

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

Теплоенергетичний факультет

Кафедра теоретичної і промислової теплотехніки

«На правах рукопису»

УДК 628.16

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Геннадій ВАРЛАМОВ
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2020 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 144 «Теплоенергетика»

на тему: Вдосконалення та підвищення ефективності відцентрових плівкових випарників

Виконав: студент II курсу, групи ТП – 81 мн

_____ Стринада Петро Сергійович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник _____ проф., д. т. н. Володимир РИФЕРТ _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з мат. моделювання _____ к.т.н., доц. Андрій СОЛОМАХА. _____

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент _____

(підпис)

Київ – 2020 року

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

Факультет Теплоенергетичний

Кафедра Теоретичної і промислової теплотехніки

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

Спеціальність 144 «Теплоенергетика»,

ОНП «Промислова та муніципальна теплоенергетика і енергозбереження»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

_____ Геннадій ВАРЛАМОВ
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Стринаді Петру Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Вдосконалення та підвищення ефективності відцентрових плівкових випарників,

науковий керівник дисертації Риферт Володимир Густавович, д.т.н, проф.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації 15.05.2020 р.

3. Об'єкт дослідження Відцентрові плівкові випарники для космічних систем життєзабезпечення

4. Предмет дослідження Аналіз процесу теплообміну в плівкових випарниках, а саме: процесу конденсації, процесу випаровування при ламінарному і турбулентному режимах течії рідини

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Проаналізувати сучасний стан випарних систем на базі відцентрових випарників та шляхи підвищення їх енергоефективності; проаналізувати існуючі методи розрахунку теплопередачі; проаналізувати та вдосконалити розрахунок коефіцієнта тепловіддачі на конічній обертовій поверхні

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Принципові схеми випарних установок. Графіки порівняння роботи відцентрових випарних установок в залежності від їх конструкції продуктивності, енергоефективності.

7. Орієнтовний перелік публікацій Стаття у журналі «Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського»

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
мат. моделювання	Андрій СОЛОМАХА, доцент		

9. Дата видачі завдання 10.03.20 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Літературний огляд	20.03.20 р.	
2.	Аналіз принципової схеми, конструкції багатоступінчастий відцентровий вакуумний дистилятор	11.04.20 р.	
3.	Дослідження відцентрового вакуумного дистилятора в штатних режимах роботи	17.04.20 р.	
4.	Аналіз особливостей гідродинаміки й теплообміну при конденсації і паротворенні в плівці рідини на поверхні, що обертається	24.04.20 р.	
5.	Дослідження та аналіз процесу випаровування плівки на конічній обертовій поверхні	03.05.20 р.	
6.	Оформлення та подання дисертації	15.05.20 р.	

Студент

_____ (підпис)

Петро СТРИНАДА
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

Володимир РИФЕРТ
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація на тему «Вдосконалення та підвищення ефективності відцентрових плівкових випарників»: 76 с., 26 рис., 6 табл., 4 додатки, 26 джерела.

Об'єкт дослідження – передача теплоти при плівковому випаровуванні на обертовій поверхні.

Мета роботи – підвищення енергоефективності випарних апаратів з обертовою поверхнею теплообміну шляхом вдосконалення існуючих методів теплових розрахунків.

Наведені результати літературного пошуку сучасного стану випарних систем на базі відцентрових випарників та шляхів підвищення їх енергоефективності в світі та в Україні. Проведено аналіз всіх перспективних космічних систем життєзабезпечення.

Наведено тепловий розрахунок та результати експериментальних досліджень перспективного багатоступінчастого відцентрового вакуумного дистилятора.

Проведений аналіз процесу випаровування плівки на обертовій поверхні, за результатами якого запропоновані теоретичні розрахункові залежності для покращення розрахунку теплообміну.

Ключові слова: випарник, дистиляція, теплообмін, плівка, конденсація, випаровування, теплопередача, тепловіддача, теплообмін, термоелектрична батарея, обертова поверхня.

ANOTATION

Magistersky thesis on the theme "Direction and efficiency of the center of education": 76 pp., 26 Fig., 6 Tab., 4 completions, 26 sources.

Object's location - the transfer of heat in case of water vaporization to an overturned surface.

Meta robots - energy efficiency of evaporators with a wrapped surface heat exchange with a hat and a thorough method of thermal heating.

Indicated the results of literary education of the current camp of secondary systems on the basis of centralized and secondary education and energy efficiency in Ukraine and Ukraine. An analysis of all promising space-based life-saving systems was carried out.

The thermal rozrahunok and the results of the experimental results of a promising bag access and frequent vacuum center distiller.

Conducting an analysis of the process of vaporizing water on an overturned surface, for the results of a theoretically determined rozrahunkovy deposits for shrinking rozrahunku heat exchange.

Key words: viparnik, distillation, heat exchange, heating, condensation, viparovuvannya, heat transfer, heat transfer, heat exchange, thermoelectric battery, wrapped surface.

АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация на тему «Совершенствование и повышение эффективности центробежных пленочных испарителей»: 76 с., Рис., Табл., 4 приложения, 26 источника.

Объект исследования - передача теплоты при пленочном испарении на вращающейся поверхности.

Цель работы - повышение энергоэффективности испарительных аппаратов с вращающейся поверхностью теплообмена путем совершенствования существующих методов тепловых расчетов.

Приведенные результаты литературного поиска современного состояния испарительных систем на базе центробежных испарителей и путей повышения их энергоэффективности в мире и в Украине. Проведен анализ всех перспективных космических систем жизнеобеспечения.

Приведены тепловой расчет и результаты экспериментальных исследований перспективного многоступенчатого центробежного вакуумного дистиллятора.

Проведенный анализ процесса испарения пленки на вращающейся поверхности, по результатам которого предложены теоретические расчетные зависимости для улучшения расчета теплообмена.

Ключевые слова: испаритель, дистилляция, теплообмен, пленка, конденсация, испарение, теплопередача, теплоотдача, теплообмен, термоэлектрическая батарея, вращающаяся поверхность.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, скорочень, термінів.....	8
Вступ.....	10
1 Літературний огляд	12
1.1 Огляд розробок відцентрових дистиляторів для життєзабезпечення космічних станцій	12
1.2 Термоелектричний дистилятор	12
1.3 Пароежекторний дистилятор.....	18
1.4 Масообмінний роздільник-дистилятор	20
1.5 Парокомпресійний дистилятор	21
1.6 Багатоступінчастий відцентровий дистилятор	22
1.7 Висновки за розділом 1.....	22
2 Багатоступінчастий відцентровий вакуумний дистилятор.....	23
2.1 Принципова схема, конструкція і робота п'ятиступінчастого відцентрового вакуумного дистилятора.....	23
2.2 Термоелектрична батарея	28
2.3 Гідравлічна схема п'ятиступінчастого відцентрового вакуумного дистилятора і його робота	31
2.4 Вимірювальні засоби	33
2.5 Висновки за розділом 2.....	34
3 Результати дослідження відцентрового вакуумного дистилятора в штатних режимах роботи	35
3.1 Дослідження роботи дистилятора на воді.....	35
3.2 Дослідження роботи дистилятора на водному розчині солі NaCl.....	38
3.3 Дослідження роботи дистилятора на урині.....	42
3.4 Висновки за розділом 3.....	47
4 Аналіз особливостей гідродинаміки й теплообміну при конденсації і паротворенні в влівці рідини на поверхні, що обертається.....	48
4.1 Гідродинаміка плівки рідини на обертовій поверхні	48
4.2 Геометрія теплообмінної поверхні	50
4.3 Тепловіддача при конденсації пари на обертовій поверхні.....	51
4.4 Тепловіддача при конденсації пари на плівці рідини.....	53
4.5 Тепловіддача при паротворенні в плівці рідини на обертовій поверхні.....	53

4.6	Адіабатний випар рідини.....	56
4.7	Середній коефіцієнт теплопередачі в ступенях.....	57
4.8	Висновки за розділом 4.....	58
5	Аналіз процесу випаровування плівки на конічній обертовій поверхні.....	60
5.1	Висновки за розділом 5.....	65
	Висновки.....	67
	Список використаної літератури.....	69
	Додаток А	
	Технічне завдання.....	72
	Додаток Б	
	Акт впровадження.....	74
	Додаток В	
	Список наукових праць.....	75
	Додаток Г	
	Звіт перевірки на антиплагіат.....	76

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

Умовні позначення:

C - солеміст; теплоємність;

F – площа;

G - масова швидкість, масова витрата;

I - електричний струм;

K – коефіцієнт теплопередачі;

M – маса;

N – електрична потужність;

n – частота обертів;

P, p - тиск;

Q – тепловий потік;

q – густина теплового потоку;

r - теплота паротворення;

R – радіус;

T, t - температура;

U – електрична напруга;

V – об'єм;

w - швидкість середовища;

α – коефіцієнт тепловіддачі;

δ - товщина плівки;

Δ - різниця;

λ - теплопровідність;

μ - динамічний коефіцієнт в'язкості;

ν - кінематичний коефіцієнт в'язкості;

ρ - густина;

τ – час;

φ – ефективність термобатареї, питома витрата енергії;

σ – коефіцієнт поверхневого натягу.

