 1/2(I^2 R) - K (T_z - T_x) = 0 \quad (1.6)$$

Такий режим демонструє можливості ефекту, але для отримання практичної вигоди потрібно помістити навантаження на холодний спай. В такому випадку зменшиться різниця температур, але ефект Пельтьє буде використовуватися для охолодження

$$\alpha \cdot I - 1/2(I^2 R) - K \cdot \Delta T_{роб} = Q_0 \quad (1.7)$$

$$\Delta T_{роб} < \Delta T_{max} \quad (1.8)$$

При збільшенні теплового навантаження робоча різниця температур зменшується. В кінцевому підсумку маємо $\Delta T_{роб} = 0$, $Q_0 = Q_{0max}$, тоді

$$Q_{0max} = K \cdot \Delta T_{max} \quad (1.9)$$

Далі можна визначити максимально можливий (оптимальний) струм, при якому досягається ΔT_{max}

$$\alpha T_x = IR \quad (1.10)$$

$$I_{opt} = I_0 = \alpha \cdot T_x / R = \alpha \cdot T_x \cdot S / (\rho \cdot l). \quad (1.11)$$

α залежить від властивостей матеріалу. Висоту і переріз гілки можна варіювати будь-яким способом. Це дає теоретичну можливість створювати термоелемент будь-якої потужності.

Знаючи оптимальний струм, можна визначити ΔT_{max} , К:

$$\Delta T_{max} = 1/2 Z \cdot T_x^2 = 1/2 (\alpha^2 T_x^2 / (R \cdot K)) \quad (1.12)$$

З останнього виразу впливає важливе зауваження про те, що ефективність термоелектричних холодильних машин залежить тільки від енергетичних і теплових характеристик матеріалу. Ніяких технічних параметрів у формулі немає, значить, ефективність не залежить від геометричних параметрів, що вельми вигідно відрізняє термоелектричні машини від парокомпресійних, де ефективність безпосередньо залежить від потужності на валу електродвигуна.

Ще раз розглянемо холодний спай термоелемента, що знаходиться при максимальній різниці температур. З огляду на принцип адитивності теплових потоків, може скорочувати потоки спрямовані один одному назустріч.

$\Delta T_{max} = 0$, тоді

$$S \cdot Q_{пельтье} = Q_{\kappa} \quad (1.13)$$

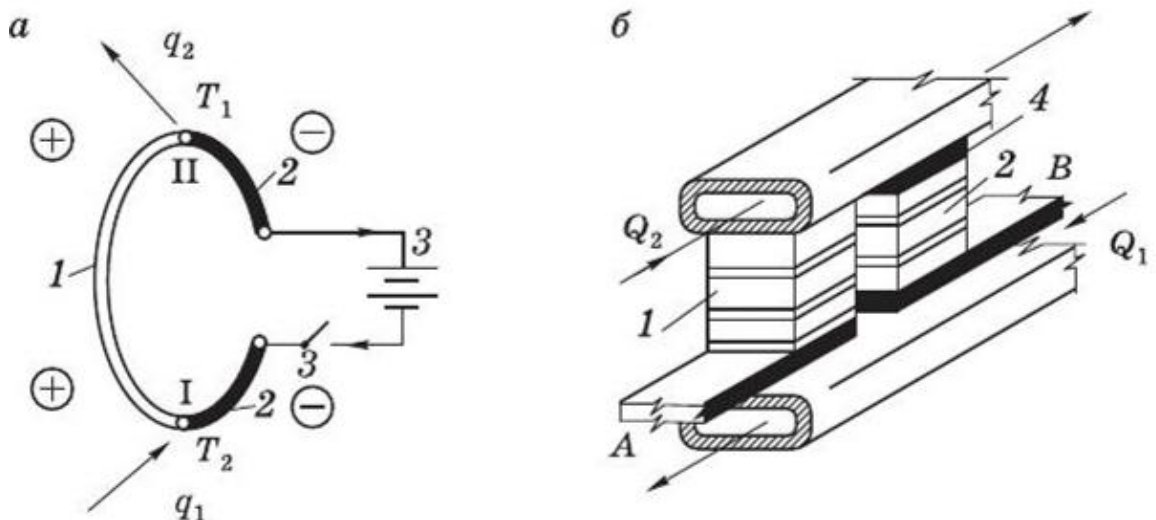
Таким чином, при максимальній різниці температур одна половина теплоти Пельтье витрачається на переміщення половини теплоти Джоуля на гарячий спай, а друга половина на компенсацію теплового потоку на холодний спай, що надходить за рахунок теплопровідності

гілок термоелемента. Фізична картина на холодному спайі термоелемента при максимальному струмі і різниці температур така: ефект Пельтьє переміщує всю теплоту Джоуля на гарячий спай і компенсує потік за рахунок теплопровідності гілок при температурі нижче температури гарячого спаю на величину $\Delta T_{\max}$.

1.4 Принципова конструкція термоелектричного теплового насоса

Зазвичай ТН є серією термоелементів, з'єднаних послідовно за допомогою спеціальних комутаційних пластин. Термоелектроди 1 і 2 з'єднані комутаційними пластинами, що утворюють спай (рис. 1.3а). В результаті утворюється група так званих гарячих спайів, що працюють при температурі T_1 , і холодних, що працюють при температурі T_2 . Повна ЕРС, що розвивається ТН, дорівнює сумі ЕРС окремих елементів. При замиканні ТН (висновки А і В) на навантаження через все термоелектроди і комутаційні пластини проходить один і той же струм (рис. 1.3б). В результаті цього гарячі спайі поглинають теплоту, а холодні - виділяють.[8]

Існуючі термоелектричні теплові насоси можна поділити на дві групи. До першої групи належать ТН малої теплопродуктивності (0,1 ... 100 Вт). Доцільність застосування ТН цієї групи обумовлена створенням малогабаритних джерел теплоти або холоду, безшумних, надійних, які не потребують обслуговування під час експлуатації. До другої групи належать ТН великої теплопродуктивності, використовувані для опалення та кондиціонування повітря[9].



1 - напівпровідник з дірчастою провідністю; 2 - напівпровідник з електронною провідністю;

3 – джерело постійного струму; 4 – комутаційні пластини.

Рисунок 1.3 – Принципова схема термоелемента (а) та термоелектричного теплового насосу (б)

1.4.1 Каскадні термоелектричні теплові насоси

Якщо холодопродуктивність машини достатня, але різниця температур не задовольняє потреб споживачів, і існує необхідність отримати робочу різницю температур більше максимальної різниці температур, то є сенс поєднати термобатареї в каскад.

На гарячому спаї найнижчій термобатареї виділяється найбільша кількість теплоти, тому що теплота Джоуля підсумовується, то кожен каскад вносить свій внесок. Каскадування дозволяє збільшити робочу різницю температур.

1.4.2 Режим максимального (оптимального) холодильного коефіцієнта

Відомо, що на відміну від ККД холодильний коефіцієнт може бути і дорівнює одиниці і навіть бути більше неї

$$e = Q_0 / W_0 \quad (1.14)$$

Варто затримати увагу на цьому парадоксі. Для перекладу системи з одного стану в інший немає необхідності переводити в цей стан кожен частинку системи окремо, так як існують частинки з енергією набагато більше і менше середньої. Це створюється за рахунок розподілу Гауса - статистичного розкиду часток системи по енергіях.

Отже, цей процес відбувається природним шляхом, і немає потреби здійснювати роботу. Оскільки ця енергія W знаходиться в знаменнику, холодильний коефіцієнт зростає при прагненні різниці температур до нуля, і значить при прагненні максимумів систем до поєднання. У разі рівного розподілу температур кожна частка за рахунок броунівського руху може виявитися в будь-який з цих двох систем.

Також існують деякі методи вдосконалення термоелектричного теплового насоса. Завдяки компактності елементів, існує можливість поєднувати термоелектричні ТН, або термоелектричні модулі, у різні конфігурації. Це дозволяє не тільки зручно розташовувати їх в залежності від вимог, а й покращувати ефективність за рахунок грамотних геометричних рішень.

1.5 Основні переваги термоелектричних теплових насосів

Теплові насоси, що працюють на термоелектриці, принципово відрізняються від парокомпресійних і абсорбційних машин.

- 1) Просте перемикання режиму "холодильник-радіатор", що здійснюється за рахунок зміни напрямку течії струму.
- 2) Незалежність від габаритів, форми, просторового розташування, ваги.
- 3) Відсутність холодоагентів. Робота відбувається електричним струмом. В даний час існує проблема використання вуглеводневих робочих речовин, найефективніші з них, такі як R12 і R22 заборонені через руйнівної дії на озоновий шар, хлор, що входить до їх складу, вкрай небезпечний для атмосфери Землі. Аміак токсичний і небезпечний у використанні. Природні холодильні агенти, наприклад, пропан, етан, вкрай вибухо- і пожежонебезпечні, особливо при їхньому проходженні через компресор, що небезпечно для здоров'я і навіть життя робітників.
- 4) Відсутність інерції через те, що робота відбувається електричним струмом.
- 5) Нечутливість до короткого замикання.
- 6) Відсутність рухомих частин, безшумність, відсутність вібрацій, а значить, довгостроковість і надійність роботи, відсутність згубного впливу на здоров'я робітників.
- 7) Відсутність змійовиків, які потребують особливої уваги, промивання, продування, зняття льоду.
- 8) Незамінність в областях, що знаходяться в недосяжності для людини, де важливий сам факт можливості отримання енергії, а не ефективність, наприклад, в космосі. [10]

1.6 Висновки за розділом 1

Явище термоелектрики вивчається людством вже близько 200 років. В основі багатьох теплотехнічних пристроїв лежить ефект Зеебека або ж обернений йому ефект Пельтьє. Зокрема робота описаного в даному дослідженні термоелектричного теплового насоса базується на принципі Пельтьє – властивості нагрівання або охолодження стику двох провідників при протіканні через нього електричного струму.

Застосування термоелектричних насосів має ряд унікальних переваг, що робить їх незамінними для розглянутих нами робочих умов та задач. Очевидно, з перспективності застосування термоелектричних теплових насосів для вузькоспеціалізованих галузей постає питання у вивченні впливу режимних параметрів на ефективність їх роботи для можливості подальшої оптимізації, що дозволить досягти підвищення енергоефективності.

2 СИСТЕМИ КАСКАДНОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ У КОМПЛЕКСАХ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1 Концепція комплексу систем життєзабезпечення екіпажів міжпланетних експедицій

Зважаючи на величезну роль освоєння космічного простору для подальшого розвитку науки і економіки та необхідності великих фінансових витрат, подальше розвиток пілотованої космонавтики в найближчі десятиліття, ймовірно, буде пов'язаний насамперед із міжнародними космічними проектами. Насамперед це приєднання нових наукових модулів до Міжнародної космічної станції (МКС).

Реалізація перспективних орбітальних та міжпланетних польотів пов'язана з удосконаленням фізико-хімічного комплексу систем життєзабезпечення (СЖЗ), завданням якого є підтримання штучного докілья для забезпечення безпечного комфортної життєдіяльності екіпажу в багатомодульних герметичних космічних об'єктах з мінімальними витратами змінної маси продуктів та обладнання для забезпечення ресурсу систем [3].

Досвід експлуатації комплексів СЖЗ орбітальних космічних станцій може бути використаний для подальшої модернізації комплексу СЖЗ МКС та розробки замкнутих комплексів СЖЗ з регенераційними системами для здійснення місячної та марсіанської експедицій. В даний час для орбітальних польотів в основу концепції проживання на космічних об'єктах закладаються тільки фізіолого-гігієнічні вимоги людини без урахування біологічної повноцінності докілья. Завдання СЖЗ полягає у забезпеченні протягом обмеженого часу необхідних фізико-хімічних параметрів середовища, а також кількості та якості споживаних речовин (кисню, води, їжі) та видалення продуктів життєдіяльності [3].

2.1.1 Основні завдання створення комплексу СЖЗ для міжпланетних експедицій

2.1.1.1 Збільшення безпеки, надійності та ремонтпридатності систем та агрегатів

Це одне з основних питань для всіх систем і агрегатів космічних об'єктів поза земною орбітою, оскільки у цьому випадку не можна швидко повернути екіпаж на Землю або орієнтуватися на доставку (або швидку доставку) обладнання на космічну станцію. Особливо це важливо для комплексу СЖЗ, від якого безпосередньо залежить життєдіяльність людини, і велика кількість обладнання якого працює безперервно. Запитання безпеки повинні бути вирішені раніше всього за рахунок вимог до систем пожежної, вибухо- та токсичної безпеки [11] не тільки при зберіганні та роботі, але й за будь-яких відмови в системах комплексу СЖЗ.

Забезпечення надійної роботи систем має здійснюватися за рахунок загальних принципів:

- повноцінної наземної обробки систем та агрегатів;
- гарячого та холодного дублювання;
- ремонтпридатності з можливістю швидкої заміни екіпажем окремих блоків з мінімальною витратою часу.

Тут важливі розподіл надійності за елементами та блоками кожної функціональної системи та вироблення концепції заміни елементів, блоків, агрегатів, важлива уніфікація змінного обладнання, можливість його використання в кількох системах.

2.1.1.2 Максимальне вилучення та регенерація води та кисню з продуктів життєдіяльності екіпажу

Насамперед, для здійснення міжпланетної експедиції потрібно мінімізувати масу та обсяг витратних матеріалів та змінного обладнання - для зниження стартової маси. Максимальний ефект, може бути досягнутий тільки при повному вилучення води з продуктів життєдіяльності екіпажу і кисню - з діоксиду вуглецю, що виділяється людиною. Для цього комплекс СЖЗ має бути максимально замкнутий по воді та кисню з регенерацією всіх видів води, використанням зневодненої (обводняється при споживанні) їжі, пранням та сушінням білизни, сушінням відходів життєдіяльності людини, сушінням та пресуванням побутових відходів, а запаси газів повинні використовуватися тільки для компенсації втрат при шлюзуваннях, аварійних ситуаціях та непередбачених випадках. Проблема регенерації води може вирішуватися, в основному, за рахунок модернізації систем, так як системи для регенерації всіх видів води (з конденсату атмосферної вологи, урини та санітарно-гігієнічної) вже створені та експлуатувалися на космічних станціях[12].

2.1.2 Дистиляція як метод водозабезпечення екіпажів міжпланетних експедицій

Однією з найважливіших складовими СЖЗ є системи водозабезпечення. Основними джерелами отримання регенерованої води на космічній станції є конденсат атмосферної вологи (1,5 літра на космонавта на добу) та урину. З концентрованої урини зі змивною водою (1,3л + 0,3л) можна витягти до 1,5 літра води на космонавта на добу[13].

Дистиляція є основним методом регенерації води з урини. космічних станцій, при якому досягається високий ступінь вилучення води та чистота конденсату. Урина є нестабільним, термолабільним розчином, схильним до розкладання з виділенням газів і випаданням осаду. Тому дистиляції піддається урина з консервантом, який перешкоджає розмноженню бактерій

та містить компоненти, що сприяють зв'язуванню продуктів розпаду нестабільних речовин, при цьому процес здійснюється при зниженому тиску (0,035-0,1 кг/см²) та температурі нижче 55°C.

Мінімізація маси, обсягу та енергоспоживання системи досягається застосуванням високоінтенсивних процесів випаровування, конденсації, поділу фаз та технічних рішень, що дозволяють за умов невагомості на борту МКС реалізувати найефективніші схеми дистиляції з мінімальними питомими витратами енергії на одиницю отриманого конденсату та різними способами рекуперації теплової енергії.

2.2 Очищення стічних вод методом термічної дистиляції

Принцип роботи термічної дистиляції заснований на підводі тепла до вихідного розчину, випаровуванні води з розчину і конденсації отриманої пари. Таким чином, в процесі термічної дистиляції присутні етапи підведення теплоти (випаровування) і відведення теплоти (конденсація), що дозволяє, для підвищення ефективності системи, використовувати тепловий насос. В умовах невагомості і відносно невеликих продуктивностей може ефективно працювати термоелектричний тепловий насос. Його очевидною перевагою є відсутність рухомих частин, простота і надійність конструкції.

На єдиному заселеному неземному об'єкті - міжнародній космічній станції - для регенерації стічних вод встановлено термічний вакуумний компресійний відцентровий дистилятор. Він працює з 2008 року і переробив понад 13 тон води. Це істотно зменшило витрати на її доставку (вартість доставки 1 кг вантажу на МКС становить близько 3000 доларів). Однак, як уже зазначено в багатьох роботах, його конструкція не дозволяє гарантувати роботу в разі тривалих місій, а усунути цей недолік принципово неможливо [1].

2.2.1 Статичний термоелектричний мембранний дистилятор (TIMES)

Цей дистилятор був розроблений у Hamilton Seastrand Space Systems International в 1970 роках [14].

Система використовує полімерну мембрану, яка вибірково пропускає воду з джерела стічних вод. В ідеальному випадку небажані розчинені і нерозчинені тверді речовини не проходять мембрану, і виходить якісний дистилят (рис.2.1). Важлива особливість TIMES – загальна рециркуляція потоку вихідної речовини, яка в процесі роботи дистилятора стає все більш і більш концентрованою. Споживання енергії мінімізується за рахунок використання твердотільних (нерухомих) теплових насосів (термоелектричних пристроїв).

Нагрітий в термоелектричному пристрої розчин забирається циркуляційним насосом і проходить через спеціальну мембрану, а отримана водяна пара конденсується на холодній стороні термоелектричного пристрою.

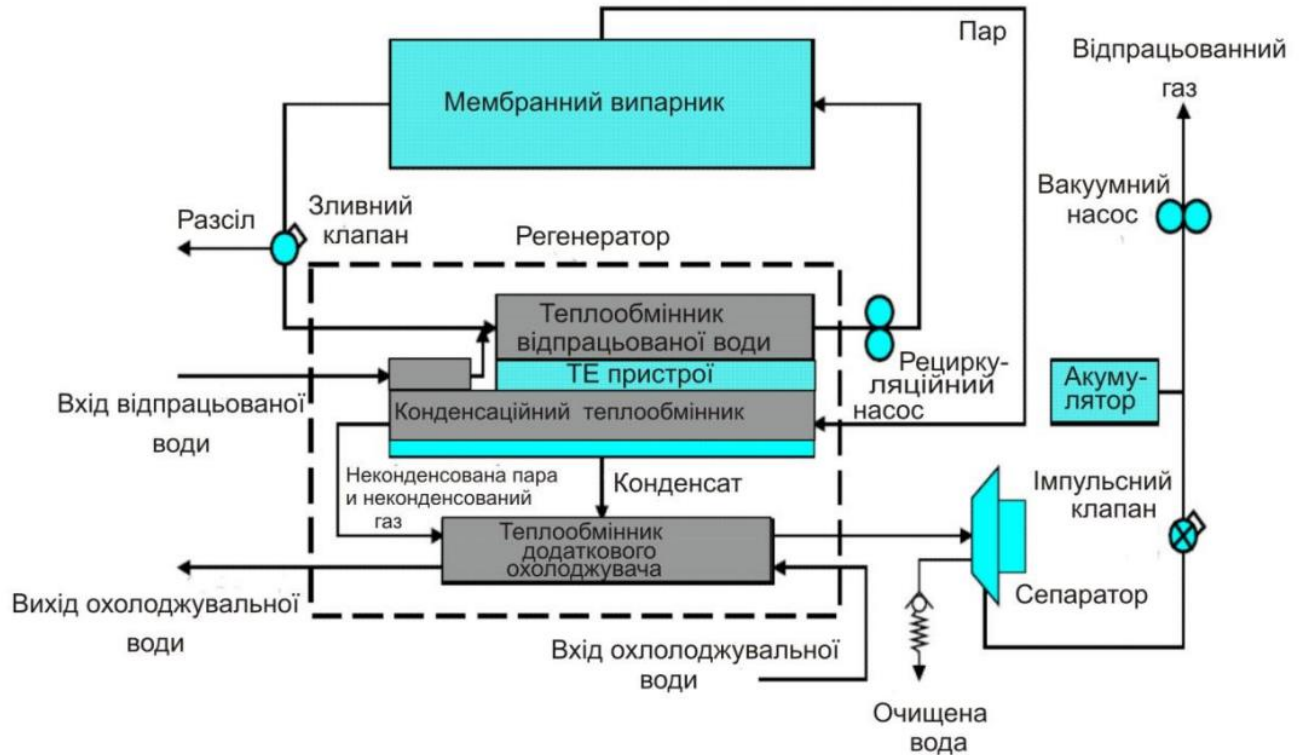


Рисунок 2.1 - Принципова схема TIMES

На основі відомих рівнянь і властивостей напівпровідників [7] була розроблена безрозмірна діаграма термоелектричних характеристик, яка показана на рис.2.2.

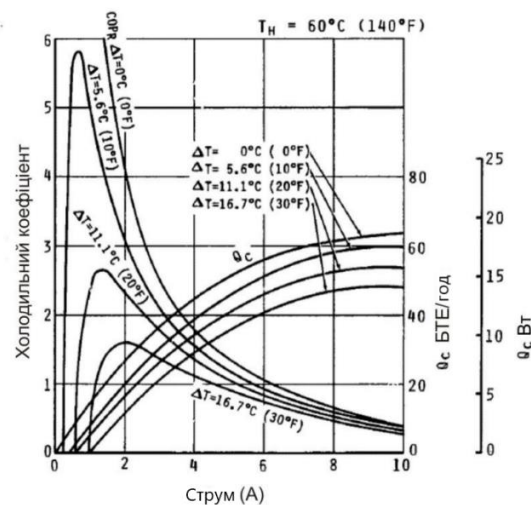


Рисунок 2.2 - Технічні характеристики термоелектричного пристрою

На термоелектричну ефективність (COP_R) впливає не тільки конструкція конденсатора, а й площа мембрани, швидкість рециркуляції урини, конструкція теплообмінника урини, термоелектричний струм і концентрація твердих речовин в стічних водах і т.д. В результаті при експериментальних випробуваннях з неконцентрованою уриною номінальний COP_R приблизно дорівнював 2,8. Основні характеристики розробленої системи показані на рис. 2.3.

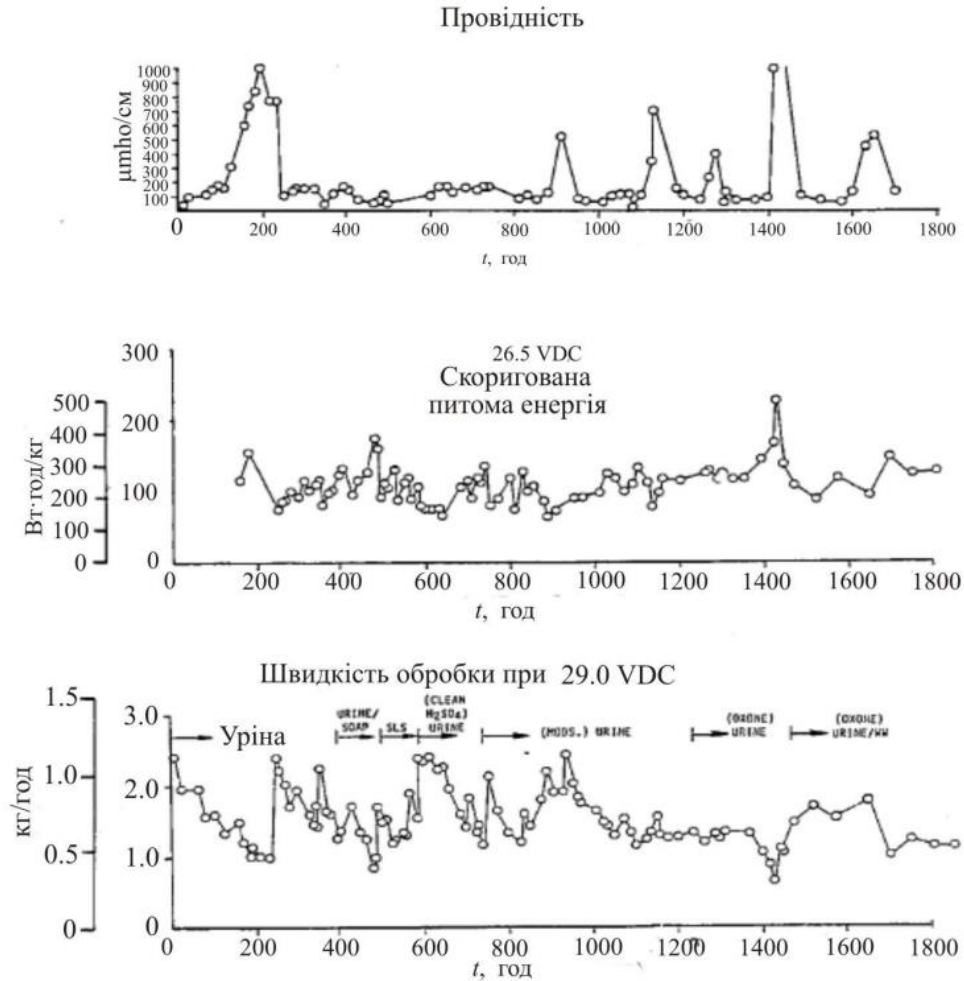


Рисунок 2.3 - Робочі параметри TIMES

Пізніше TIMES був модифікований [15] для усунення виявлених недоліків: площа мембрани була збільшена в 2,6 рази, термоелектрична теплообмінна площа була збільшена в 4,2 рази, а конденсатор був перероблений. Результатом такої модернізації системи стало збільшення продуктивності при роботі на неконцентрованій урині в 1,9 рази і збільшення термоелектричного COP_R до 3,1 в порівнянні з прогнозованим теоретично $\text{COP}_R = 5$. Аналіз системи показав, що конденсаційний теплообмінник є основною причиною цього зниження продуктивності. По-перше, проточна частина конденсатора неефективно відводила воду, що

призводило до підтоплення теплообмінної поверхні, в результаті чого припинялося ефективне відведення теплоти в процесі конденсації. По-друге, блокування всіх каналів призводило до скупчення неконденсованих газів в конденсаторі. Це викликало підвищений тепловий опір процесу конденсації, що ще більше збільшило термоелектричну різницю температур ΔT . Зрештою, тиск в конденсаторі збільшувався до тих пір, поки, принаймні, через деякі з каналів не видувалася вода, і процес накопичення починався заново. Все це призводило до дуже невисокої енергоефективності системи.

Були серйозні проблеми і з якістю одержуваної води. Були виявлені перетікання на стику мембран та їх колектору. Друге джерело забруднення полягає в тому, що розчинені тверді речовини всередині мембран транспортуються безпосередньо через стінки мембрани, коли мембрани вступають в контакт з водяним конденсатом продукту всередині випарника. Утворення конденсату в випарнику може відбуватися в процесі різних перехідних режимів роботи. Третьою причиною зниження якості води є утворення водорозчинних газів, які можуть проходити через мембрани. Основним небажаним газом є аміак. Оскільки утворення аміаку залежить від температури, то зниження робочої температури TIMES має привести до поліпшення якості води. Однак це вимагає переходу на більш низький робочий тиск, а конструкції конденсаційних теплообмінників TIMES була чутливою до робочого тиску, стаючи менш ефективними при більш низькому тиску.

Крім того, граничне концентрування рідини в системі TIMES обмежене через відкладення солей в порах мембранного випарника. Аналогічні процеси спостерігаються в мембранах зворотного осмосу при знесоленні солоних вод з концентрацією близькою до урини і рівнем вилучення води до 60%.

Таким чином, незважаючи на цікаву ідею, система TIMES працювала нестабільно, особливо в плані енергоефективності та якості одержуваного дистилату. Зазначені недоліки неможна було усунути без кардинальної зміни концепції всієї системи. В результаті на початку 1990-х років розробка системи TIMES практично припинилася, а для льотних випробувань для переробки урини на Міжнародній космічній станції була обрана конкуруюча технологія термічної дистиляції VCD

2.2.2 Відцентровий парокомпресійний дистилатор (VCD)

Парокомпресійний відцентровий дистилатор (VCD) був створений і виготовлений в 1962 році на замовлення NASA [9]. У 2008 році останній варіант VCD був встановлений на

МКС, де продовжує працювати по теперішній час. За його допомогою на МКС було отримано понад 13 тон дистилату [16]

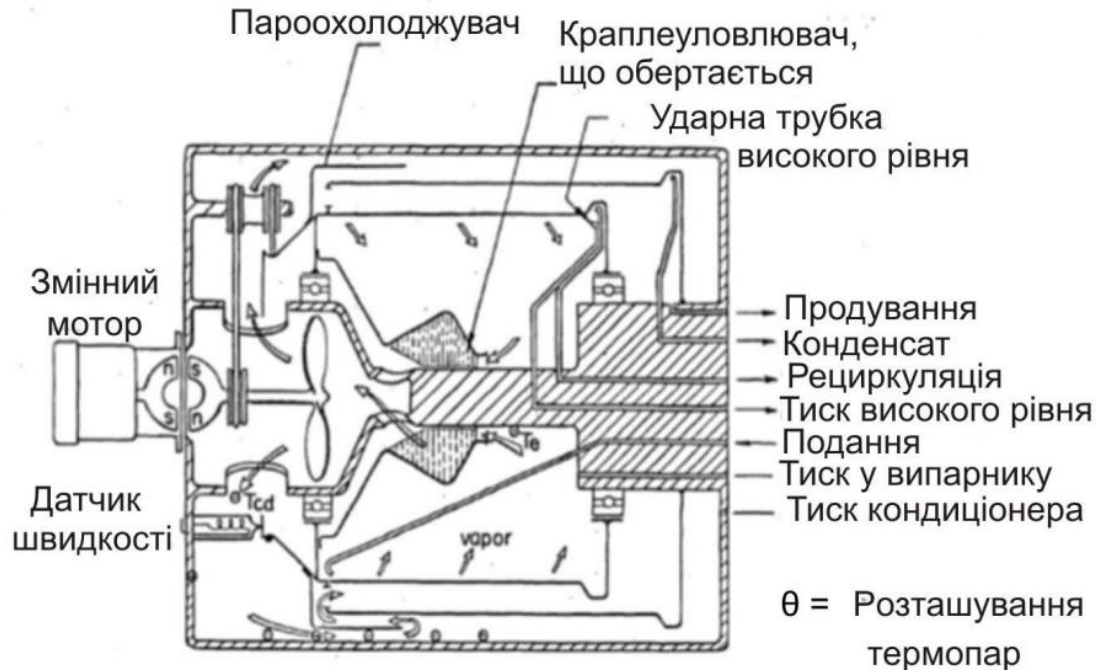


Рисунок 2.4 - Принципова схема парокompресійного дистиллятора

На рис. 2.4 показаний блок дистиляції, який є основним робочим компонентом, навколо якого розроблений модуль VCD. Всередині дистиллятора є дві основні частини: центрифуга для поділу рідкої і газової фаз та компресор. Центрифуга складається з двох циліндрів: внутрішнього циліндра, по якому тече плівка рідини, що випаровується, і зовнішнього циліндра, призначеного для збору крапель води, сконденсованих на його поверхні. Компресор призначений для відводу пари, що утворюється при випаровуванні, підвищення його температури і тиску та подачі її в конденсатор. Не вся рідина випаровується при проходженні через циліндр, що обертається; та частина, що залишилася, разом з твердими частинками, які були розчинені у воді, відводиться в кільцевий відстійник на протилежному кінці. Кінетична енергія рідини перетворюється в статичний тиск, який досить високий для подачі рідини до впускного отвору насоса без миттєвого випаровування. Точно так же вода, сконденсована на протилежному боці внутрішньої поверхні, збирається в обертовому кільцевому відстійнику, забирається стаціонарною трубкою і направляється до впускного отвору відповідного насоса.