Скорочення:

$ТЕБ$ – термоелектрична батарея;

REC – ступінь вилучення води з розчину;

VCD – відцентровий вакуумний дистилятор;

ВД – відцентрові дистилятори.

Індекси:

f – потік;

сс – технологічний конденсат;

d, д – дистилят, дистилятор;

in – вхід;

out – вихід;

p – постійний тиск;

г – гарячий;

х – холодний.

Числа подібності:

$$Nu_d = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda_{ж}}, \quad Nu_{пл.} = \frac{\alpha}{\lambda_{ж}} \left(\frac{v^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} - \text{числа Нуссельта};$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} - \text{число Прандля};$$

$$Re_{пл.} = \frac{q \cdot Z}{r \cdot \mu} - \text{число Рейнольса}.$$

ВСТУП

Одним із важливіших компонентів життєзабезпечення екіпажу космічної станції або корабля є проблема чистої води. В зв'язку із тим, що для тривалих експедицій практично неможливо забезпечити доставку необхідної для нормального функціонування людей кількості чистої води, актуальним є регенерація води із рідких відходів життєдіяльності людей – урини, поту, господарських вод тощо.

Головними вимогами до технології очищення води в умовах космічного польоту є надійність, мінімальні габарити, вага, витрати енергії на процес і спроможність пристрою функціонувати при відсутності гравітації.

Технології очищення рідких відходів, які намагаються використовувати в передових країнах-виробниках обладнання для систем життєзабезпечення (США, Росія, Японія), базуються на двох принципах: мембранна технологія (зворотний осмос) і дистиляція. Зворотний осмос може використовуватись лише для демінералізації малоконцентрованих розчинів (наприклад, санітарногігієнічної води). Використання мембран для демінералізації урини пов'язано з іншою проблемою – коротким терміном їх використання (не більше трьох місяців). Тому застосування технології з фазовим переходом, тобто дистиляції для систем життєзабезпечення, є найбільш перспективним методом одержання чистої води із вод з любым рівнем мінералізації і забруднення.

Для реалізації на практиці в системі життєзабезпечення космічного пілотованого апарата багатоступеневого відцентрового дистилятора з термоелектричною батареєю необхідно провести комплекс конструкторських робіт і наукових досліджень з метою обґрунтування особливостей конструкції дистилятора для забезпечення вищевказаних вимог до таких пристроїв.

Це, в свою чергу, робить необхідним наявність точних знань по гідродинаміці і теплообміну в специфічних умовах роботи відцентрового дистилятора, тобто при плівковому режимі випарування рідини і конденсації пари на плоских обертових поверхнях в умовах переважної дії відцентрових сил.

Використання відцентрової плівкової дистиляції в умовах космічного польоту було запропоновано і досліджувалось в роботі Nuble L. із співавторами [1] а також Ріфертом В. Г., Барабашом П. А. і Голіядом Н. Н. [2]. Якщо на гарячу поверхню, що обертається, подати тонку плівку рідини (товщиною менше 0,5 мм), або на холодну поверхню, що обертається, подати пару, яку буде конденсуватись, то інтенсивність теплообмінних процесів буде в 5-10 разів вища в порівнянні із стіканням плівки рідини, що випаровується, або плівки конденсату під дією сил тяжіння. В результаті, різниця температур поміж гріючим теплоносієм (парою) і

теплоносієм, що нагрівається (уриною), стає значно меншою. Цей фактор є вельми привабливим для використання в теплотехнічних пристроях, які дають змогу зменшити витрату енергії, таких як парові компресори, багатоступеневі дистилятори і термоелектричні батареї.

Технологія відцентрової дистиляції з невисокою швидкістю обертання (до 180 об/хв.), що має місце в парових компресорах, використовується американськими вченими в конструкції VCD і є основною в програмі NASA. Не зважаючи на великий прогрес в розробці і дослідженні VCD в США ця технологія має деякі недоліки, втім суттєві для космічної техніки. До них відносяться значний ріст витрати енергії (на 100 %) при збільшенні концентрації рідини, що випаровується, невелика продуктивність пристрою (менше 3 л/год очищеної води), завелика питома вага пристрою (більше 50 кг на 1 л очищеної води), неможливість функціонування системи при ушкодженні парового компресора, необхідність наявності допоміжних насосів для забезпечення подачі в систему і циркуляції в ній робочих рідин.

В розробці В. Ріферта та ін. використовується принцип багатоступеневої дистиляції на поверхнях, що обертаються із швидкістю 1000-1200 об/хв., в комплексі з термоелектричним тепловим насосом. За цією технологією питома витрата енергії на виробництво чистої води менше 100 Вт.год/л і на цей показник практично не впливає ступінь концентрування вихідної рідини. Для циркуляції рідин не потрібні допоміжні насоси – переміщення рідин в системі, а також злив продукту (дистиляту) і концентрату відбувається за рахунок використання відцентрових сил. Багатоступеневий відцентровий дистилятор дозволяє отримати близько 7 л/год очищеної води, що дає змогу переробити усі відходи життєдіяльності на борту пілотованого космічного апарата з екіпажем 5-7 людей.

Однією із головних проблем, пов'язаних із реалізацією технології відцентрової вакуумної дистиляції з тепловим насосом, є обґрунтування оптимальної конструкції дистилятора – кількість ступенів, температура робочих рідин, рівень тиску (вакууму) в системі, швидкість обертання та розміри теплообмінних поверхонь, а також дослідження динамічних і екстремальних характеристик системи.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Огляд розробок відцентрових дистиляторів для життєзабезпечення космічних станцій

Відцентрова вакуумна дистиляція (ВВД) визнана найбільш перспективною технологією регенерації високомінералізованих вод (у тому числі урини) для пілотованих космічних систем. Переваги ВВД у порівнянні з іншими технологіями - повітряно-випарною системою, термоелектричною мембранною випарною системою - наступні:

- можливість високого концентрування рідини (до 92 - 95%) без погіршення якості вище норми одержуваного продукту й зниження продуктивності дистилятора;
- менші витрати на підготовку оброблюваної рідини й доочищення продукту до потрібних параметрів;
- можливість використання відцентрової сили для циркуляції й відкачування рідких потоків при помірній швидкості обертання ротора дистилятора.

Починаючи з 1974 р. у Київському політехнічному інституті (КПІ) проводяться розробки різних типів відцентрових дистиляторів (ВД) для системи регенерації води з урини, а також конденсату атмосферної вологи, санітарно-гігієнічної води й рідких відходів життєдіяльності на борту пілотованого космічного апарата.

Цим роботам передували фундаментальне дослідження гідродинаміки плівки рідини й тепломасообміну при конденсації й паротворенні в плівці рідини на обертовій поверхні [3-5].

Результати досліджень дозволили розробити кілька типів ВД, зокрема:

- термоелектричний дистилятор;
- пароежекторний дистилятор;
- масообмінний роздільник-дистилятор;
- парокомпресійний дистилятор;
- багатоступінчастий дистилятор.

Нижче представлені короткі описи названих відцентрових дистиляторів й їхні характеристики.