Компресор представляє двороторну машину з приводом від електродвигуна, зі швидкістю 3600 об/хв. Для полегшення доступу двигун розташований зовні дистиллятора. Синхронна магнітна муфта застосовується для передачі крутного моменту двигуна через

границю камери на вхідний вал компресора без необхідності динамічного ущільнення валу. Центрифуга приводиться в рух валом компресора через систему ременів і шківів (швидкість обертання центрифуги 290 rpm). На вході в компресор встановлений обертовий демістер, щоб виключити попадання рідини з потоку пари. Продуктивність дистилятора по воді при роботі на урині становить близько 1,3 л/год.

Питома витрата енергії дистиляційної установки суттєво залежить від концентрації розчину (див. рис.2.5).

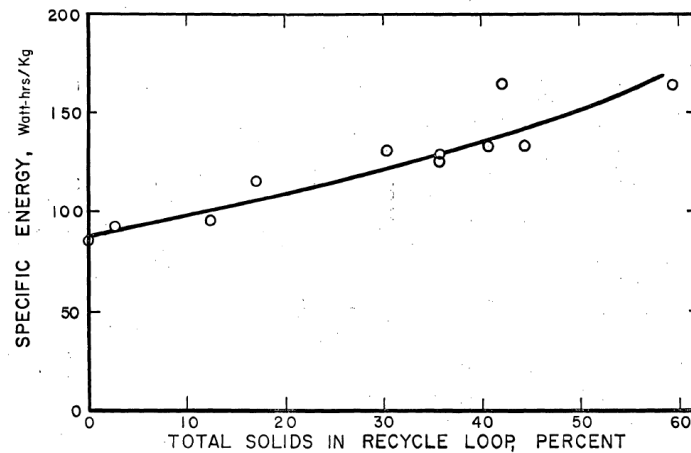


Рисунок 2.5 - Вплив концентрації в рециркуляційному контурі на питоме споживання енергії

На рис. 2.6 показаний графік сумарної продуктивності парокompресійного дистилятора в період з 21.11.2008 по 21.11.2018 [16]. Середня продуктивність VCD була 4 ... 5 л/добу, не перевищувала 1,8 л/год, ступінь вилучення води становила 75%, і тільки після 2016 роки її вдалося збільшити до 85%. Основною причиною низької продуктивності є низький коефіцієнт теплопередачі, який не перевищує 800 Вт/м². Відбувається це через невисоку швидкості обертання центрифуги дистилятора. Також в роботі [16] зазначається, що у зв'язку з особливістю роботи компресора, на вхід в теплообмінник надходить перегріта пара. В результаті значна частина теплообмінної поверхні використовується для неефективного процесу охолодження перегрітої пари і тільки потім починається конденсація пари.

В результаті, незважаючи на успішний досвід експлуатації VCD на МКС в останніх публікаціях йдеться про неможливість використання цього дистилятора для тривалих космічних місій. Для повноцінної космічної подорожі у нього дуже низька продуктивність (<2 л/год), невисока ефективність (яка до того ж сильно залежить від розчину, що переробляється), в конструкції системи присутні неефективні перельстатичні насоси для

перекачки рідких потоків, ступінь регенерації 85% також недостатня для тривалих місій. І що дуже важливо, наявність складного парового компресора в принципі не дозволяє гарантувати безперебійну роботу тривалий період часу, що критично важливо при тривалих космічних місіях. Зазначені недоліки неможливо усунути без повної перебудови конструкції дистилятора.

Таким чином, існує необхідність розробки системи, яка б відповідала всім вимогам до тривалих польотів.

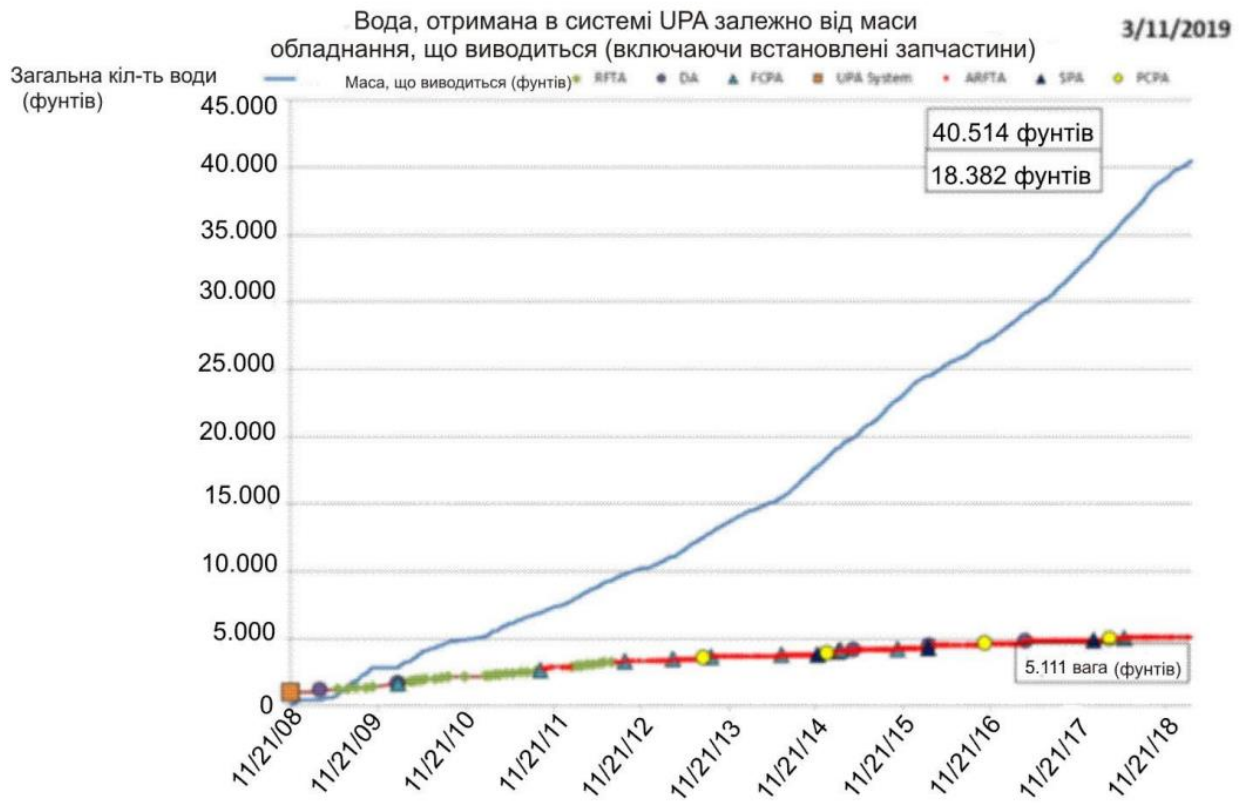


Рисунок 2.6 - Сумарна та річна кількість виробленого дистиляту на МКС за допомогою VCD

2.2.3 Відцентровий плівковий скребковий дистилятор (WFRD)

Відцентровий плівковий дисковий випарник був сконструйований і випробуваний в Центрі водних технологій Каліфорнійського університету в Берклі.

На рис. 2.7,а схематично показано поперечний переріз дистилятора, а на рис. 2.7,б – схематичний розріз двох пар дисків. Ротор складається з дисків, з'єднаних разом з периферії з утворенням порожнин, які також пов'язані одна з одною по периферії внутрішніх отворів. Ротор встановлений на ступиці, яка закрита з одного кінця і відкрита з іншого. Пара вводиться через відкритий кінець і конденсується на внутрішніх поверхнях дисків, що обертаються.

Конденсат, що утворюється на внутрішніх поверхнях дисків, викидається на периферію, де він надходить в стаціонарні трубки (черпаки) для продукту-дистилату, які з'єднані з центральною трубою. Ротор обертається по горизонтальній осі всередині камери, в яку водний розчин подається по довжині стаціонарних скребків (рис.2.7,б), і розподіляється у вигляді тонкої однорідної плівки на зовнішніх поверхнях обертових дисків без утворення сухих плям. Рідина, яка не випарувалася, скидається на периферію дисків і виводиться з камери. Використання відцентрової сили і скребка призводить до зменшення товщини плівки дистилату, що збільшує коефіцієнт тепловіддачі.

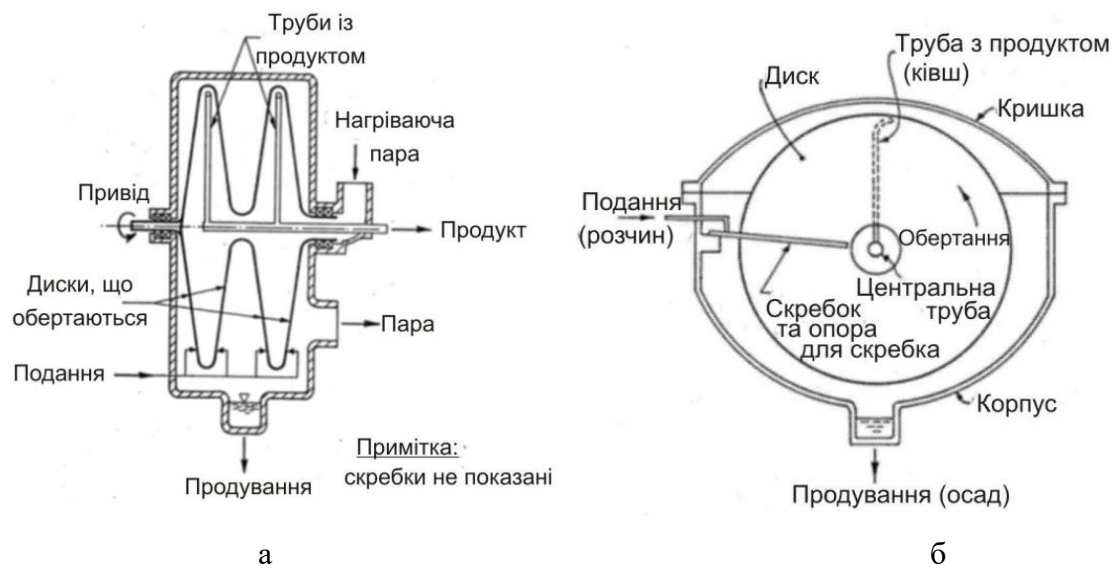


Рисунок 2.7 - Принципова схема відцентрового плівкового скребкового дистиллятора (а) і розріз його випарної секції (б)

Система стабільно працювала при температурі випаровування $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, плоскі диски були зроблені з міді товщиною 0,036 дюйма, коефіцієнт теплопередачі доходив до 60 кВт / м^2 при різниці температур від 0,1 до $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Вихідний розчин проходив через фільтр патронного типу, регенеративний теплообмінник, дегазатор і потім подавався у випарник. Частина рідини випаровувалася з вихідного розчину, а залишок відкачувався з нижньої частини камери в регенеративний теплообмінник для охолодження. Пара, що утворилася відводилася зовнішнім компресором, стискалася для підвищення тиску і температури насичення, а потім подавалася в порожнину для конденсації.

Недоліком запропонованого дистилятора (як і для VCD) є наявність компресора і присутність в системі циркуляційних насосів. Крім того, не передбачено відведення продукту (конденсату) в умовах невагомості. За технічними характеристиками дистилятор також поступався своїм конкурентам (див. порівняння нижче).

2.2.4 Термічні відцентрові дистилятори з термоелектричними тепловими насосами, розроблені в Київському політехнічному інституті

З 1974 по 1993 рік вчені та інженери КПІ за завданням російської фірми, яка бере участь у виготовленні обладнання для космічних місій, розробляли і тестували кілька типів відцентрових дистиляторів з термоелектричними тепловими насосами для умов функціонування в космосі. Серед них:

- термоелектричний відцентровий дистилятор, в якому теплообмінна обертова поверхня була також термоелектричним тепловим насосом;
- відцентровий багатоступінчастий дистилятор, який працює в комплексі зі стаціонарною термоелектричною батареєю.

2.3 Еволюція системи відцентрової дистиляції з термоелектричним тепловим насосом для космічних місій

Перший варіант вакуумного компресійного відцентрового дистилятора було виготовлено ще у 1962р. Він мав три ступені дистиляції, коротка інформація про його характеристики описана у [12-13].

Система каскадної дистиляції в спрощеному вигляді показана на рис. 2.8. Система складається з двох основних компонентів: багатоступінчастого вакуумного відцентрового дистилятора і термоелектричного теплового насоса. Робоча рідина подається в багатоступінчастий вакуумний відцентровий дистилятор, де відбувається випаровування і конденсація води. Кілька ступенів працюють паралельно, щоб забезпечити високу продуктивність. Енергія для процесу надходить від теплового насоса, в якому дистиляційна вода охолоджується, а вихідна робоча рідина нагрівається. Обидва потоки циркулюють, відповідно, через холодний і гарячий контури теплового насоса і повертаються в дистилятор. Температура в гарячому контурі 35... 45 °С і в холодному від 20 до 25 °С. Подача і видалення рідин контролюються клапанами з регульованим тиском і не вимагають цифрового контролера. Робоча рідина утримується в робочому баку і подається в гарячий контур через клапан з регульованим тиском. Система працює під вакуумом, і коли в процесі випаровування

об'єм гарячого контуру зменшується, то тиск в ньому зменшується, і в дистилятор засмоктується додаткова вихідна рідина. Продукт або конденсат подається в резервуар для продукту через клапан з регульованим тиском. Резервуар для продукту також підтримується під вакуумом. Коли об'єм холодного контуру збільшується, тиск збільшується і клапан відкривається для відведення дистиляту (продукту).