1.2 Термоелектричний дистилятор

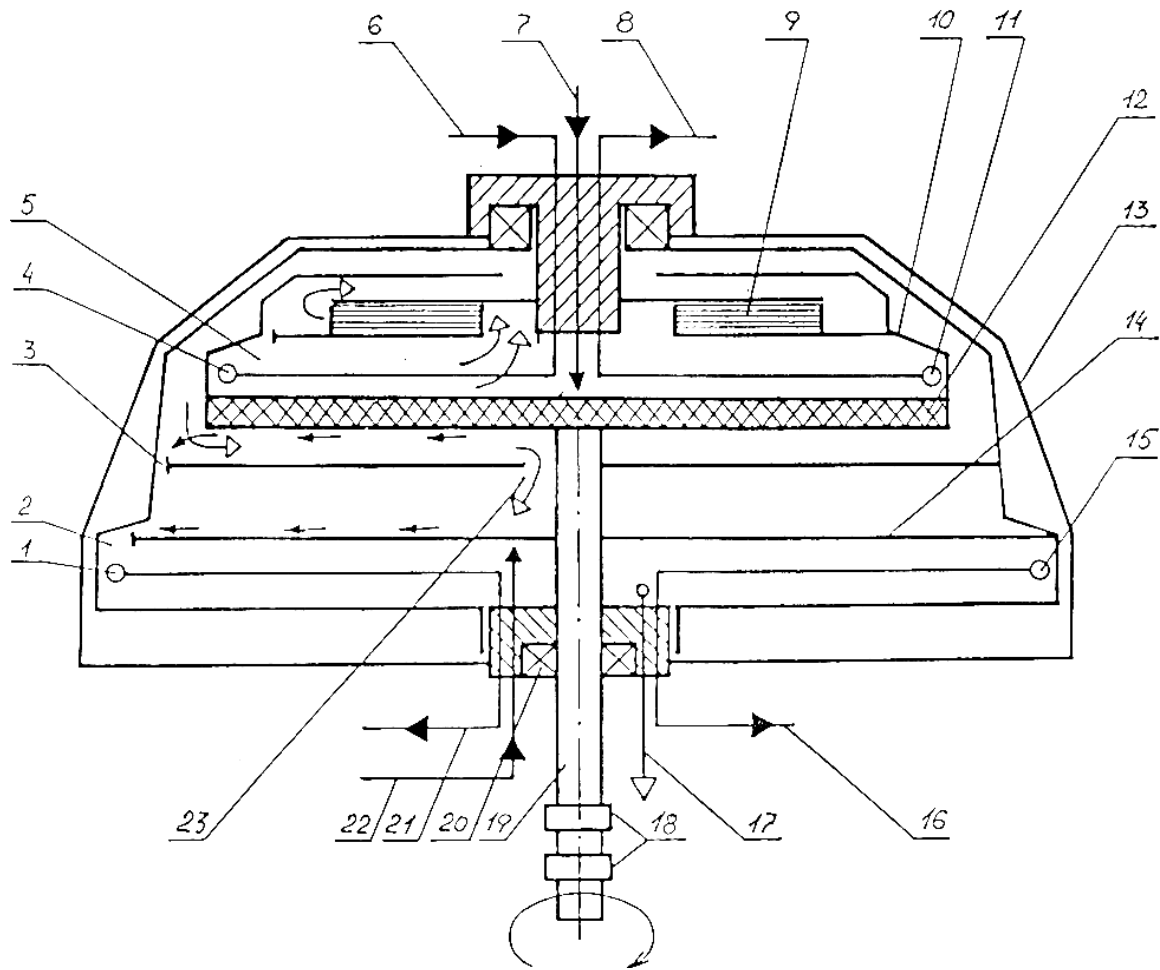
Схема термоелектричного дистилятора, укомплектованого обертовою термоелектричною батареєю, показана на рис. 1.1. Усередині нерухомого корпусу 13 розміщений основний елемент дистилятора - обертовий ротор 10, нижня частина якого виконана у вигляді блоку з 12-ти термоелектричних батарей таким чином, що при подачі електричного живлення через контактні кільця 18 внутрішня (верхня) поверхня - "гаряча" (виділяє теплоту), а зовнішня

(нижня) - "холодна" (поглинає теплоту). Вихідна рідина подається в апарат по каналу 6 через сигнальний черпак (напірну трубку) 4. Канал 16 служить для видалення з апарата дистилляту, канал 8 - для видалення невивареного залишку, канал 17 - для вакуумування внутрішньої порожнини дистиллятора й відсмоктування газів, що не конденсуються.

Працює дистиллятор так. Після вакуумування апарата його ротор за допомогою електромагнітної муфти приводиться в обертання. Вихідна рідина по каналу 6 через сигнальний черпак 4 надходить у випарну зону 5, звідки черпаком 11 через канал 8 відкачується в зовнішній нагрівач і по каналу 7 знову повертається в ротор, де зливається на центральну частину "гарячої" поверхні обертової термобатарей. Подача вихідної рідини в дистиллятор припиняється автоматично при затопленні вихідного отвору сигнального черпака 4, зорієнтованого проти напрямку обертання ротора

Рідина, що зливається на "гарячу" поверхню термобатарей, під дією відцентрових сил, розтікаючись тонкою плівкою до периферії диска, частково випаровується. Невипарений залишок черпаком 11 через канал 8 знову направляється в зовнішній нагрівач. Пара, що утвориться, під дією різниці тисків надходить через сепаратор 9 на нижню, холодну поверхню термобатарей 12, де частково конденсується. Конденсат по поверхні диска розтікається до периферії й по каналу 3 попадає в конденсаторну камеру 2, звідки черпаком по каналу 21 - у зовнішній охолоджувач. Охолоджений конденсат по каналі 22 повертається в апарат, де зливається на теплообмінну поверхню 14, забезпечуючи конденсацію залишку пари, що не сконденсувалася на холодній поверхні термобатарей й пари, що натікає на протилежну сторону диска 14 по каналу 23.

Надлишок конденсату, що утвориться при роботі дистиллятора, веде до збільшення товщини кільця рідини в конденсаційній камері 2, і при затопленні прийомного отвору черпака 15 відбувається відбір дистилляту-продукту. У процесі роботи дистиллятора в контурі, де циркулює невиварена рідина, росте концентрація солей. По досягненні заданого граничного значення концентрації відбувається злив рідини із цього контуру в збірник концентрату. Цю операцію можна проводити без зупинки ротора дистиллятора.



1-черпак відбору конденсату на охолодження; 2- конденсаторна камера; 3- канал перетікання конденсату; 4- сигнальний черпак підживлення; 5- випарна камера; 6- канал подачі вихідної рідини; 7- канал повернення концентрату з нагрівача; 8- канал подачі концентрату нагрівання; 9- сепаратор; 10- ротор; 11- черпак відбору концентрату; 12- термоелектрична батарея; 13- корпус; 14- теплообмінна поверхня для конденсації надлишку пари; 15- черпак відбору дистилляту-продукту; 16- канал виведення дистилляту-продукту; 17- канал для вакуумування й відсмоктування газів, що не конденсуються; 18- кільцеві токопідводи; 19- вал ротора; 20- підшипник; 21- канал для відводу конденсату на охолодження; 22- канал для повернення охолодженого конденсату; 23- паровий канал.

Рисунок 1.1 - Відцентровий термоелектричний дистильатор

Перевагою такого апарата є відсутність необхідності ущільнення, що розділяє камери випару й конденсації, через те, що фазові процеси в них відбуваються при однаковому тиску. До недоліків варто віднести наявність обертових електротоківідводів, що вимагає збільшення потужності приводного двигуна й обмежує ресурс дистильатора.

У таблиці 1.1 наведені результати випробувань дистильатора.

Таблиця 1.1 - Результати випробувань термоелектричного дистильатора

Найменування параметра і його одиниця	Значення параметра
Вид електричного струму	постійний
Напруга, В	27
Загальна потужність установки, Вт	174
у тому числі:	
приводного двигуна	47
термобатарей	127
Продуктивність по дистильату, л/год	0,54
Питоме енергоспоживання, Вт·год/л	325
Тривалість наробітку, год	2600
Кількість включень	316
Загальний об'єм отриманого конденсату, л	1305
у тому числі:	
з води	820
з урини	485

1.3 Пароежекторний дистильатор

Дистильатор (рис. 1.2) складається з корпусу 25, усередині якого розміщений ротор 26. У роторі виділена: камера вихідної рідини 2, камера пари, що гріє, 5, камера випару 6, камера конденсації вторинної пари 8, камера змішання 24 і збірник конденсату 20.

Дистильатор має убудований компресор, робоче сопло 21 якого закріплено в корпусі 25, а дифузор 22 і камера змішання 24 є частиною ротора. Таке виконання компресора дозволяє вирішити проблему розділу камер 5 і 6, що перебувають під різними тисками, без застосування ущільнень, які завжди ускладнюють конструкцію й, крім того, знижують ресурс роботи апарата.

Ротор закріплений у підшипниках 18 й 27 і приводиться в обертання приводним двигуном через магнітну муфту. Черпаки 3, 11, і 12 служать для видалення з апарата відповідно невикпареного залишку (концентрату), дистильату-продукту й технологічного конденсату.

Працює дистильатор у такий спосіб.