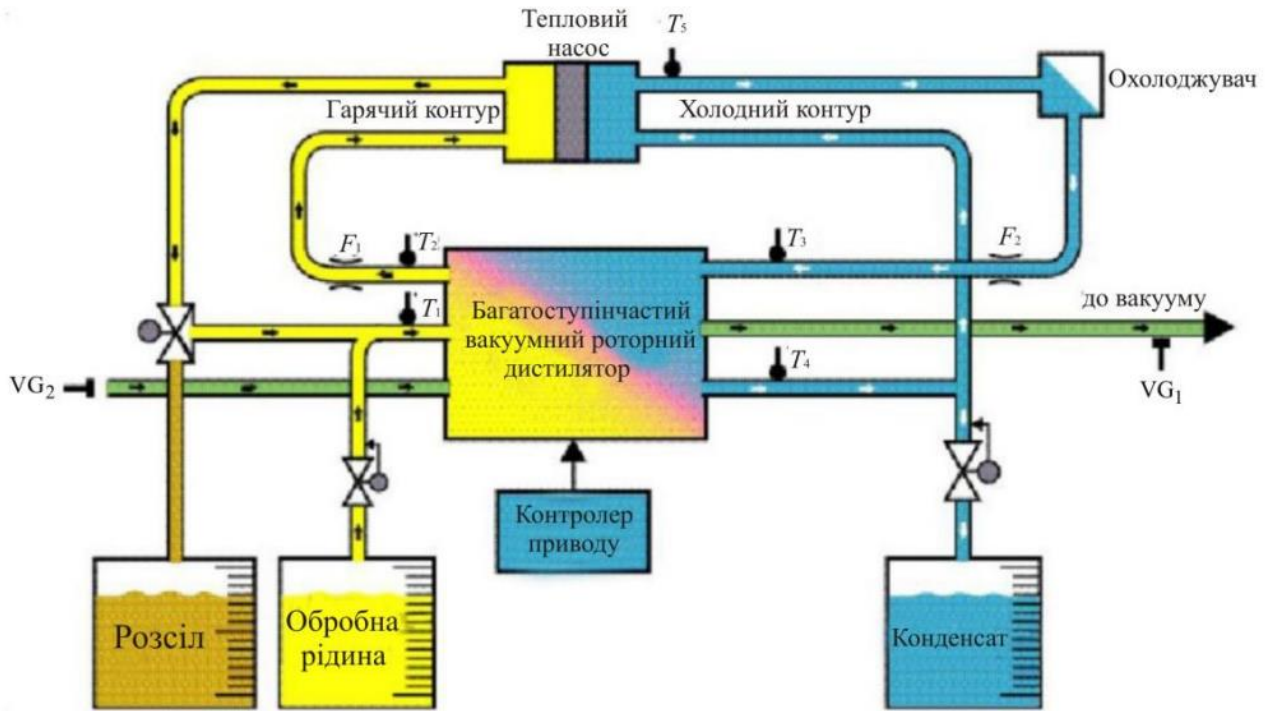


Рисунок 2.8 - Блок-схема системи каскадної дистиляції для порівняння

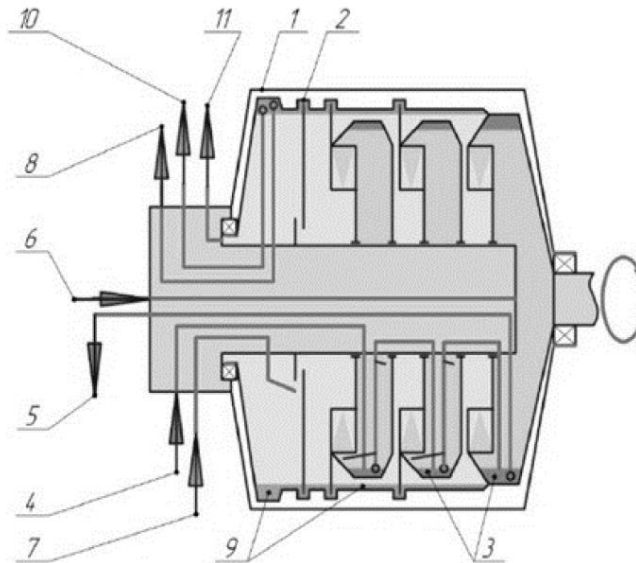
Процес триває до тих пір, поки гарячий контур не заповниться концентрованим розсолом і температура випаровування не підвищиться. У цей момент тепловий насос вимикається, і тиск відновлюється до атмосферного. Зазвичай це відбувається, коли більше 90% води витягується з вихідного розчину і збирається в резервуарі для продукту. Потім розсіл відкачується з системи в резервуар для розсолу, і дистилятор вимикається.

Було виготовлено два варіанти дистилятора: з трьома і з п'ятьма ступенями.

На рис. 2.9 показана схема триступеневого дистилятора. Аналогічну конструкцію має і п'ятиступеневий апарат, основною відмінністю якого є лише кількість ступенів.

Дистилятор має герметичний корпус 1, в якому встановлений на підшипниках ротор 2. Обертання ротора забезпечується приводом через герметичну магнітну муфту. Ротор розділений перегородками на ряд ступенів дистиляції і кінцевий конденсатор. Технологічний (вихідний) розчин 3 подається по каналу 4, де він розподіляється по ступенях дистиляції.

Розчин через канал 5 подається в нагрівач системи, з якого (в перегрітому стані) через канал 6 повертається в пристрій, де перегрів рідини знімається самозакипанням. Отримана пара використовується в якості гріючої в попередній ступені. Пара останньої ступені випаровування конденсується в кінцевому конденсаторі при контакті з дистилятом, охолодженим на холодній стороні теплового насосу та в додатковому теплообміннику. Охолоджений дистилят надходить в пристрій через канал 7, нагрівається і знову видаляється для охолодження вбудованим насосом через канал 8. Надлишок конденсату (дистилят, продукт) відводиться трубою Піто в резервуар для зберігання через канал 10. Вакуумування апарату здійснюється через канал 11.



- 1 - корпус; 2 - ротор; 3 - вихідний розчин; 4 - вхід вихідного розчину; 5 - відвідний канал; 6 - підвідний канал; 7 - вхід охолодженого конденсату; 8 - вихід підігрітого конденсату; 9 - конденсат; 10 - вихід дистиляту-продукту; 11 - відведення газів

Рисунок 2.9 - Схема відцентрового триступінчатого дистилятора:

Перевагами ВВД є:

- 1 Високі коефіцієнти теплопередачі (до $104 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) забезпечують невеликі різниці температур на ступенях дистилятора.
- 2 Здатність досягти ступеня вилучення води з розчину до 96% без відкладень на поверхні теплообміну.
- 3 Краще ніж у VCD якість дистиляту.
- 4 Відсутність зовнішніх насосів з окремими приводами.
- 5 Відсутність ущільнень з тертям по твердій поверхні.
- 6 Саморегулювання рівнів розчину і конденсату в порожнинах ротора дистилятора.

2.3.1 Порівняння характеристик розглянутих дистиляторів

В [17] проведено порівняння характеристик трьох технологій відцентрової дистиляції: парокompресійного дистилятора (VCD); відцентрового дистилятора з скребковим пристроєм Wiped-Film Rotating Disk (WFRD) і термічного відцентрового вакуумного дистилятора з термоелектричним тепловим насосом (CDS).

В якості робочих рідин використовували два розчину [18], кількість було вибрано з розрахунку для 30-денної місії. Перший розчин 1, складався з попередньо обробленої урини і попередньо обробленого конденсату вологи. Другий розчин 2 включав попередньо очищені гігієнічні стічні води (від душу, миття рук, чищення зубів і вологого гоління), а також попередньо оброблену урину і попередньо оброблений конденсат вологи. Сумарні характеристики за результатами випробувань наведені в таблиці 4. Для розчину 1 ступінь вилучення води для всіх систем становив 93,5%, а для розчину 2 – 90%.

Дані в таблиці 4 показують, що кожна технологія добре зарекомендувала себе при виробництві якісного дистиляту. В цілому CDS був трохи краще з точки зору якості дистиляту, хоча всі системи ефективно видаляли більше 99% неорганічних компонентів і 98% органічних компонентів. Ця ефективність зводить до мінімуму необхідність подальшої обробки для виробництва питної води.

Оцінка експертів результатів випробувань: система VCD буде успішною з ймовірністю 84% - 90% і ризиком 3%; система CDS буде успішною з ймовірністю 84% - 87% і ризиком 5%; система WFRD буде успішною з ймовірністю 52% - 61% і ризиком 7%.

Таблиця 2.1 - Результати випробування

Дистилятор	CDS		VCD		WFRD	
Розчин	1	2	1	2	1	2
Продуктивність (кг/год)	3.7	4.88	1.63	1.87	16.1	16.8
Питоме споживання енергії (Вт·час/кг)	109	110	188	163	85	86
Середня потужність (Вт)	375	485	279	296	1252	1293

1 – CDS: відцентровий вакуумний дистилятор з термоелектричним тепловим насосом (Україна);

2 – VCD: відцентровий вакуумний дистилятор з паровим компресором (США);

3 – WFRD: відцентровий дистилятор із скребковим пристроєм (США).

Дані для WFRD показали аномалію в тому, що концентрація забруднюючих речовин в дистилаті вище, ніж для CDS і VCD. Аналіз даних показує, що в WFRD потоки вихідної рідини і дистилату частково змішувалися під час роботи.

Продуктивність CDS приблизно в два рази більше ніж у VCD, а WFRD приблизно в 10 разів більше, ніж VCD. Отже, хоча підведена енергія для WFRD і CDS вище, питома енергія менше, ніж для VCD. Значення для VCD також представлені для випадку, коли вимкнені нагрівачі, які використовуються для запобігання конденсації в корпусі дистиллятора.

На основі зробленого огляду можна стверджувати, що проблема забезпечення астронавтів водою при тривалих польотах ще дуже далека від вирішення. Встановлена на МКС система дистиляції VCD непридатна з точки зору надійності і стабільності роботи. TIMES і WFRD мають конструкцію, непридатну для умов роботи в невагомості. Система CDS показує найкращі результати як з точки зору енергоефективності, так і за якістю одержуваного дистилату. Однак у неї ступінь вилучення води все ще недостатній.

Саме на збільшення надійності і ступеня вилучення води будуть спрямовані подальші дослідження для майбутніх систем регенерації стічних вод.

2.4 Тестування існуючих моделей систем каскадної дистиляції на стендах NASA

Національне управління з аеронавтики і дослідження космічного простору (NASA) Vision for Space Exploration (VSE) пропонує серію людських місій, кульмінацією яких є постійний форпост на Місяці та місії на марсіанську поверхню. Довготривалі місії L2, такі як ті, що пропонуються в VSE, вимагатимуть відновлення води зі стічних вод. Системи фізико-хімічної обробки; зокрема дистиляційні системи, виникли як технологія-кандидат для первинної обробки в системі рекуперації води із замкненим циклом. Підсистема каскадної дистиляції (CDS) є однією з трьох технологій дистиляції, що розробляються проектною офісом NASA Exploration Life Support (ELS). Зразок п'ятиступінчастого дистиллятора було розроблено в Україні в «TD» Со на замовлення Honeywell International Inc. Систему на базі термоелектричного теплового насоса назвали системою каскадної дистиляції. На початку 2000 року компанія Honeywell International (Торранс, Каліфорнія) спонсорувала та очолювала розробку каскадного дистиллятора (CD)-5, нової п'ятиступінчастої ротаційної вакуумної дистилляторної машини високої потужності. У 2003 році; Honeywell отримав фінансування через NASA в рамках програми швидкого розвитку технологій (RTDT). Метою RTDT є просування CDS як технології відновлення води-кандидата для підтримки довготривалих

космічних місій. Вона пройшла випробування по вилученню води з різних стічних вод систем життєзабезпечення для пілотованих космічних апаратів на стендах КПИ, Honeywell Co, в Центрі Маршалла (НАСА)[19].

Технологія каскадної дистиляції розроблялася протягом багатьох років. Проект пройшов кілька етапів, включаючи розробку вимог, тестування макетної системи, проектування та виготовлення прототипу, а також контрольне тестування в Honeywell. У березні 2007 р.; блок розробки був доставлений до Центру розробки передових систем рекуперації води (AWRSDF) Космічного центру Джонсона (JSC) НАСА для тестування продуктивності.

У 2009 році процесор очищення стічних вод каскадної дистиляційної підсистеми (CDS) (Honeywell International, Торранс, Каліфорнія) був оцінений[19] в порівняльному тесті Національного управління з аеронавтики і дослідження космічного простору (НАСА) для підтримки життя (ELS).

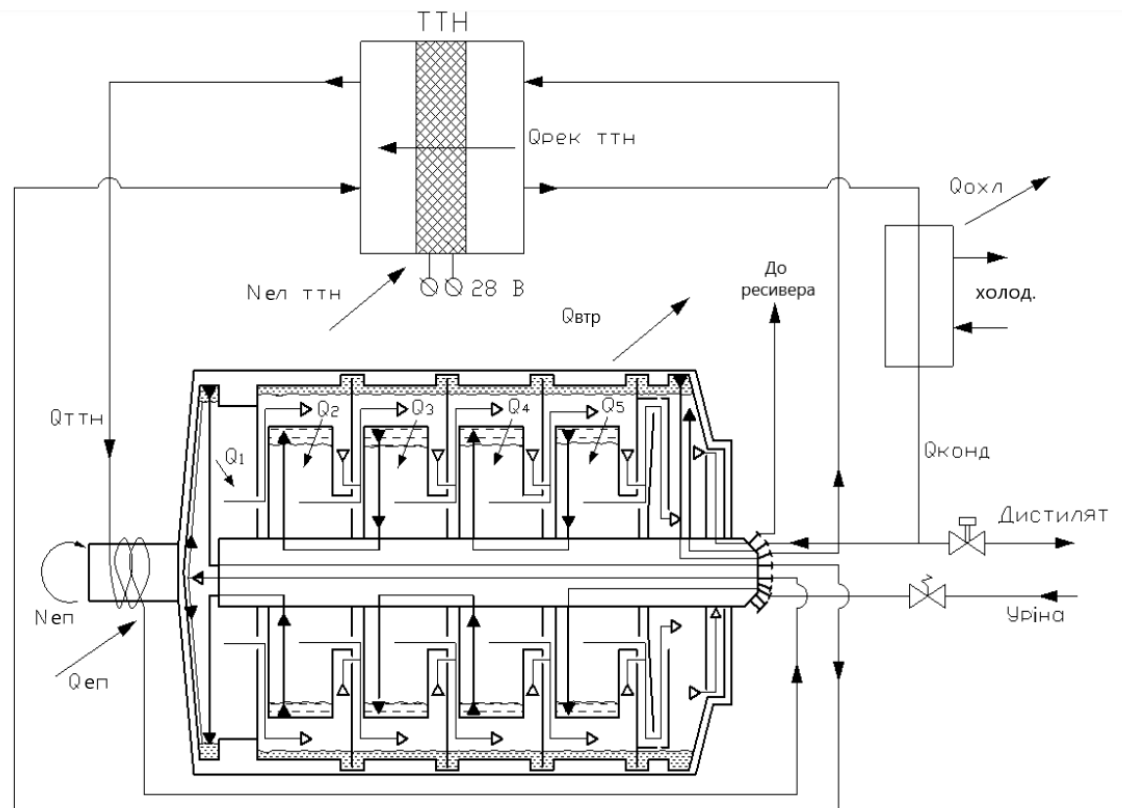


Рисунок 2.10 – Принципова схема багатоступінчастої дистиляції з тепловим насосом

Метою тесту був збір даних для підтримки нижнього відбору та розробки технології первинної перегонки для застосування в системі відновлення води на місячному посту. Частина порівняльного тесту CDS була проведена з 6 травня по 19 серпня 2009 року. Для системи було використано два попередньо оброблені тестові розчини, кожен з яких мав на меті представляти можливу стічні води, що утворюються в приземному середовищі існування. 30-денний еквівалент завантаження стічних вод для екіпажу з чотирьох осіб передбачалося обробити для кожного розчину стічних вод. Тестовий розчин 1 складався із змішаного потоку, що містив сечу, вироблену людиною, та вологий конденсат. Тестовий розчин 2 містив додавання гігієнічних стічних вод, створених людьми, до компонентів потоку відходів розчину 1. Під час тестування через CDS було перероблено приблизно 1500 кг стічних вод. Відповідні вилучення на розчин становили 93,4 т 0,7 і 90,3 т 0,5 відсотка. Середня питома енергія системи під час випробувань була розрахована менше ніж 120 Вт-год/кг. У документі [19] наведено дані тесту CDS із тесту порівняння дистиляції ELS.