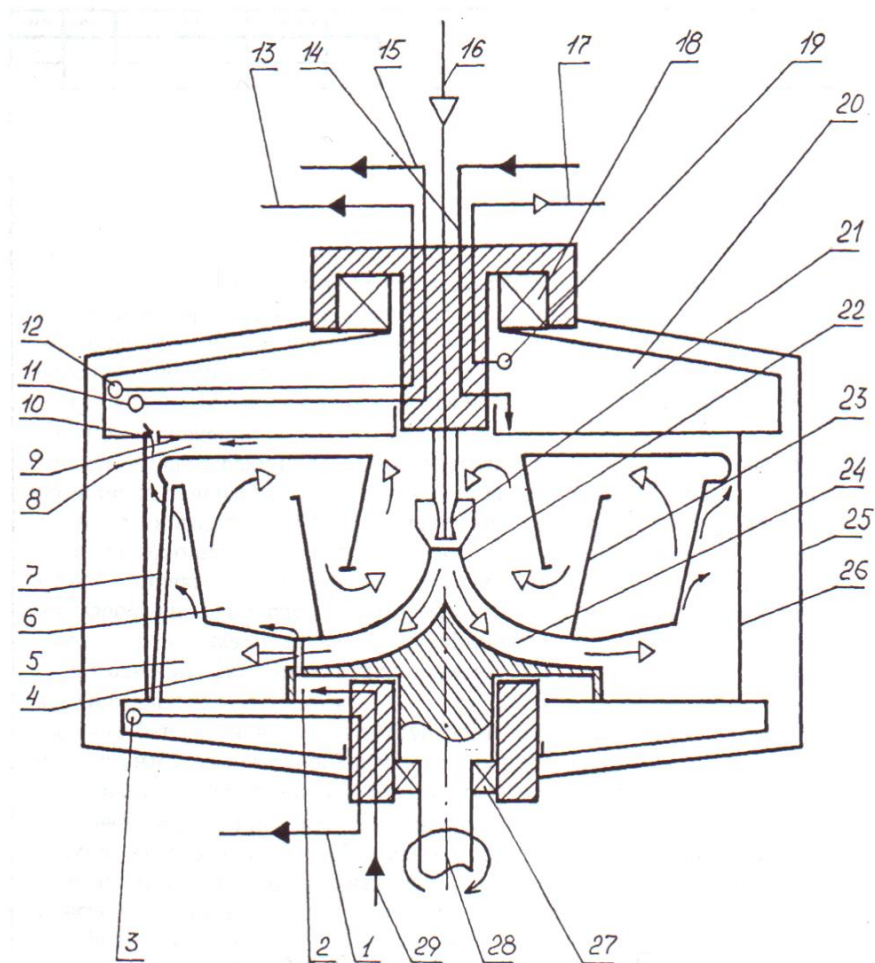
Ротор апарата, у порожнині якого через прийомний отвір 19 створюється необхідне розрідження, приводиться в обертання за допомогою привода. Робоча пара з парогенератора по каналу 16 через робоче сопло 21 вдувається в камеру змішання 24, звідки направляється в камеру нагрівання 5. Тут пара конденсується, віддаючи теплоту зовнішній стінці камери випару 6. Конденсат, що утворився, відцентровою силою відкидається на зовнішню стінку ротора й по каналу 10 попадає в збірник конденсату 20, звідки відбирається черпаком 12 й, як технологічний конденсат, по каналі 13 подається в контур зовнішнього охолодження. Охолоджений конденсат знову повертається в апарат по каналі 14, де зливається на центральну частину теплообмінної поверхні 9.

Вихідна рідина по каналу 29 подається в камеру 2, звідки по каналу 4 надходить у камеру випару 6, де, розтікаючись під дією відцентрової сили у вигляді тонкої плівки по внутрішній поверхні камери, омиваної зовні відносно гарячою парою, випарюється. Невипарений залишок по трубці 7 надходить у черпак 3, за допомогою якого виводиться з апарата по каналу 1 у ємність для збору концентрату.

Вторинна пара, що утворилася в камері випару 6, обігнувши сепараційні тарілки 23, частково відсмоктується струменем робочої пари в камеру змішання 24 парового ежектора, де відбувається його стиск у взаємодії з робочою парою й звідки він направляється в камеру нагрівання 5. Частина вторинної пари, що залишилася, в результаті контакту з холодною теплообмінною поверхнею 9 конденсується, конденсат розтікається до периферії диска й по каналах 10 - у збірник конденсату 20.

У процесі роботи дистилятора кількість конденсату в збірнику конденсату 20 збільшується й, коли його рівень досягає прийомного отвору черпака 11, починається відбір надлишку конденсату як дистиляту-продукту і виведення його з дистилятора по каналу 15. Газ, що утворився і не конденсується, відсмоктується по каналу 17.

Використання струминного компресора як теплового насосу представлялося досить перспективним внаслідок простоти його конструкції й відсутності в ньому тих елементів, на роботу яких можуть вплинути вібрація, ударні навантаження або відсутність гравітації.



1-канал виведення не випареного залишку; 2-камера вихідної рідини; 3-черпак відбору концентрату; 4-канал перетікання вихідної рідини; 5-камера пари, що гріє; 6-камера випару; 7-канал перетікання не випареного залишку; 8-камера конденсації вторинної пари; 9- теплообмінна поверхня; 10-канал перетікання вихідної рідини; 11- черпак відбору дистилату-продукту; 12- черпак відбору технологічного конденсату; 13- канал виведення технологічного конденсату на охолодження; 14- канал повернення охолодженого технологічного конденсату; 15- канал виведення дистилату-продукту; 16- канал підведення робочої пари; 17- канал вакуумування й відводу газів, що не конденсуються; 18- підшипник; 19- прийомний отвір для вакуумування і відводу газів, що не конденсуються; 20- збірник конденсату; 21- сопло; 22- дифузор; 23- сепараційні тарілки; 24- камера змішання; 25- корпус; 26- ротор; 27- підшипник; 28- вал; 29- канал підведення вихідної рідини

Рисунок 1.2 - Відцентровий пароежекторний дистильатор

До недоліків конструкції варто віднести необхідність автономного джерела робочої пари. У таблиці 1.2 наведені результати випробувань макетного зразка.

Таблиця 1.2 - Результати випробувань макетного зразка пароежекторного дистилятора

Найменування параметра і його одиниця	Значення параметра
Швидкості обертання ротора дистилятора, об/хв	2120
Потужність привода дистилятора, Вт	92
Потужність нагрівачів, Вт	245
Потужність привода відцентрового парогенератора, Вт	22
Продуктивність по дистиляту,	
- на початку циклу	0,7
- наприкінці циклу	0,44
Коефіцієнт ефективності теплового насоса:	
- на початку циклу`	1,90
- наприкінці циклу	1,19
Питоме енергоспоживання (середнє за цикл), Вт.год/л	598

1.4 Масообмінний роздільник-дистилятор

Роздільник-дистилятор (рис. 1.3) складається з корпусу 16, у якому розміщені два ротори - 4 й 7, закріплені на одному валу 10 і приводяться в обертання одним приводом. Ротор 4 є випарником дистилятора, ротор 7 - конденсатором. Перегородками 17 випарник і конденсатор розділені на теплообмінні й сепараційні порожнини, що сполучаються між собою за допомогою патрубків 9 й отворів 13. Дистилятор має убудовані черпаки (напірні трубки) 3 й 6, патрубки для підведення 1 і видалення 8 газу, а також патрубок 18 для подачі вихідної рідини в газовий потік і канал 14 у перегородці 15 для подачі охолодного конденсату.

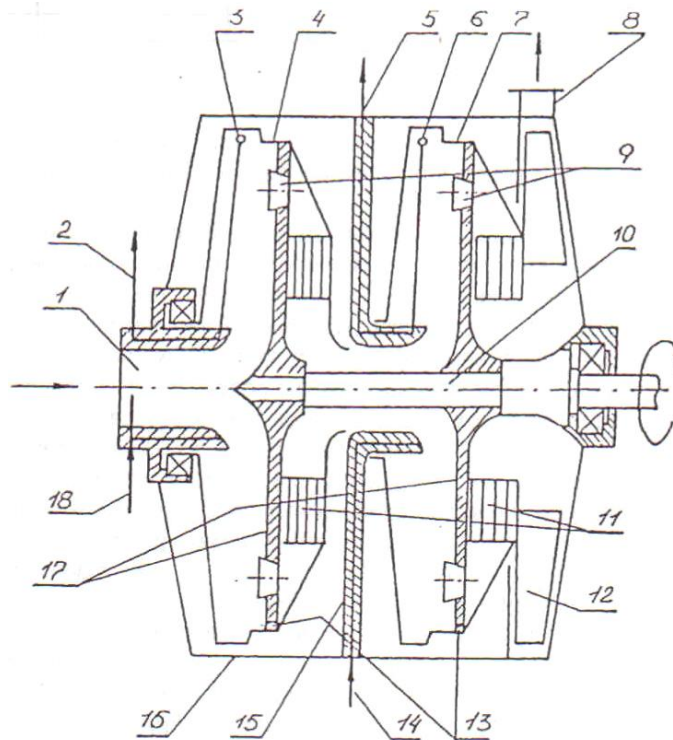
Дистилятор може бути оснащений лопатковим апаратом 12, що є, власне кажучи, колесом вентилятора.