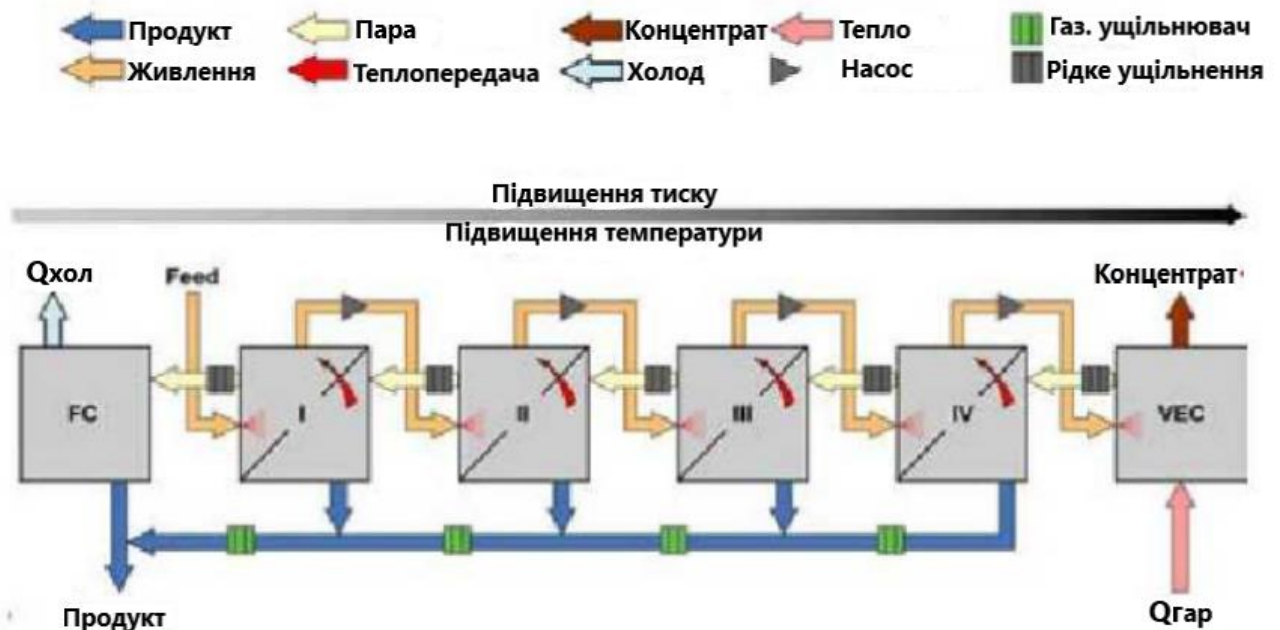


Рисунок 2.11 - Стаціонарна модель CDS

За інших рівних умов питомі витрати електричної енергії тим менші, чим менше різниця температур між гарячим контуром урини та контуром конденсату (збільшується опалювальний коефіцієнт термоелектричного теплового насоса та знижуються теплові втрати) і чим більша продуктивність по конденсату (знижується частка питомої витрати енергії двигуна).

У свою чергу різниця температур визначається, в основному, початковим вакуумуванням системи, кількістю виділених уріною неконденсованих газів, натіканням, тепломасообміном у парогазовому прикордонному шарі з боку випаровування та конденсації, теплопередачею через стінку теплообмінного пристрою та температурною депресією, що визначається зростанням концентрації солей в уріні при випаровуванні води. При високому вмісті газу різниця температур може бути дуже значною.

2.5 Висновки за розділом 2

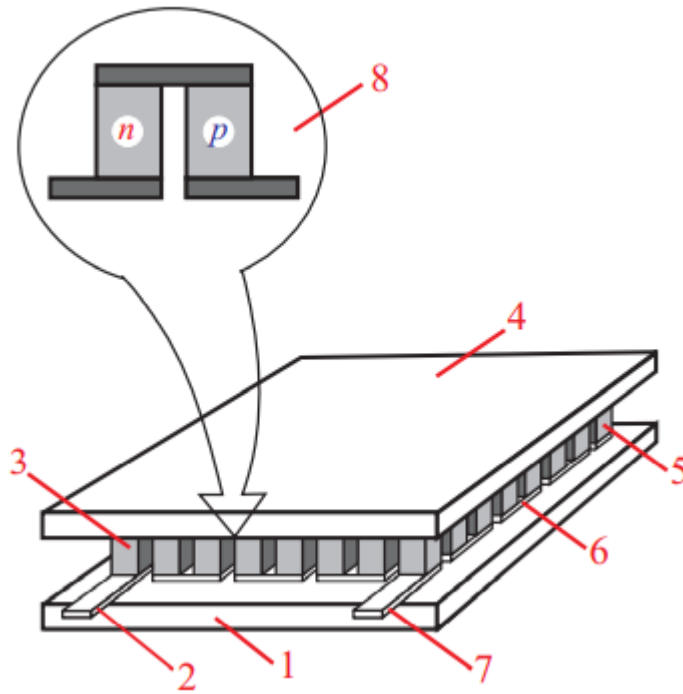
На основі зробленого огляду можна стверджувати, що проблема забезпечення астронавтів водою при тривалих польотах ще дуже далека від вирішення. Система вакуумної каскадної дистиляції показує найкращі результати як з точки зору енергоефективності, так і за якістю одержуваного дистиляту. Однак у неї ступінь вилучення води все ще недостатній. З 2019 року дана система перебуває встановлюється на МКС, але за відсутності незалежних експериментальних даних, головним завданням є продовження розробок та вдосконалення системи.

Саме на збільшення надійності і ступеня вилучення води будуть спрямовані подальші дослідження для майбутніх систем регенерації стічних вод.

З ВПЛИВ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСУ ALTEC-7005

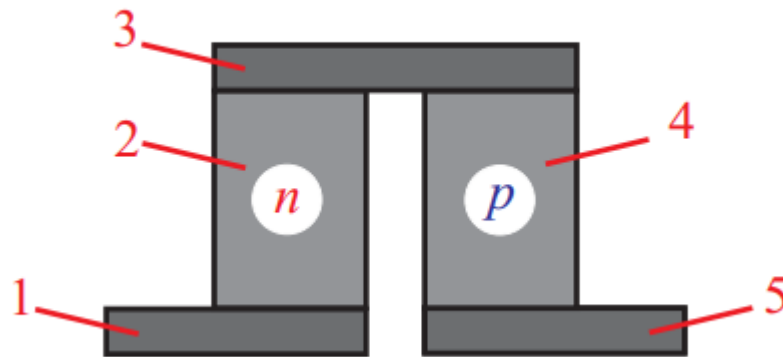
3.1 Опис експериментальної установки

Елементи Пельтьє (рис. 3.1) складаються з 127 послідовно з'єднаних напівпровідникових елементів *n*- і *p*-типу, що припаяні між двома обмідненими керамічними пластинами, з двома виводами («+» і «-»). Вся конструкція загерметизована силіконовим герметиком.



1,4 – керамічні пластини; 3,5 – гілки *n*- і *p*-типу провідності; 6 – комутаційна пластина; 2,7 – електричні виводи; 8 – термопарний елемент[6].

Рисунок 3.1 - Конструкція термоелемента Пельтьє

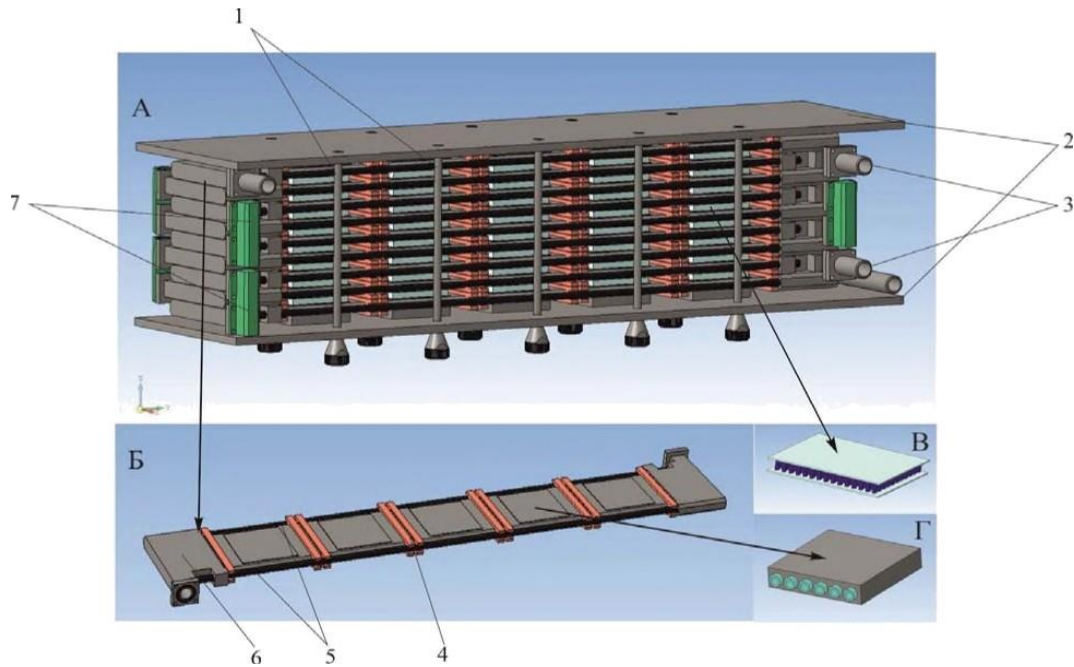


1,3,5 – металеві комутаційні пластини; 2 – гілка n-типу (електронної) провідності; 4 – гілка p-типу (діркової) провідності [6].

Рисунок 3.2 – Схема термопарного елемента



Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд термоелектричного модуля Пельтьє



А – зовнішній вигляд, Б – схема комутації одного ряду теплообмінників, В – термоелектричний модуль, Г – рідинний теплообмінник, 1 - вертикаль стяжки, 2 – деталі корпусу, 3 – штуцери, 4 – фіксатори з прокладками, 5 – горизонтальні стяжки, 6 – колектори, 7 - перехідники

Рисунок 3.4 - Конструкція ТТН рідина-рідина

Термоелементи (В) знаходяться між рядами теплового насосу (Б), що сформовані послідовно підключеними рідинними теплообмінниками (Г) (рис 3.3). Ряди закінчуються колекторами (6) для зміни напрямку руху теплоносія. Для кріплення використані горизонтальні стяжки та фіксатори з прокладками. Між собою ряди з'єднані вертикальними стяжками (1) та перехідниками (7). Таким чином, робота двох рядів термоелементів забезпечується одним рядом теплообмінників[16].

Два блоки, що гідравлічно з'єднані послідовно, складають ТТН. Кожен блок, зображений на рис. 2.5, містить 40 термоелементів, з різницею у їх електричному живленні.

Описаний термоелектричний тепловий насос ALTEC-7005 було створено в Інституті Термоелектрики НАН України [17].

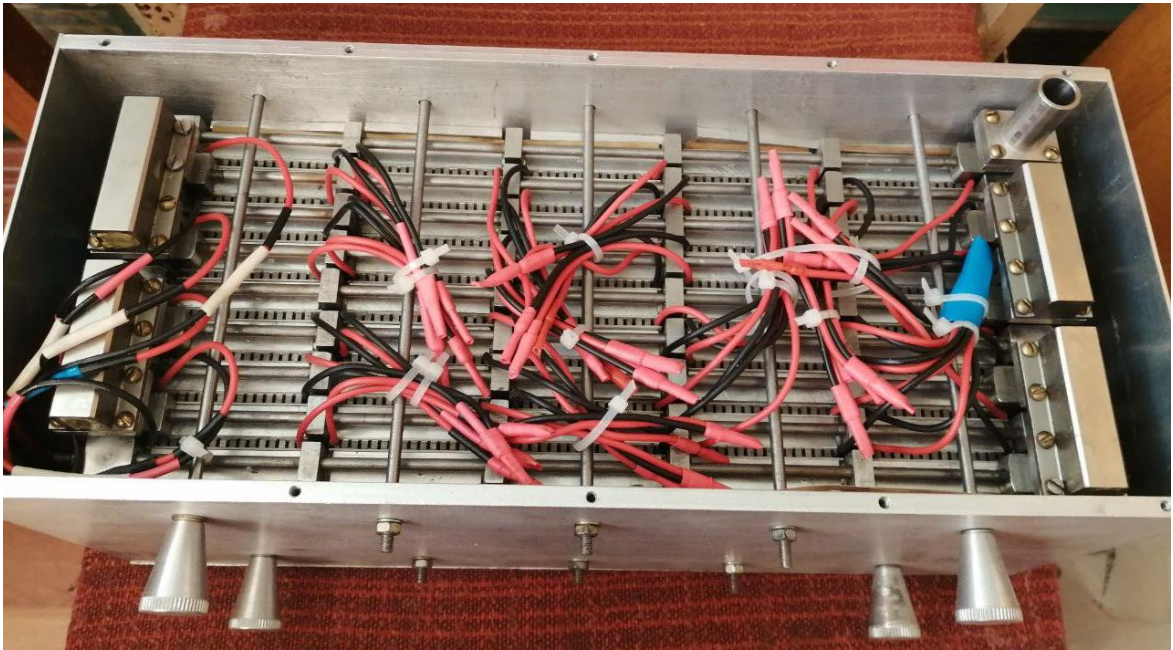


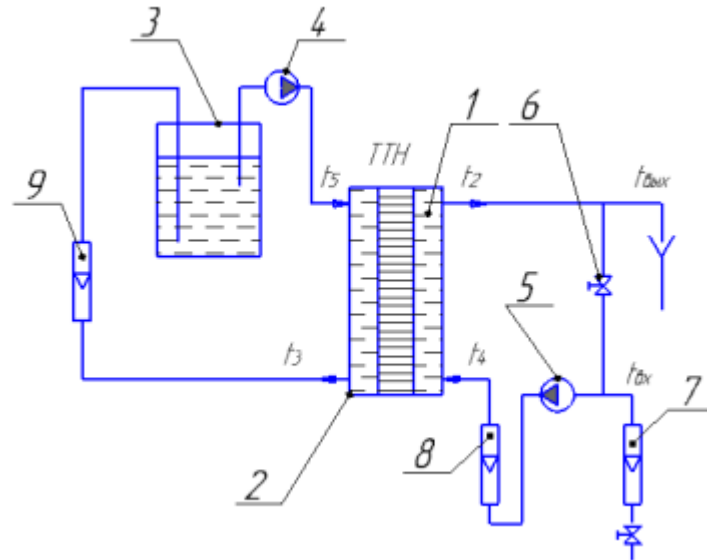
Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд блоку термоелектричного теплового насосу

Дослідження проведені на одному (схема на рис. 3.5) та на двох послідовно підключених ТТН (схема на рис. 3.6).

Під час проведення дослідження вимірювалися наступні величини:

- витрати води на гарячій та холодній сторонах ТТН;
- температура:
 - на вході в систему (з водопроводу) $t_{вх}$;
 - на виході із системи $t_{вих}$;
 - на вході/виході по гарячій стороні ТТН;
 - вході/виході по холодній стороні ТТН.

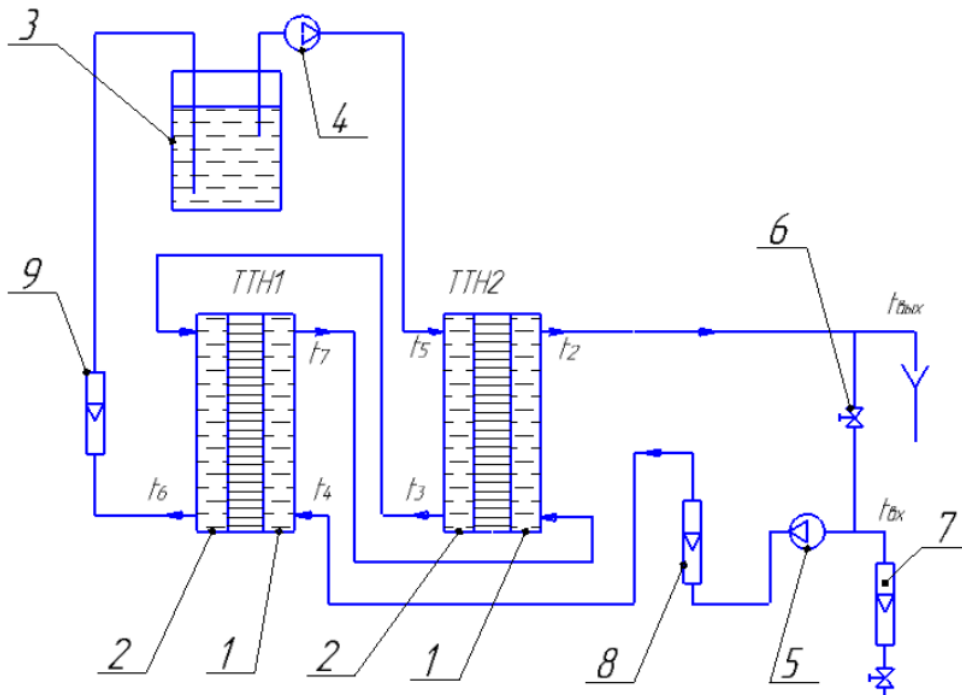
Вимірювання витрат проводилося за допомогою ротаметрів 7, 8, 9 типу РС-3, клас точності 2,5. Для вимірювання температури використовували хромель-капелеві термопари з точністю $\pm 0,1$ °C.



1 – гаряча сторона ТТН; 2 – холодна сторона ТТН; 3 – термостат; 4 – циркуляційний насос холодного контуру; 5 – циркуляційний насос гарячого контуру; 6 – регулюючий клапан; 7 – витратомір підживлювальної води; 8 – витратомір води в гарячому контурі; 9 – витратомір води в холодному контурі[18].

Рисунок 3.6 – Принципова схема установки для вимірювання режимних параметрів теплового насосу

Термостатом 3 підтримувалася температура води холодного контуру на вході. Регулювання температури на вході у гарячий контур здійснювалося через ротаметр 7 підмішуванням холодної водопровідної води. Циркуляційні насоси 4 та 5 плавно регулювали витрати рідини.



1 – гаряча сторона ТТН; 2 – холодна сторона ТТН; 3 – термостат; 4 – циркуляційний насос холодного контуру; 5 – циркуляційний насос гарячого контуру; 6 – регулюючий клапан; 7 – витратомір підживлювальної води; 8 – витратомір води в гарячому контурі; 9 – витратомір води в холодному контурі[18].

Рисунок 3.7 – Принципова схема установки для вимірювання режимних параметрів двох паралельно включених теплових насосів

Регулювання споживаної потужності ТТН відбувалася ступінчасто (трьома режимами): 77 Вт, 150 Вт і 350 Вт.

3.2 Методика визначення основних експериментальних величин

Один з основних параметрів при визначенні COP термобатареї є перепад температур між гарячою та холодною сторонами батареї. В даних розрахунках її визначили як середньоарифметичну гарячої та холодної сторони ТТН, °C

$$\Delta t = 0,5(t_2 + t_4) - 0,5(t_3 + t_5) \quad (3.1)$$

Тепловий потік, що отримує гарячий контур ТТН через термоелектричні модулі, знаходиться за формулою, Вт

$$Q_{\Gamma} = C \cdot G \cdot \Delta T_1, \quad (3.2)$$

де Q_{Γ} - теплопродуктивність, Вт;

C - теплоємність теплоносія, Дж/(кг · К);

G - витрата теплоносія, кг/с;

$\Delta T_1 = T_2 - T_1$ - різниця температур між входом і виходом в гарячий контур, К.

Тоді, опалювальний коефіцієнт знаходиться за формулою:

$$\mu = Q_{\Gamma}/W, \quad (3.3)$$

де W - електрична потужність живлення ТТН, Вт.

Тепловий баланс всередині ТТН контролюється також за допомогою аналогічних вимірювань холодопродуктивності ТТН в холодному контурі, Вт:

$$Q_X = C \cdot G \cdot \Delta T_2, \quad (3.4)$$

де Q_X - холодопродуктивність, Вт;

$\Delta T_2 = T_3 - T_4$ - різниця температур між виходом і входом в холодний контур, К.

Аналогічно опалювальному коефіцієнту використовують охолоджувальний коефіцієнт ТТН, що визначаємо за формулою:

$$\varepsilon = Q_X/W \quad (3.5)$$

3.3 Математичний аналіз впливу режимних параметрів на ефективність роботи ТТН

Результати дослідження стенду (рис. 3.6) з ТТН, відображені на графіку (рис. 3.8) показують, що з підвищенням електричного навантаження вплив перепаду температур Δt на теплову ефективність ТТН (COP) зменшується, при цьому падає і сам COP. Це можна пояснити зростанням додатково внутрішнього перепаду температур на термоелементах. З формули (1.12) видно, що вона пропорційна квадрату електричного струму, що протікає через термоелемент.

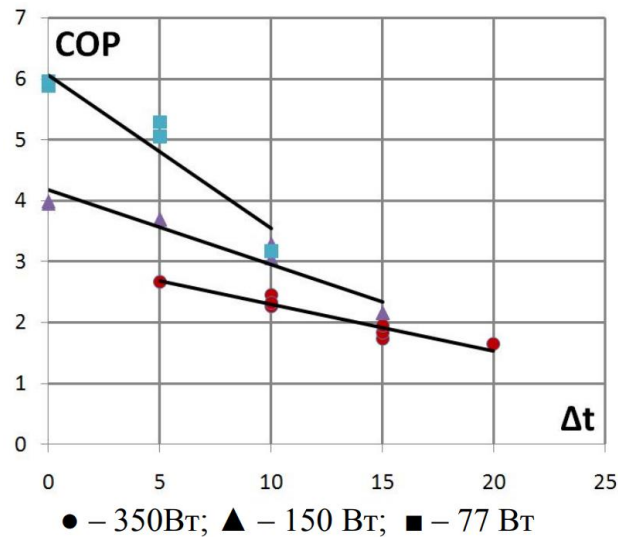


Рисунок 3.8 – Вплив різниці температур та електричної потужності ТТН на COP (витрата води в обох контурах 160 кг/год)

Графік на рисунку 3.9 показує зростання COP ТТН під впливом збільшення витрати, а отже і швидкості води у холодному та гарячому контурах термоелектричного теплового насоса. Це пояснюється зниженням термічного опору теплопередачі між теплоносіями контурів теплового насоса та термоелементами. Це призводить до зменшення перепаду температур між холодною та гарячою сторонами термоелементів.

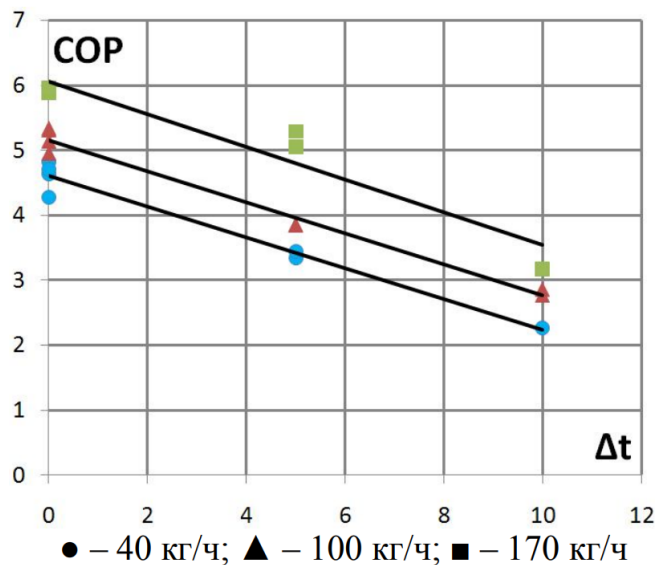


Рисунок 3.9 – Вплив витрати води в контурах та різниці температур на COP ТТН (потужність ТТН 77 Вт)

Стенд, що відповідає схемі на рисунку 3.7 не дає якісно нових результатів, але кількісно за однакової загальної електричної потужності, два послідовно включених термоелектричних теплових насоса мають вищий COP, ніж одна термобатарея (рис. 3.10 та 3.11).

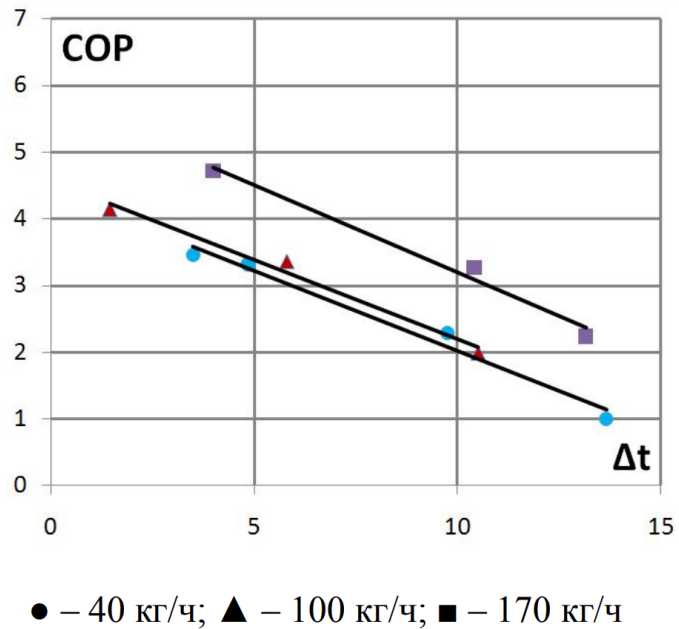


Рисунок 3.10 – Вплив витрати води в контурах та різниці температур на COP ТТН (потужність ТТН 2·77 Вт)

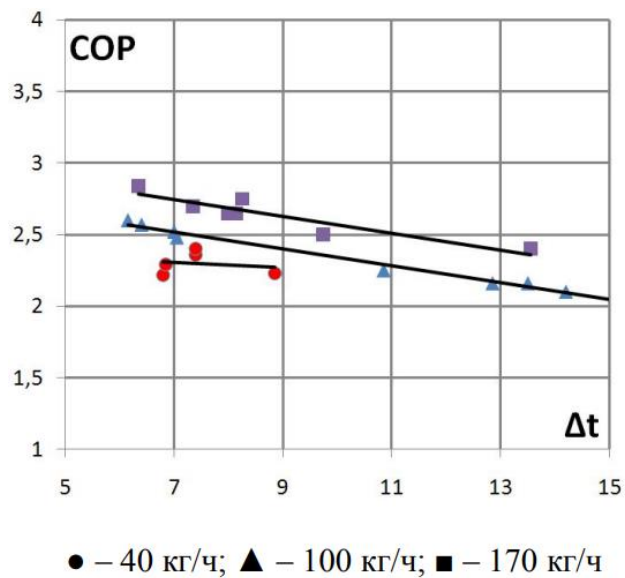


Рисунок 3.11 – Вплив витрати води в контурах та різниці температур на COP ТТН (потужність ТТН 2·150 Вт)

3.4 Висновки за розділом 3

Експериментально було встановлено, що:

- з підвищенням електричного навантаження вплив перепаду температур Δt на теплову ефективність ТТН (COP) зменшується, при цьому падає і самCOP;
- COP ТТН зростає під впливом збільшення витрати, а отже і швидкості води у холодному та гарячому контурах термоелектричного теплового насоса;
- система з двома послідовно підключеними ТТН не дає якісно нових результатів, але кількісно за однакової загальної електричної потужності, вони мають вищий COP, ніж одна термобатарея.

Отримані в розділі 3 дані можуть бути використані для створення математичної моделі системи дистиляції води з ТТН та ЦВС та проектування системи регенерації води на задану продуктивність з прогнозованою питомою витратою енергії.

4 ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КІЛЬКОСТІ СТУПЕНІВ ДЛЯ СИСТЕМИ ДИСТИЛЯЦІЇ З ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ

(Публікація у науковому журналі «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» Том 33 (72) № 2 2022)

В найближчі роки такі компанії як НАСА, SpaceX, Боїнг, планують довготривалі місії людей на Місяць та Марс. Далекі пілотовані космічні місії не можуть бути реалізовані без використання спеціальних систем регенерації води з різноманітних стічних вод життєдіяльності членів екіпажу [24]. Розробка надійних і ефективних систем регенерації води для пілотованих космічних об'єктів дозволяє істотно знизити витрати на забезпечення космонавтів водою.

Відсутність на пілотованих космічних об'єктах гравітації суттєво ускладнює реалізацію багатьох традиційних для земних умов технологічних процесів, в тому числі процесів дистиляції. З цієї точки зору створення штучної гравітації за рахунок використання відцентрових сил (відцентрові дистилятори) є перспективним напрямком розробки ефективних систем життєзабезпечення для пілотованих космічних місій [25]. Системи, які базуються на цьому способі, можуть забезпечити регенерацію води з усіх відомих рідких продуктів життєдіяльності космонавтів (сеча, санітарно-гігієнічна вода, конденсат атмосферної вологи) із забезпеченням високої якості отриманого дистиляту.

4.1 Аналіз останніх досліджень і публікацій

Технологія відцентрової дистиляції з паровим компресором (VCD) із невисокою швидкістю обертання (до 180 об/хв.) з 2008 року використовується американцями для регенерації води на МКС і є основною в програмі NASA [26-27]. Незважаючи на великий прогрес в розробці і дослідженні VCD в США ця технологія має деякі суттєві недоліки. До них відносяться значний ріст витрати енергії (до 100%) при збільшенні концентрації рідини, що випаровується, невелика продуктивність системи (менше 3 л/год очищеної води), завелика питома вага пристрою (більше 50кг на 1л очищеної води), неможливість функціонування системи при ушкодженні парового компресора, необхідність встановлення допоміжних насосів для забезпечення подачі в систему і циркуляції в ній робочих рідин. В результаті було зроблено висновок про неможливість використання VCD для далеких космічних місій до Місяця та Марсу [28].

Розроблений в КПІ ім. Ігоря Сікорського багатоступеневий відцентровий дистилятор дозволяє отримати близько 7 л/год очищеної води, що дає змогу переробити усі відходи життєдіяльності на борту пілотованого космічного апарата з командою до 7 осіб. Використання термоелектричного теплового насосу в якості джерела теплоти суттєво знижує питоме електроспоживання системи. В результаті питома витрата енергії на виробництво чистої води менше 100 Вт·год/л і на цей показник практично не впливає ступінь концентрування вихідної рідини [29-31]. Для циркуляції рідин не потрібні допоміжні насоси – переміщення рідин в системі, а також відведення продукту (дистиляту) і концентрату відбувається за рахунок використання відцентрових сил.

На сьогоднішній день виготовлено одноступеневий (продуктивність до 1,5 кг/год) [29], триступеневий (до 3,5 кг/год) [30] та п'ятиступеневий (до 7 л/год) [31] дистилятори. Всі вони здатні ефективно переробляти рідкі відходи життєдіяльності людини, що показано в численних експериментальних роботах.

На основі раніше отриманих експериментальних даних прийняте рішення визначити оптимальну кількість ступенів для відцентрового дистилятора з точки зору мінімальної витрати енергії на процес дистиляції. Розрахунок виконано для випадку дистиляції розчину NaCl.