Працює дистилятор у такий спосіб.

Ротор приводиться в обертання. Через випарник і конденсатор послідовно прокачується повітря. Вихлопний патрубок 8 може бути підключений трубопроводом до вхідного патрубка 1. Вихідна рідина, підігріта в зовнішньому теплообміннику до заданої температури, подається по трубці 18 у газовий потік на його вході у випарник.

У результаті взаємодії газового потоку й вихідної рідини остання частково випаровується, за рахунок чого збільшується вологовміст і температура повітря. Рідина, що не випарувалася, відбирається з випарника черпаком 3 і по каналу 2 зливається в збірник для рідини з підвищеною концентрацією солей. Газовий потік, очищений від краплинної рідини в результаті дії відцентрової сили, а також проходження через сепаратор 11, надходить у конденсатор 7, де охолоджується нижче температури роси конденсатом, що подається по каналу 14. При цьому відбувається конденсація водяної пари, що втримується в транспортному повітрі й, як наслідок, зниження його вологовмісту.

Конденсат, що утворився, змішується з охолоджуваним конденсатом і черпаком 6 через канал 5 виводиться з дистиллятора на охолодження. Прокачування транспортного повітря через дистиллятор забезпечується убудованим вентилятором 12 або, при його відсутності, повітродувкою, підключеним своїм усмоктувальним патрубком до вихідного патрубка дистиллятора 8.



1-вхідний патрубок; 2-канал виведення залишку, що не випарувався; 3-черпак відбору залишку, що не випарувався; 4-ротор-випарник; 5-канал виведення конденсату на охолодження; 6-черпак відбору конденсату на охолодження; 7- ротор-конденсатор; 8- вихлопний патрубок; 9- пропускний патрубок; 10- вал ротора; 11- сепаратор; 12- вентилятор; 13- отвори для витікання конденсату; 14- канал введення охолодженого конденсату; 15- перегородка; 16- корпус дистиллятора; 17- перегородка; 18- канал введення вихідної рідини.

Рисунок 1.14 - Відцентровий масообмінний роздільник-дистиллятор

Основні переваги масообмінного дистилятора - у можливості об'єднання в одному пристрої функцій дистилятора й газорідного роздільника (осушувача повітря), а також у відсутності необхідності вакуумування апарата, тобто він працює при атмосферному тиску.

Результати випробування масообмінного дистилятора представлені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Результати випробування масообмінного дистилятора

Найменування параметра і його одиниця	Чисельне значення
Швидкість обертання ротора, об/хв	1620
Витрата повітря через апарат, л/хв	90... 327
Температура повітря на виході, °С	55...46
Загальна електрична потужність, Вт	420... 890
Продуктивність по дистиляту, л/ год	0,54...1,24
Питоме енергоспоживання, Вт. год/л	900... 1100
Температура повітря на виході, °С	55...46
Загальна електрична потужність, Вт	420... 890
Продуктивність по дистиляту, л/ год	0,54...1,24
Питоме енергоспоживання, Вт. год/л	900... 1100

1.5 Парокомпресійний дистилятор

Застосування механічного компресора для роботи в комплексі з відцентровим вакуумним дистилятором дозволяє використати вторинну пару, як гріючу. Таким чином, відпадає необхідність у додатковому джерелі пари, що гріє.

Зарубежним аналогом дистилятора цього типу є створений у США відцентровий дистилятор з паровою компресією [1] продуктивністю 2,08 л/год при питомому енергоспоживанні 152 Вт·год/л. У компонованні на рамі орбітальної станції блок має габарити 0,44 x 0,80 x 1,80 м при масі 107 кг. Швидкість обертання ротора компресора –

2400 - 2800 об/хв, швидкість обертання ротора дистилятора – 180 - 210 об/хв. Відомості про конструктивні особливості дистилятора, компресора й привода не приводяться.

У КПІ перші оцінні розрахунки ймовірних характеристик відцентрового дистилятора з механічним компресором було виконано в 1985 р. Результати розрахунку показали, що для апарата продуктивністю 2 л/год при тиску насичення 0,11 бар і ступені стиску 1,36 потужність компресора повинна становити 39,5 Вт, а питома енергоспоживання - 70 Вт·год/л.

Експерименти з дистиляторами в комплексі з паровим компресором проводилися в 1986 й 1995 р. В 1986 р. виготовлений раніше пароежекторний дистилятор був переустаткований у дистилятор для роботи із зовнішнім паровим компресором, в 1995 р. триступінчастий дистилятор був переустаткований у двоступінчастий дистилятор також для роботи із зовнішнім паровим компресором. В обох випадках як паровий компресор була використана газодувка зі швидкістю обертання ротора близько 6000 об/хв і ступені стиску (залежно від режимів роботи) 1,35...1,57.

Випробування зазначених апаратів показали працездатність розробленої схеми. Однак, у зв'язку з тим, що в обох випадках як дистилятори й компресори були використані не оригінальні апарати, а пристрої, змонтовані з апаратів для інших технологічних схем і завдань, розрахункові характеристики випробуваних відцентрових дистиляторів з паровим компресором не підтвердилися. Але навіть у такому варіанті виконання питома витрата енергії при роботі двоступінчастого дистилятора на воді при потужності компресора 96 Вт і продуктивності по дистиляті 1,5 л/год склав 86,3 Вт·год/л.

1.6 Багатоступінчастий відцентровий дистилятор

Найпоширенішим способом підвищення економічності дистиляційного пристрою є організація багатоступінчастого процесу випарювання. Сутність його полягає в тім, що вторинна пара одного щабля випарювання використовується як греюча пара в наступній. При цьому тиск у кожному наступному щаблі підтримується більше низьким, чим у попередній. Якщо не враховувати теплові втрати, то можна вважати, що n-ступінчастий дистилятор дає n-кратне зниження витрат енергії в порівнянні з одноступінчастим.

У КПІ перші розрахунки й ескізні пророблення триступінчастого дистилятора були виконані в 1984...1985 р. Протягом 1986...1988 р. був розроблений проект відцентрового вакуумного дистилятора. У період з 1989 по 1998 р.р виготовлено два екземпляри апаратів і проведені попередні їхні випробування. При роботі триступінчастого дистилятора в комплексі з термоелектричною батареєю (як зовнішнє джерело теплоти) питома енергоспоживання при

випарюванні урини склало 165...200 Вт·год/л, а продуктивність апарата по дистилляту - близько 2 л/год.

У наступні роки, у НТУУ “КПІ” тривали роботи з удосконалювання багатоступінчастого дистильатора, а також окремих його вузлів й елементів і досліджувався вплив різних факторів на характеристики дистильатора.

Докладний опис конструкції багатоступінчастого відцентрового вакуумного дистильатора і його роботи представлено в розділі 2.

1.7 Висновки за розділом 1

В даному розділі розглянуті дистильаційні установки для систем життєзабезпечення космічних станцій, дальніх пілотованих космічних експедицій та довгострокових стаціонарних баз. Основними критерієм таких апаратів є: надійність, автономність, велика продуктивність, невеликі масогабаритні показники. В підрозділах 1.1 – 1.6 були розглянуті загально доступні та перспективні розробки в дану напрямі.

В окремий розділ 2 був винесений багатоступінчатий відцентровий вакуумний дистильатор, як найбільш перспективний. На ньому зупинимось більш детально для розуміння та аналізу існуючих задач з розрахунку та оптимізації апаратів що мають відцентрові теплообмінні поверхні.

2 БАГАТОСТУПІНЧАТИЙ ВІДЦЕНТРОВИЙ ВАКУУМНИЙ ДИСТИЛЯТОР

2.1 Принципова схема, конструкція і робота п'ятиступінчастого відцентрового вакуумного дистилятора

Принципова схема п'ятиступінчастого відцентрового вакуумного дистилятора (ВВД-5) представлена на рис. 2.1.