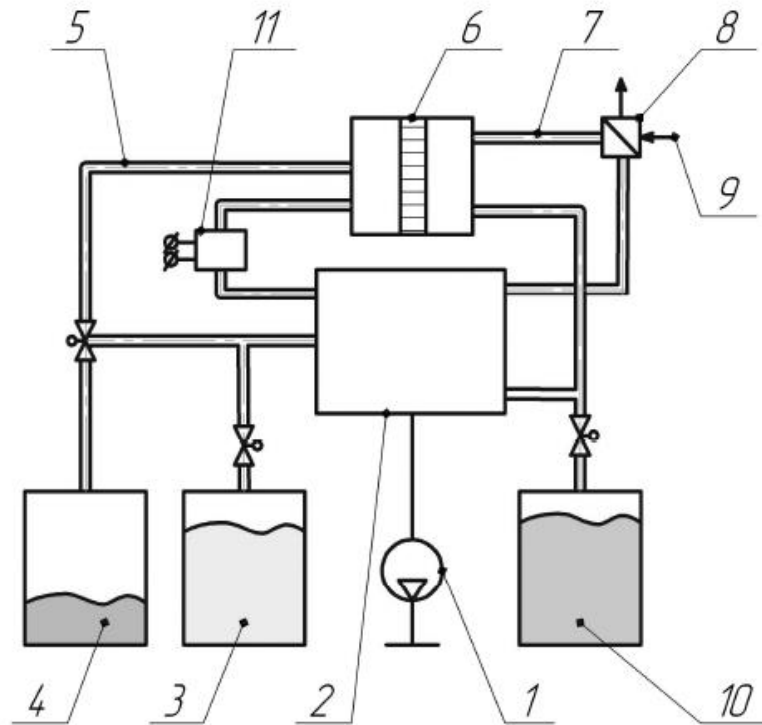
4.2 Опис установки

Система регенерації води, розроблена в «КПІ ім. Ігоря Сікорського» з використанням відцентрового вакуумного дистилятора (ВВД) в поєднанні з термоелектричним тепловим насосом (ТТН) представлена на рис. 4.1. У системі використовується багатоступінчастий відцентровий дистилятор (частота обертів 600÷1200 об/хв).

Зниження енерговитрат для дистиляції стічних вод в умовах невагомості у системі багатоступінчастої дистиляції з термоелектричним тепловим насосом, розроблений в «КПІ ім. Ігоря Сікорського», базується на двох принципах: багатоступінчастому випаровуванні та термоелектричному тепловому насосі (БВВД + ТТН). Ключовим апаратом системи є БВВД (рис. 4.1). Вбудовані черпакові насоси та теплообмінні поверхні у формі дисків, що обертаються, дистилятора забезпечують циркуляцію розчину і дистиляту через ТТН.

Робочий розчин надходить з ємності 3 у вакуумований ротор, що обертається, за допомогою вакуум-насоса 1, заповнює до необхідного рівня ступені випаровування відцентрового дистилятора 2, гарячий контур 5 і гарячу сторону термоелектричної батареї 6. Холодна сторона термоелектричної батареї з'єднується з кінцевим конденсатором дистилятора

за допомогою контуру 7 («холодний» контур). Відведення надлишкового тепла із системи здійснюється за допомогою холодильника 8. Дистилат-продукт, як результат випарно-конденсаційного процесу, відкачується в ємність 10, а концентрат – в ємність 4. При виході з ладу ТТН, система зможе працювати зі зниженою ефективністю при підігріві рідини гарячому контуру за допомогою підігрівача 11. Дистилатор виконаний багатоступінчастим з поверхнями теплопередачі, що обертаються. Вони розділяють розчин і конденсат. Ряд вбудованих насосів (на основі трубок Піто) забезпечує зрошення теплообмінних поверхонь у кожному ступені дистилатора. Стічні води послідовно проходять через кожну з ступенів випаровування.



1 – вакуум-насос; 2 – дистилатор; 3 – ємність вихідної рідини; 4 – ємність концентрату;
 5 – «гарячий» контур; 6 термоелектричний дистилатор тепла; 7 – «холодний» контур;
 8 – балансує охолоджувач; 9 – подача охолоджуючої рідини; 10 – збірник продукту-
 дистилату; 11 – резервний підігрівач

Рисунок 4.1 - Принципова схема системи вилучення води з рідких відходів ВВД

Кінцевий ступінь випаровування є ступенем миттєвого закипання перегрітого розчину, який перегрівається на гарячій стороні ТТН. Отримана в цьому ступені пара є гріючою у попередньому ступені дистилатора. Дистилат з кожного ступеня та пара ступеня випаровування з найнижчим тиском надходять у кінцевий конденсатор, що охолоджується

дистилятом, який циркулює по контуру: кінцевий конденсатор – холодна сторона ТТН – кінцевий конденсатор.

Надлишковий дистилят відкачується з апарата трубкою Піто. Після досягнення в гарячому контурі максимальної (розрахункової) концентрації залишку, що не випарувався, його витісняють із зовнішньої частини гарячого контуру в окремий резервуар свіжим розчином, і система може почати новий цикл.

Відцентрові сили, що виникають при обертанні ротора дистилятора, забезпечують транспортування всіх рідин у системі та роботу дистилятора при зниженій гравітації без застосування зовнішніх насосів.

4.3 Розрахункові формули та обчислення

Оптимальне число ступенів багатоступінчастого відцентрового дистилятора для роботи в комплексі з ТТН на борту пілотованого космічного апарата можна отримати наступним чином.

Ефективність роботи теплового насосу:

$$COP_{ТТН} = \frac{Q_1}{N_{ТТН}}, \quad (4.1)$$

де: Q_1 – потік теплоти, що підведений в першу ступінь дистилятора;

$N_{ТТН}$ – електрична потужність ТТН, Вт.

Питома витрата енергії в системі багатоступінчастого відцентрового дистилятора, в комплексі з ТТН визначається формулою, кг/Дж

$$\eta = \frac{G_d}{N_{ТТН} + N_D}, \quad (4.2)$$

де N_D – електрична потужність приводу дистилятора, Вт

G_d – продуктивність дистилятора по дистиляту, л/год

Продуктивність дистилятора визначається по формулі, л/год:

$$G_d = \frac{\sum Q}{r} = \frac{n \cdot Q_1}{r} = \frac{N_{ТТН} \cdot COP_{ТТН} \cdot n}{r}, \quad (4.3)$$

де n – число ступенів;

r – середня теплота фазового переходу води в ступенях випаровування багатоступінчастого дистилятора.

Таким чином (без врахування N_D) можна записати, кг/Дж :

$$\eta = \frac{N_{TTH} \cdot COP_{TTH} \cdot n}{(N_{TTH} + N_D) r} \approx \frac{COP_{TTH} \cdot n}{r}, \quad (4.4)$$

З цієї формули видно, що вигідно збільшувати кількість ступенів n . Проте збільшення кількості ступенів в дистиляторі веде до росту сумарного температурного перепаду в ньому, К:

$$\Delta t = t_{ex} - t_{вих}$$

де t_{ex} – температура розчину на вході в дистилятор, °С;

$t_{вих}$ – температура розчину на виході з дистилятору, °С.

В свою чергу зростання загального температурного перепаду призводить до зниження коефіцієнта ефективності ТТН (див рис.4.2). Тобто повинна бути оптимальна кількість ступенів для максимальної ефективності роботи відцентрового дистилятору.

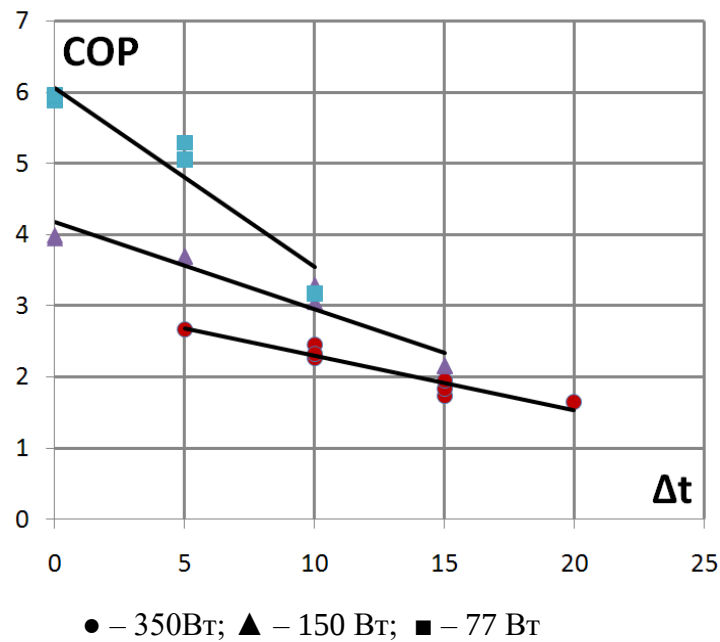


Рисунок 4.2 – Вплив різниці температур та електричної потужності ТТН на COP
(витрата води в обох контурах 160 кг/год) [32]

Таким чином, для розрахунку ефективності потрібно знати загальний перепад температур в апараті в залежності від кількості ступенів.

Визначення температурного перепаду у відцентровому дистиляторі

Очевидно, що загальний температурний перепад у відцентровому дистиляторі є сумою температурних перепадів на кожній ступені:

$$\Delta t = \sum \Delta t_i = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_i \quad (4.5)$$

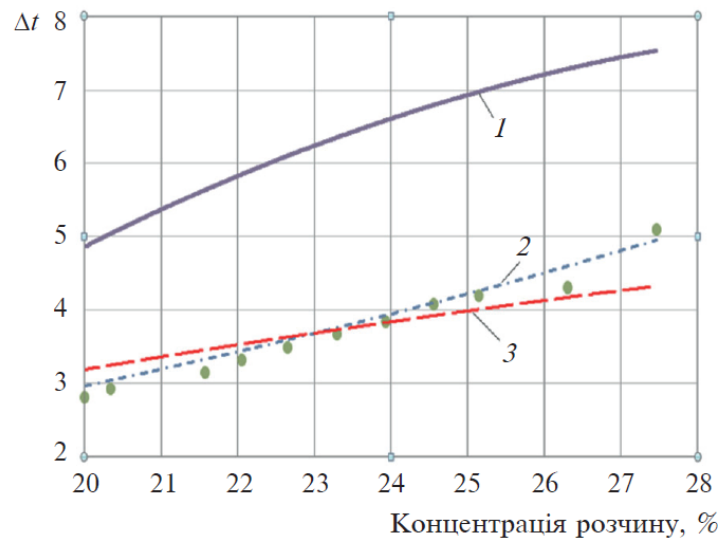
Перепад температури в одній ступені з урахуванням фізико-хімічної температурної депресії можна записати як:

$$\Delta t_i = (Q_i / KF) + \Delta t_{depr}, \quad (4.6)$$

де: Q_i / KF – температурний перепад на теплообмінній поверхні, за експериментальними даними $\approx 0,2$ °C [28];

Δt_{depr} – фізико-хімічна температурна депресія, °C.

Фізико-хімічну температурну депресію було визначено експериментально в роботі [29, 33], див. рис. 4.3.



1 – фізико-хімічна температурна депресія за атмосферного тиску; 2, 3 – фізико-хімічна температурна депресія за температури 40 °C, розрахована по [34] і [35]; • – експеримент.

Рисунок 4.3 - Вплив концентрації розчину NaCl на фізико-хімічну температурну депресію

Розрахунок оптимальної кількості ступенів

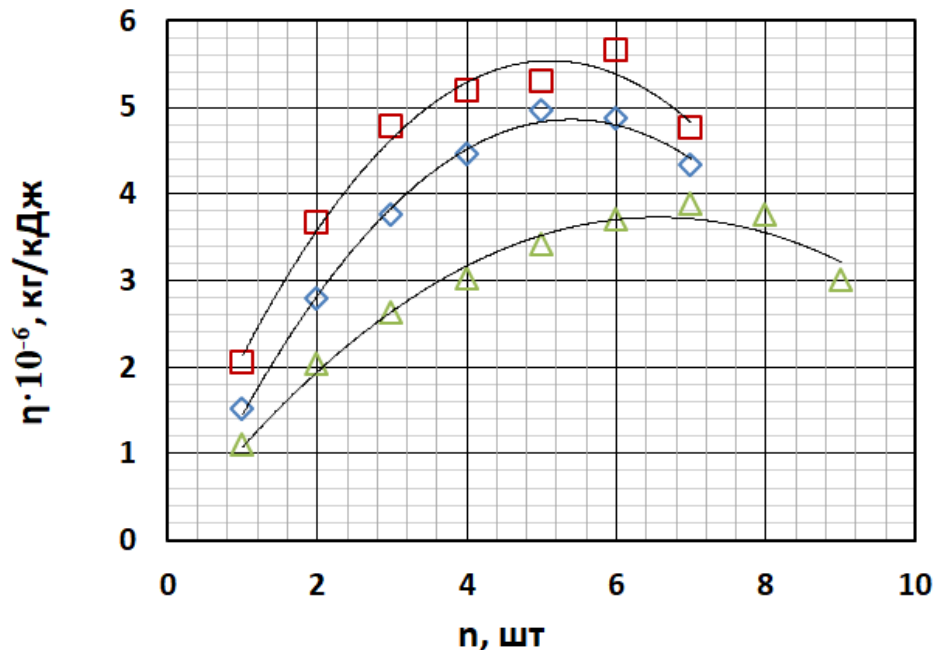
Крім розглянутої вище різниці температур в багатоступеневому дистиляторі існують і інші фактори, які впливають на його ефективність: теплові втрати та перетоки теплоти; витрати теплоти на догрівання свіжого розчину до температури насичення в ступені випаровування, в яку він подається; догрівання розчину, який перетікає з ступені з меншим тиском до ступені з більшим тиском та ін. Це призводить до зменшення кількості теплоти, яка

іде на випаровування розчину при переході від ступені з більшим тиском до ступені з меншим тиском. З експериментальних даних [33] можна орієнтовно прийняти, що

$$Q_i = 0,95^{i-1} \cdot Q_1 \quad (4.7)$$

де Q_i – витрати теплоти на випаровування в i -тій ступені.

Враховуючи наведені припущення, за допомогою формул 4.1-4.6 було побудовано розрахункову модель та визначено ефективність дистилятора при його роботі на розчині NaCl для трьох різних потужностей теплового насосу (див. рис.4). Було прийнято, що дистилятор працює в стаціонарному режимі, концентрація розчину в останній ступені випаровування для всіх випадків дорівнює 27%, а свіжий розчин мав початкову концентрацію 3%



Потужність теплового насосу: ▲ – 350Вт; ◆ – 150 Вт; ■ – 77 Вт

Рисунок 4.4 Ефективність роботи дистилятора в залежності від кількості ступенів

Як видно з рис. 4.4 оптимум по ефективності роботи дистиляційної системи залежить від потужності теплового насосу. Чим менша потужність теплового насосу, тим більш ефективно працює дистилятор, тобто менші затрати енергії на виробництво дистиляту. При цьому для потужності 77 Вт і 150 Вт максимум ефективності система досягає коли дистилятор має 5 ступенів. Для потужності 350 Вт цей максимум знаходиться, коли дистилятор має 7 ступенів. Це відбувається з тієї причини, що, як видно з рис. 2, чим менша потужність ТТН, тим більш суттєвим є вплив різниці температур на його COP. Для потужності 350 Вт залежність

$COP = f(\Delta t)$ має найбільш пологі характеристику, в результаті зростання загальної різниці температур внаслідок збільшення кількості ступенів не так сильно погіршує ефективність систем. Тому для цього випадку оптимальна кількість ступенів більше, ніж для меншої потужності ТТН.