Основні елементи дистилятора такі.

Нерухома частина - корпус 18 і нерухомий вал 20. Обертюва частина - порожнистий ротор 22, закріплений на підшипниках 19, 30. Порожнина ротора розділена на ступені (I - V ступені і кінцевий конденсатор FC) теплообмінними поверхнями 21, 24, 25, 26, 27 і елементами гідравлічного й лабіринтового ущільнень.

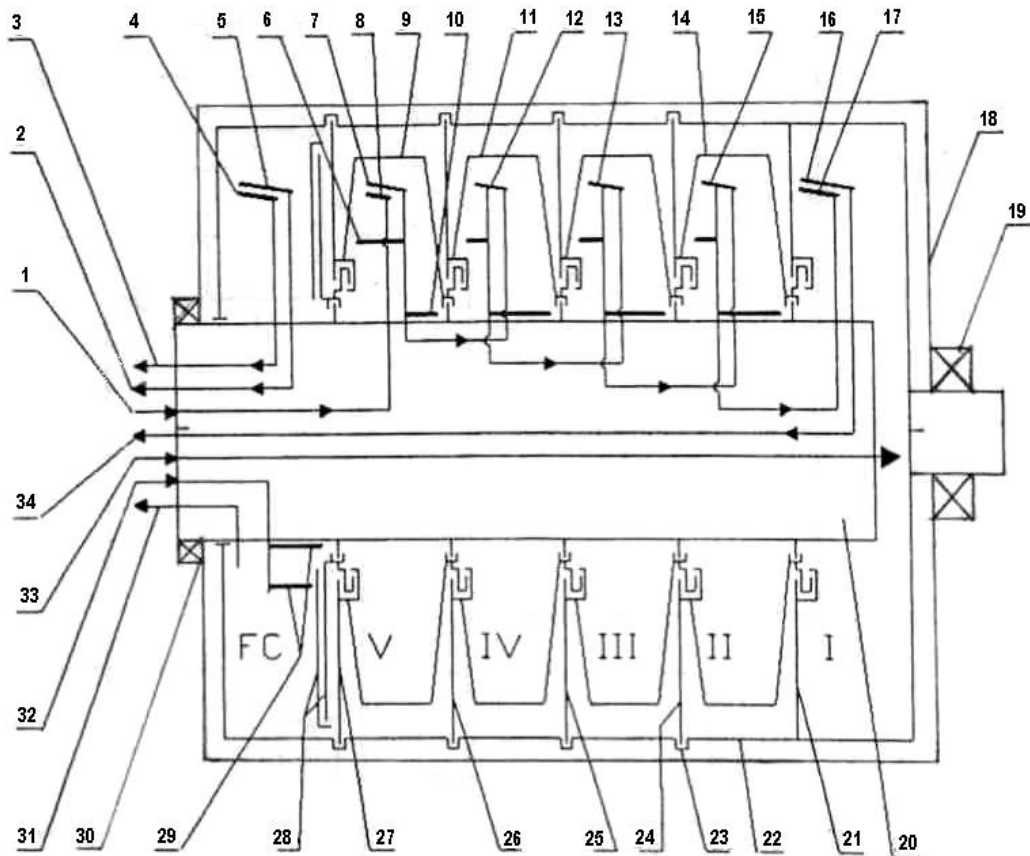
На розміщеному по осі обертання ротора нерухомому валу закріплені черпаки (напірні трубки) 4, 5, 7, 8, 12, 13, 15, 16, 17, зрошувачі 6 і 10 в кожному ступені і 29 в кінцевому конденсаторі та відповідні елементи гідравлічного й лабіринтового ущільнень

Обертюва частина - порожнистий ротор 22. на якому закріплені відповідні елементи гідравлічного й лабіринтового ущільнень 12, 29, черпаки (напірні трубки) 27, 1, 37, 41, 42, зливальні трубки 28, 32, 38, приймальня трубка 6, зрошувачі 30, 33, 36, 39, 43.

Усередині нерухомого валу 20 розміщені канали: 1 - введення вихідної рідини в дистилятор; 34, 33 - відведення рідини з дистилятора на нагрівання в зовнішньому джерелі теплоти й наступного повернення нагрітої рідини в дистилятор; 2, 32 - відведення технологічного конденсату із дистилятора на охолодження в зовнішньому холодильнику й наступне повернення його; 3 - відведення із дистилятора дистиляту-продукту; 31 - вакуумування внутрішньої порожнини ротора й відводу із неї газів, що не конденсуються. Крім того, усередині нерухомого валу розміщені канали для перетікання рідини, що упарюється, із ступені в ступінь.

Робота багатоступінчастого відцентрового вакуумного дистилятора полягає в наступному. Ротор 22 (рис. 2.1) приводиться в обертання за допомогою електричного мотора. У внутрішній порожнині ротора за допомогою вакуум-насоса через канал 31 створюється необхідне розрідження - абсолютний тиск не вище $5 \cdot 10^2$ Па (5 мбар).

Технологічний (робочий) дистилят при атмосферному тиску під дією перепаду тисків подається по каналу 33 і зрошувачу 29 в зону кінцевої конденсації FC.



1 – канал подачі вихідної рідини в дистилятор (в V ступінь); 2 – канал перетоку конденсату з дистилятора в контур охолодження; 3 – канал для відбору дистилату продукту; 4 – черпак; 5 – черпак; 6 – зрошувач; 7 – черпак; 8 – черпак; 9 – теплообмінна поверхня; 10 – зрошувач; 11 – теплообмінна поверхня; 12 – черпак; 13 – черпак; 14 – теплообмінна поверхня; 15 – черпак; 16 – черпак; 17 – черпак; 18 – корпус дистилятора; 19 – підшипник; 20 – нерухомий вал; 21 – перегородка; 22 – ротор; 23 – гідрозатвор; 24 – перегородка; 25 – перегородка; 26 – перегородка; 27 – перегородка; 28 – теплообмінна поверхня; 29 – зрошувач; 30 – підшипник; 31 – канал для вакуумування дистилятора; 32 – канал подачі конденсату з контуру охолодження в дистилятор; 33 – канал подачі рідини в дистилятор з контуру підігріву; 34 – канал виходу рідини з дистилятора в контур підігріву; I...V – ступені. FC – кінцевий конденсатор.

Рисунок 2.1 - Гідравлічна схема п'ятиступінчастого відцентрового вакуумного дистилятора

В результаті обертання ротора 20 в порожнині FC утворюється кільце рідини. По досягненню товщини кільця рівня, при якому прийомний отвір черпака 4 зануриться у рідину, надлишок дистилату почне стікати по каналу 3 в ємність для дистилату-продукту, що буде свідчити про заповнювання дистилатом зовнішнього контуру охолодження. Якщо прийняти температури апарата, конденсату й навколишнього середовища близькими одна одній, то через деякий, досить короткий термін, у порожнині ротора встановиться термодинамічно рівноважний стан з

тиском, що відповідає температурі насичення рідини.

Вихідна рідина при атмосферним тиску по каналу 1 і зливальній трубці 8 під дією перепаду тисків подається в зону випару останньої, V ступені дистилятора. Тут під дією відцентрової сили рідина відкидається на периферію зони випару, утворюючи обертове (разом з ротором) рідинне кільце. По досягненні товщини кільця рідини значення, при якому прийомний отвір нерухомого черпака 7 поринає в шар рідини, що рухається (обертається), остання під дією динамічного напору потоку, що набігає, надходить у зрошувач 6 й 10, а також по сполучному каналу - у сусідню, IV ступінь і далі, по досягненні певної товщини кільця рідини в IV ступені, за допомогою черпака 12 по сполучним каналам – послідовно у III, II і I ступені.

По досягненні в першому ступені певного рівня рідини (товщини рідинного кільця) остання черпаком 16 по каналу 34 направляється в контур нагрівання, звідки по каналу 33 знову повертається в першу ступінь дистилятора.

Надходження вихідної рідини в V ступінь припиняється в результаті виникаючого протитиску від потоку, що набігає, у момент затоплення вихідного отвору зливальної трубки 8, спрямованого назустріч обертанню ротора, й розташованого на меншому радіусі, чим радіус розташування прийомного отвору черпака 7.

Циркуляція рідини усередині зони випару V ступеня при цьому триває. Рідина, захоплена черпаком 7, через зрошувачі 6 й 10 зливається на теплообмінну поверхню 9, по якій вона під дією відцентрової сили тонкою плівкою знову зтікає до периферійного рідинного кільця.