4.4 Висновки за розділом 4

В класичній багатоступеневій системі дистиляції (випарній системі) додавання кожного наступного ступеня підвищує ефективність установки. В результаті вибір оптимальної кількості ступенів здійснюється на основі техніко-економічного розрахунку.

Для системи дистиляції, в якій в якості джерела теплоти використовується термоелектричний тепловий насос ситуація кардинально змінюється. Як і для будь-якого теплового насосу, COP ТТН в першу чергу залежить від загального температурного перепаду між гарячою і холодною сторонами. Додавання кожної наступної ступені призводить до зростання цього температурного перепаду Δt . Проведений аналіз дозволив оцінити оптимальну кількість ступенів для системи багатоступінчастої дистиляції в комплексі з ТТН. При продуктивності системи по дистиляту $G_d = 3 \dots 5$ л/год оптимальне число становить 5 ступенів. За необхідності збільшення продуктивності до $G_d = 7$ л/год необхідно збільшити потужність ТТН і оптимальна кількість зростає до 7 ступенів.

Необхідно відмітити, що аналіз був проведений з деякими спрощеннями, зокрема не враховувалася необхідна потужність на привод ротора дистилятора. Зі збільшенням числа ступенів в дистиляторі збільшується кількість занурених у рідину черпакових насосів, отже, збільшується і потужність на привод дистилятора. В наступних роботах планується доповнити систему рівнянь, щоб при визначенні ефективності системи врахувати затрачену роботу на привод дистилятора.

ВИСНОВКИ

В даній магістерській дисертації було виконано огляд існуючих розробок, описано принцип їх роботи, переваги та недоліки цих технологій.

Було наведено основні теоретичні відомості про явище термоелектрики, його використання на прикладі термоелектричних теплових насосів, описано їх принцип дії та застосування. Розглянуто конструкцію відцентрового вакуумного дистилятора на базі термоелектричного теплового насосу, методику розрахунку та особливості використання у системах життєзабезпечення пілотованих космічних місій. Розглянуто та описано термоелектричну батарею, наведено її габаритні характеристики, споживану електричну потужність, розрахунковий коефіцієнт ефективності, методику розрахунку основних робочих характеристик.

Виконано серію експериментів для визначення впливу режимних параметрів роботи термоелектричного теплового насоса ALTEC-7005 на його ефективність. Дослідження проведені на одному та на двох послідовно підключених ТТН. На основі експерименту та розрахунків основних експериментальних величин побудовано графіки впливу різниці температур та електричної потужності ТТН на COP та впливу витрати води в контурах та різниці температур на COP ТТН. Встановлено що з підвищенням електричного навантаження вплив перепаду температур Δt на теплову ефективність ТТН (COP) зменшується, при цьому падає і самCOP. Також виявлено, що, хоч два послідовно підключені ТТН не дають якісно нового результату, кількісно за однакової загальної електричної потужності вони мають вищий COP, ніж одна термобатарея.

На основі отриманих експериментальних даних аналітично визначено оптимальну кількість ступенів для відцентрового дистилятора з точки зору мінімальної витрати енергії на процес дистиляції. Розрахунок виконано для випадку дистиляції розчину NaCl. Було розглянуто фактори які впливають на ефективність багатоступеневого дистилятора, такі як: різниця температур, теплові втрати та перетоки теплоти; витрати теплоти на догрівання свіжого розчину до температури насичення в ступені випаровування, в яку він подається; догрівання розчину, який перетікає з ступені з меншим тиском до ступені з більшим тиском та ін

Було побудовано розрахункову модель та визначено ефективність дистилятора при його роботі на розчині NaCl для трьох різних потужностей теплового насосу.

Було виявлено, що додавання кожної наступної ступені призводить до зростання температурного перепаду Δt . Встановлено, що при продуктивності системи по дистиляту $G_d = 3 \dots 5$ л/год оптимальне число становить 5 ступенів. За необхідності збільшення продуктивності до $G_d = 7$ л/год необхідно збільшити потужність ТТН і оптимальна кількість зростає до 7 ступенів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Анатычук Л.И. Термоэлектрический тепловой насос как средство повышения эффективности очистки воды при космических полетах/ Л.И. Анатычук, П.А Барабаш, В.Г Риферт и др. // Термоэлектричество. – 2013. - №6. – С. 78-83
2. Патент на корисну модель 66389 Україна, МПК 2011.01. Одяг для захисту від перегрівання / Мороз Л.В.; опубл. 26.12.11, Бюл. № 24.
3. Patent CN 203633537 U.– Fan type cooling human body air conditioning clothes / Tian Weiguo.- Pub. Date: June, 11, 2014.
4. Ріферт В.Г. Еволюція системи відцентрової дистиляції з термоелектричним тепловим насосом для космічних місій. Частина 1. Огляд публікацій по відцентровій дистиляції в період 1990 – 2017 рр./ В.Г Ріферт, Л.І Анатичук, П.О Барабаш та ін. // Термоелектрика - 2019 - №1. ISSN 1726-7714
5. Анатичук Л.І., Зеєбек чи Вольта? / Л.І. Анатичук //Термоелектрика №1 — 1994. — С. 9–10.
6. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т2./ Л.И. Анатычук// К.: Букрек, 2003. - 386 с.
7. Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлемент / А.Ф. Иоффе // М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1960. – 158 с.
8. Анатичук Л.І. Термоелементи і термоелектричні пристрої: довідник / Л.І. Анатичук - К.: Наукова думка, 1979. – 764 с.
9. Каганов М.А. Термоэлектрические тепловые насосы/ М.А. Каганов, М.Р. Привин - Л.: «Энергия». Ленинградское отделение, 1970 г. – 175 с.
10. Риферт В.Г. Разработка и испытание каскадного центробежного дистиллятора для регенерации воды из мочи/ В.Г. Риферт, В.И. Усенко, И.В. Золотухин и др. // Промышленная теплотехника. Международный научно-прикладной журнал. Национальная академия Наук Украины, - 2001. - №23. - С. 4-5.
11. Романов С.Ю. Вредные примеси в атмосфере обитаемых космических станций/ С.Ю. Романов, Л.Н. Мухамедиева, А.С. Гузенберг и др. // Известия РАН. Энергетика. - 2006. - № 1. - С. 31-49.
12. Бобе Л.С. Космические системы жизнеобеспечения: регенерация воды на космических станциях / Л.С. Бобе, А.А. Кочетков, Н.М. Самсонов и др.// Инженерная экология. - 2013. - № 2(110). - С. 34–50.

13. Samsonov, N.M. Development of Urine Processor Distillation / N.M. Samsonov, , L.S. Bobe, V.N. Novikov et al., // Hardware for Space Stations, the 25th International Conference on Environmental Systems, San Diego, July 1995. SAE Paper 951605. 868 pages.
14. Dehner G. F. TIMES Regenerator Redesign Description/ Timothy D. Scull// Hamilton Standard Space Systems International, Inc. Addendum development of a preprototype times wastewater recovery subsystem. Prepared under contract no. nas 9-15471, 1984. 17 pages.
15. Catherine Thibaud-Erkey A New Membrane for the Thermoelectric Integrated Membrane Evaporative Subsystem (TIMES)/ Catherine Thibaud-Erkey and James H. Fort and others // Water Recovery Technology. SAE Technical Paper - 2000. - 2000-01-2385 – 13 pages.
16. L. Carter, J. Williamson Status of ISS Water Management and Recovery/ L. Carter, J. Williamson, C. A. Brown, J. Bazley, D. Gazda, R. Schaezler, F. Thomas, S. Molina.// 49th International Conference on Environmental Systems. - Boston, Massachusetts. ICES – 2019. - №36. – 17 pages.
17. Jeff McQuillan Distillation Technology Downselection for the Exploration Life Support (ELS) Water Recovery Systems Element/ Jeff McQuillan, K.D. Pickering, M. Anderson, L. Carter, M. Flynn, and others//The 40th International Conference on Environmental Systems, AIAA 2010-6125. 12 pages.
18. Lubman A., Cascade Distillation Subsystem Hardware Development for Verification Testing/ A. Lubman, A. MacKnight, V.G. Rifert, and P.O. Barabash, //SAE International, 2007-01-3177, July 2007. 14 pages.
19. Callahan, M.R. Cascade Distillation Subsystem Development : Early Results from the Exploration Life Support Distillation Technology Comparison Test / M.R. Callahan, , V. Patel, and K.D. Pickering// 40th International Conference on Environmental Systems, AIAA 2010-6149, 2010. 12 pages.
20. Samsonov, N.M. Updated systems for water recovery from humidity condensate and urine for the International space station/ N.M. Samsonov, , L.S. Bobe, , V. Novikov et al., //SAE Paper 972559, the 27th International Conference on Environmental Systems, Nevada, July 1997. 12 pages.
21. Риферт В.Г. Еволюція системи відцентрової дистиляції з термоелектричним тепловим насосом для космічних місій. Частина 2. Дослідження змінних характеристик системи багатоступінчастої дистиляції (СМЕД) з термоелектричним тепловим насосом (ТТН)/

- В.Г. Риферт, Л.І. Анатичук, П.О. Барабаш та ін. // Термоелектрика. – 2019. - №2. – С. 5 - 21
22. Анатичук Л.І., Експериментальне дослідження термоелектричного теплового насоса рідина-рідина/ Л.І. Анатичук, А.В. Прибила, Ю.Ю. Розвер // Термоелектрика. – 2017. - №3. – 96 с.
23. Анатичук Л.І. Оптимізація теплової комутації в термоелектричних теплових насосах рідина-рідина для приладів очищення води космічного призначення. / Л.І. Анатичук, А.В. Прибила// Термоелектрика. – 2015. - №4. – С. 45 - 52
24. Jones H. W. Should Oxygen, Hydrogen, and Water on the Moon Be Provided by Earth Supply, Life Support Recycling, or Regolith Mining? / H.W. Jones //50th International Conference on Environmental Systems, 12-15 July 2021. ICES-2021-147. 12 pages
25. Барабаш П.А. Центробежные дистилляторы в системах жизнеобеспечения пилотируемых космических объектов /П.А. Барабаш А.С. Соломаха, В.І. Усенко и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – № 5(149). – С. 28-35.
26. Wieland P. Final Report on Life Testing of the Vapor Compression Distillation/Urine / P. Wieland, C. Hutchens, D. Long, B. Salyer// Processing Assembly (VCD/UPA) at the Marshall Space Flight Center (1993 to 1997). August 1998. 77 pages.
27. Carter L, Status of ISS Water Management and Recovery/ L. Carter, J. Williamson, C.A. Brown, J. Bazley, D. Gazda, R. Schaezler, F. Thomas, S. Molina.// 49th International Conference on Environmental Systems, 7-11 July 2019, Boston, Massachusetts. ICES 2019-36. 17 pages.
28. Kelsey L.K. Closing the Water Loop for Exploration/ L. K. Kelsey, S.P. Boyce, G. Speight, P. Pasadilla, P. Tewes, E. Rabel, C. Meyer.: 2020-2021 Status of the Brine Processor Assembly. 50th International Conference on Environmental Systems, 12-15 July 2021. ICES-2021-428. 11 pages.
29. Solomakha A.S., Centrifugal flash distiller for life support system/ A.S. Solomakha V.G. Rifert, P.A. Barabash, V. Petrenko, M. Yaroshevych// 72st International Astronautical Congress (IAC), Dubai, United Arab Emirates, 25-29 October 2021. IAC-20- A1,IP,6,x66795. 7 pages.
30. Rifert V.G., Improvement the cascade distillation system for long-term space flights/ V.G. Rifert, P.A. Barabash, V. Usenko, A.S. Solomakha, L.I. Anatychuk, A.V. Prybyla.// 68th

International Astronautical Congress (IAC), Adelaide, Australia, 25-29 September 2017. IAC-17-A1.IP.25. 8 pages.

31. Ріферт В.Г. Порівняльний аналіз методів термічної дистиляції з тепловими насосами для тривалих космічних польотів/ В.Г. Ріферт, Л.І. Анатичук, П.О. Барабаш, А.С. та ін. // Термоелектрика. – 2019. – № 4. – С. 5 – 18.
32. Барабаш П.А. Влияние режимных параметров на эффективность работы термоэлектрического теплового насоса ALTEC-7005// П.А. Барабаш, А.С. Соломаха, В.И. Усенко и др. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2018. – № 4. – С. 29-33.
33. Барабаш П.А. Кристалізація розчину NaCl у вакуумному відцентровому плівковому дистиляторі/ П.А. Барабаш, А.С. Соломаха, В.Г. Ріферт та ін. // Наукові вісті КПІ. – 2019. – № 4. – С. 77-82.
34. Никольский Б.П. Справочник химика. 2 изд. / Б.Н. Никольский. Москва, Химия, 1986. – 1168 с.
35. Чернобыльский И.И. Машины и аппараты химических производств, 3 изд./ И.И. Чернобыльский .Москва, Машиностроение, 1974. – 491 с.

ДОДАТОК А
СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ Ярошевич Марини Віталіївни
 (прізвище, ім'я, по-батькові студента)

№ з/п	Найменування праць	Рукописні або друк	Назва видавництва, журналу (номер, рік) або номер авторського свідоцтва, номер диплома на винахід	Кількість друкованих аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів праць
1	2	3	4	5	6
1	Тепловізійний моніторинг як метод визначення теплових втрат у будівлях	Друк	Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, м. Київ, 24–27 квітня 2018 р. У 2 т. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – Т. 1. – 260 с. ISBN 978-966-622-887-4 (Т.1)	1 стор.	Соломаха А. С
2	Зменшення витрат теплоти через світлопрозорі конструкції будівель	Друк	Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів, м. Київ, 23–26 квітня 2019 р. У 2 т. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – Т. 1. – 313 с. ISBN 978-966-622-938-3(Т.1)	1 стор.	Боженко М.Ф.
3	Паризька угода: пріоритетні технології для впровадження в Україні	Друк	Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів, м. Київ, 21–24 квітня 2020 р.	6 стор.	Голіяд М.Н.

1	2	3	4	5	6
4	Визначення оптимальної кількості ступенів для системи дистиляції з термоелектричним тепловим насосом	Друк	Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» Том 33 (72) № 2 2022. – С. 154- 160	6 стор.	Соломаха А.С., Барабаш П.О.
5	Centrifugal flash distiller for life support system	Друк	72 st International Astronautical Congress (IAC), Dubai, United Arab Emirates, 25-29 October 2021.	7 стор.	Andrii S. Solomakha, Vladimir G. Rifert, Petr A. Barabash, Valerii Petrenko

Авторка

Марина ЯРОШЕВИЧ

ДОДАТОК Г

ПЕРЕВІРКА МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ НА АКАДЕМІЧНИЙ ПЛАГІАТ



Ім'я користувача:
Боженко Михайло Федорович

ID перевірки:
1011488607

Дата перевірки:
07.06.2022 14:12:15 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
07.06.2022 14:13:15 EEST

ID користувача:
100005082

Назва документа: Magistr_Yaroshevich

Кількість сторінок: 55 Кількість слів: 11045 Кількість символів: 83644 Розмір файлу: 2.37 MB ID файлу: 1011365353

3.04% Схожість

Найбільша схожість: 1.35% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1000456102)

1.86% Джерела з Інтернету

11

Сторінка 57

2.68% Джерела з Бібліотеки

10

Сторінка 57

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

0.08% Вилучень

Деякі джерела вилучено автоматично (фільтри вилучення: кількість знайдених слів є меншою за 10 слів та 0%)

0.08% Вилучення з Інтернету

17

Сторінка 58

0.01% Вилученого тексту з Бібліотеки

86

Сторінка 58

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

67