Перші порції рідини, що зливаються зі зрошувача 10, під дією відцентрової сили утворюють у порожнині гідрозатворів 29 рідинне кільце, що через конструктивні особливості ротора стає потім непроникним як для наступних порцій рідини, так і для пари із сусідньої ступені.

Припинення перетоку вихідної рідини в IV, III, II і I ступені відбувається по такій же схемі, як і для V ступені.

З моменту припинення надходження вихідної рідини в V ступінь, що свідчить про заповнення всіх п'яти зон випару і контуру підігріву до необхідного рівня, апарат готовий до основного функціонування.

Функціонування дистилятора починається з початком підведення теплоти до вихідної рідини в контурі підігріву й відводам надлишку теплоти від технологічного конденсату в контурі охолодження. При підведенні (у підігрівнику) теплоти до рідини остання перегрівається щодо температури насичення й, повернувшись по каналу 33 у зону випару

першої ступені, частково випаровується, віддаючи теплоту перегріву й повертаючись (у масі рідини, що залишилася) у стан насичення.

Пара, що утворилася в першій ступені, пройшовши через сепараційні перегородки надходить у зону конденсації першої ступені, де, контактуючи з теплообмінною поверхнею 14 другої ступені, зрошуваної із протилежної сторони відносно холодною вихідною рідиною, конденсується, передаючи теплоту через стінку теплообмінної поверхні вихідної рідини в другій ступені.

Надлишок теплоти, що надійшов з першої ступені в другу, викликає випар частини рідини й пара, що утворилася, пройшовши сепаратор, надходить у зону конденсації другої ступені, де відбувається процес передачі теплоти в третю ступінь, що викликає утворення в ній пари. І далі, по такій же схемі в другу і першу ступінь відповідно.

Гідравлічні затвори запобігають перетоку пари повз сепаратори з першої ступені в другу, із другої - в третю і так далі до п'ятої ступені.

Пара останньої, п'ятої ступені, пройшовши сепаратор, попадає в зону кінцевої конденсації FC, де конденсується на плівці стікаючі по поверхні 11 охолодного технологічного конденсату, що надходить в апарат з контуру охолодження по каналу 32 через зрошувач 29.

Конденсат, що утворився в зонах конденсації всіх ступінів, під дією відцентрової сили розтікається по теплообмінних поверхнях до периферії й потім із ступеня в ступінь через периферійні гідрозатвори 23 стікає в кінцевий конденсатор FC, де змішується зі стікаючим по теплообмінним поверхням 25 охолодним технологічним конденсатом й відкачується черпаком 5 по каналу 2 у контур охолодження.

У процесі випару вихідної рідини товщина обертового рідинного кільця в першій ступені зменшується, оголюючи вихідний отвір зливальної трубки 17. Між прийомним отвором черпака 15 у другій ступені й вихідному отворі зливальної трубки 17 у першій ступені виникає перепад тисків. Відбувається переток частини рідини із другої ступені в першу, що у свою чергу приводить до зменшення товщини шару рідини в другій ступені й до перетоку за аналогічною схемою рідини із третьої ступені в другу, а потім відповідно із четвертої третю, із п'ятої в четверту, із зовнішньої ємності з вихідною рідиною по каналу 1- у п'яту ступінь. Таким чином, підживлення апарата вихідною рідиною відбувається автоматично.

Надлишок конденсату, що накопичується в зоні кінцевої конденсації FC, приводить до збільшення товщини кільця рідини та затоплення прийомного отвору черпака 4 і відкачці частини конденсату по каналу 3 у зовнішній збірник дистиляту-продукту.

Гази, що утворилися в процесі термічної дистиляції вихідної рідини й не скондесувалися, переміщуються під дією різниці тисків у сусідніх ступенях через отвори у

перегородках між ступенями до порожнини кінцевого конденсатора і віддаються звідти вакуумним насосом через канал 31.

Після виходу системи на стаціонарний режим роботи концентрація солей у рідині у всіх ступенях дистиллятора, крім першої, буде залишатися постійною й тим більшою, чим менший порядковий номер ступені. Концентрація солей у першій ступені буде змінюватися в процесі роботи від початкового значення до деякого граничного наприкінці циклу, по досягненню якого припиняється подача електроживлення на зовнішнє джерело теплоти і охолоджуючої води на теплообмінник-охолоджувач, вміст контуру нагрівання витісняється вихідною рідиною в зовнішній збірник концентрату, після чого цикл випарювання може бути відновлений.

В таблиці 2.1 представлені основні технічні характеристики п'ятиступінчатого відцентрового вакуумного дистиллятора

Таблиця 2.1 - Основні технічні характеристики ВВД-5

Найменування параметра	Одиниці виміру.	Числове значення параметра
Габаритні розміри:		
- довжина	мм	465
- діаметр		276
Маса	кг	18.65
Швидкість обертання ротора	об/хв	1100 ... 1500
Сумарна площа теплообмінних поверхонь	см ²	713 x 5 = 3565
Сумарний обсяг каскадів випару	см ³	774 x 5 = 3870
Вид електричного струму		постійний
Електрична напруга	В	12 – 28
Максимальна електрична потужність приводу	Вт	140
Режим роботи		тривалий
Рідини, що переробляють		вода (в тому числі санітарна), рідкі відходи життєдіяльності людини (урина), водяний розчин NaCl

2.2 Термоелектрична батарея

Термоелектрична батарея (ТЕБ), яка була використана в розробленій системі регенерації води, являє собою пристрій, що складається із сукупності елементів, що забезпечують обмін теплотою між термоелектричними модулями й потоками рідини. Конструктивно ТЕБ складається з теплообмінних елементів, з'єднаних у секції по потоку теплоносіїв послідовно. Секції контурів нагрівання й охолодження ідентичні й з'єднані по потоку теплоносіїв паралельно. Між теплообмінними елементами розташовані термоелектричні модулі, з'єднані електрично паралельно. Маса ТЕБ - 5,7 кг, габарити (довжина x ширина x висота) – 480 x 85 x 185 мм. Споживана електрична потужність $N_{ТЕБ}$ - до 600 Вт. Розрахунковий коефіцієнт ефективності батареї (опалювальний коефіцієнт), закладений у конструкцію при розробці, для умов $N_{ТЕБ} = 200$ Вт і масовій витраті рідини в кожному контурі 90 кг/год становить - 2,50. На рис. 2.2 представлено фото термоелектричної батареї.

У процесі випробування п'ятиступінчатого відцентрового дистильатора досліджувалися також параметри термоелектричної батареї при різних значеннях електричного навантаження, масової швидкості рідин у контурах нагрівання й охолодження й різниці температур рідин на вході в батарею.

На рис. 2.3 представлена типова картина залежності коефіцієнта ефективності ТЕБ від електричного навантаження й різниці температур рідин на вході в ТЕБ.

Коефіцієнт ефективності або опалювальний коефіцієнт, розрахований як відношення теплового потоку, відведеного з порожнини нагрівання батареї, і підведеної електричної потужності:

$$Q_{Г}/N_{ТЕБ} = G_{Г} \cdot c_{Г} (t_{Г\text{ вых}} - t_{Г\text{ вх}}) / I \cdot U, \quad (2.1)$$

де: $G_{Г}$ – масова витрата рідини в “гарячому” контурі, кг/год;

$c_{Г}$ – теплоємність рідини в “гарячому” контурі, Дж/кг·град;

$t_{Г\text{ вых}}$ – температура рідини в “гарячому” контурі на виході з порожнини нагрівання ТЕБ, °С;

$t_{Г\text{ вх}}$ – температура рідини в “гарячому” контурі на вході в порожнину нагрівання ТЕБ, °С;

I, U – електричний струм і напруга живлення ТЕБ, відповідно.

З рис. 2.3 видно, що з ростом різниці температур $\Delta t = t_{Г\text{ вых}} - t_{Г\text{ вх}}$ і збільшенні електричного навантаження відбувається зниження коефіцієнта ефективності. Тобто збільшення кожного із цих факторів приводить до росту різниці температур на спаях термоелементів і до погіршення їхньої характеристики.



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд термоелектричної батареї “Алтек-7001”.

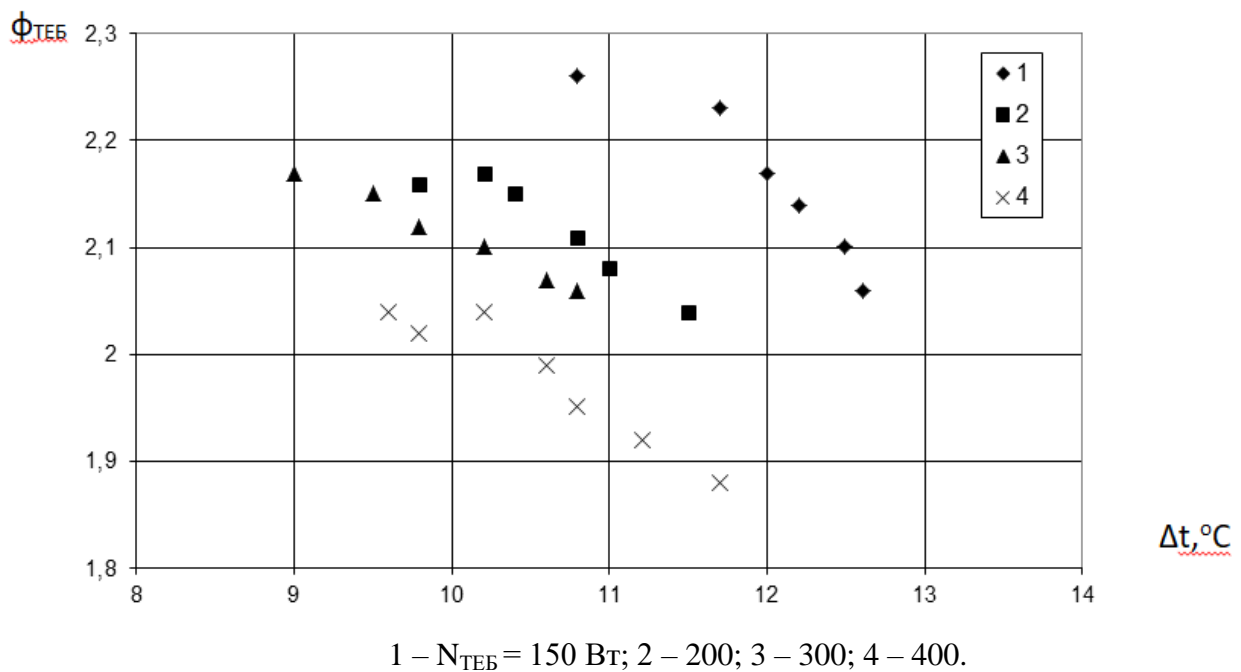


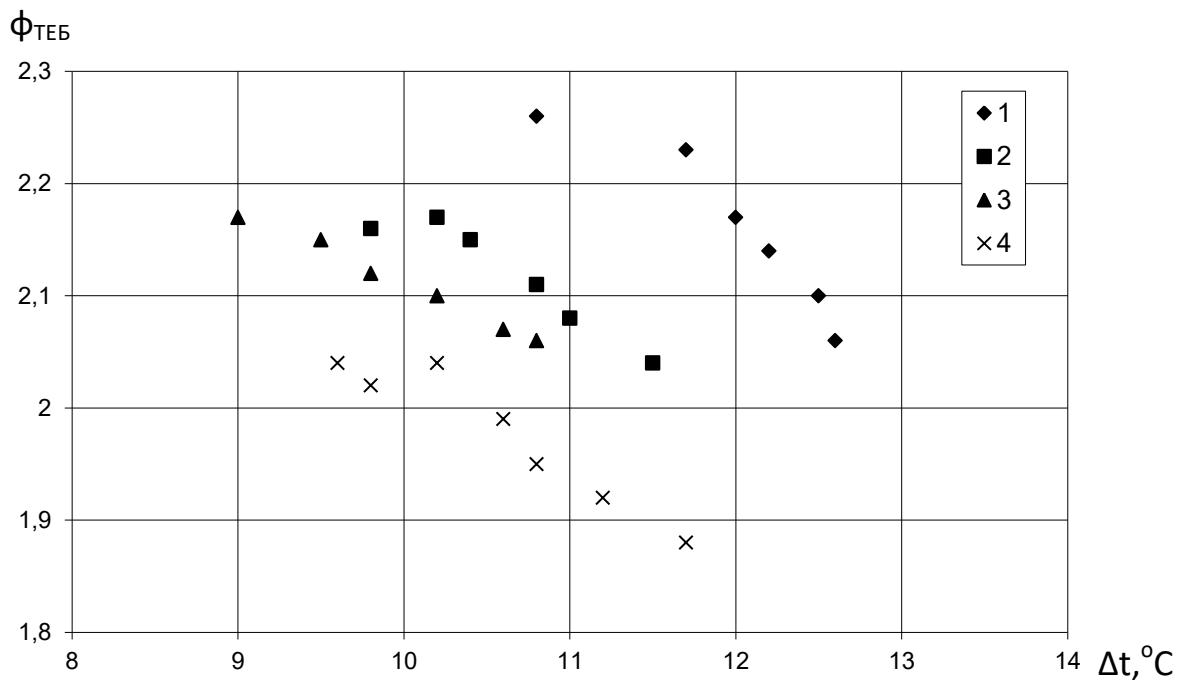
Рисунок 2.3 – Вплив електричного навантаження та різниці температур потоків рідини на вході в ТЕБ на коефіцієнт ефективності ТЕБ. ($G_T = G_X = 82 \text{ кг/год}$)

На рис. 2.4 представлено вплив масової витрати потоку рідини в контурах охолодження й нагрівання на коефіцієнт ефективності ТЕБ. З рисунка видно, що збільшення масової швидкості приводить до збільшення коефіцієнта ефективності, що є наслідком поліпшення теплообміну між спаями термопар і потоками рідини.

В таблиці 2.2 представлені основні технічні характеристики термоелектричної батареї.

Таблиця 2.2 - Основні технічні характеристики ТЕБ.

Найменування параметра	Одиниці виміру	Чисельне значення параметра
Габаритні розміри (довж. х шир. х вис.)	мм	480 х 85 х 125
Маса	кг	май.65
Вид електричного струму		постійний
Електрична напруга	В	12 – 28
Максимальна електрична потужність, $N_{ТЕБ}$	Вт	600
Гідравлічний опір контурів при потоці теплоносіїв 90 л/год: - «холодного» - «гарячого»	бар	0,07 0,08
Коефіцієнт ефективності (нагрівальний коефіцієнт) при $N_{бат} = 200$ Вт і потоці теплоносіїв 90 кг/год		2,5
Режим роботи		тривалий



1 – $G_T = 100$ кг/год, $G_X = 100$ кг/год; 2 – 90, 94; 3 – 82, 82; 4 – 70, 75.

Рисунок 2.4 – Вплив масових витрат потоків рідини в контурах та різниці її температур на вході в ТЕБ на коефіцієнт ефективності ТЕБ. ($N_{ТЕБ} = 400$ Вт).

2.3 Гідравлічна схема п'ятиступінчатого відцентрового вакуумного дистилятора і його робота

На рис. 2.5 представлена гідравлічна схема стенда для випробувань багатоступінчатого відцентрового вакуумного дистилятора.

Основні елементи стенда: відцентровий дистилятор 20, тепловий насос-термоелектрична батарея 9, теплообмінник-охолоджувач 2, вакуум-насос 19, й ємності: із заправним дистилятом 23, з вихідною рідиною 22, для збору дистиляту-продукту 18, для збору концентрату 16.

Елементи стенда з'єднані між собою гідравлічними комунікаціями, оснащеними необхідною запірною арматурою.

Ємності із заправним дистилятом 23 і з вихідною рідиною 22 перебувають під атмосферним тиском. Інші ємності, а також внутрішня порожнина ротора дистилятора й гідроавтомат з'єднані з вакуум-насосом, за допомогою якого в них підтримується задане розрідження.

Живлення привода відцентрового дистилятора й термобатареї здійснюється від регульованого джерела постійного струму. Потужність споживана приводом дистилятора й термобатареї розраховується по спаданню напруги й току в ланцюзі споживачів, обмірюваним електронними приладами. Швидкість обертання ротора дистилятора задається, підтримується постійною за допомогою електронної системи і контролюється на моніторі комп'ютера в режимі "in line".

Температура рідин в різних точках системи вимірюється хромель-копелевими термопарами, тиск (вакуум) вимірюється мановакууметрами. Потоки охолоджуючої води на теплообмінник-охолоджувач, дистилята в "холодному" контурі і розчину, що упарюється, в "гарячому" контурі вимірюються ротаметрами. Солевміст рідин в "холодному" і "гарячому" контурах вимірюється солемірами.

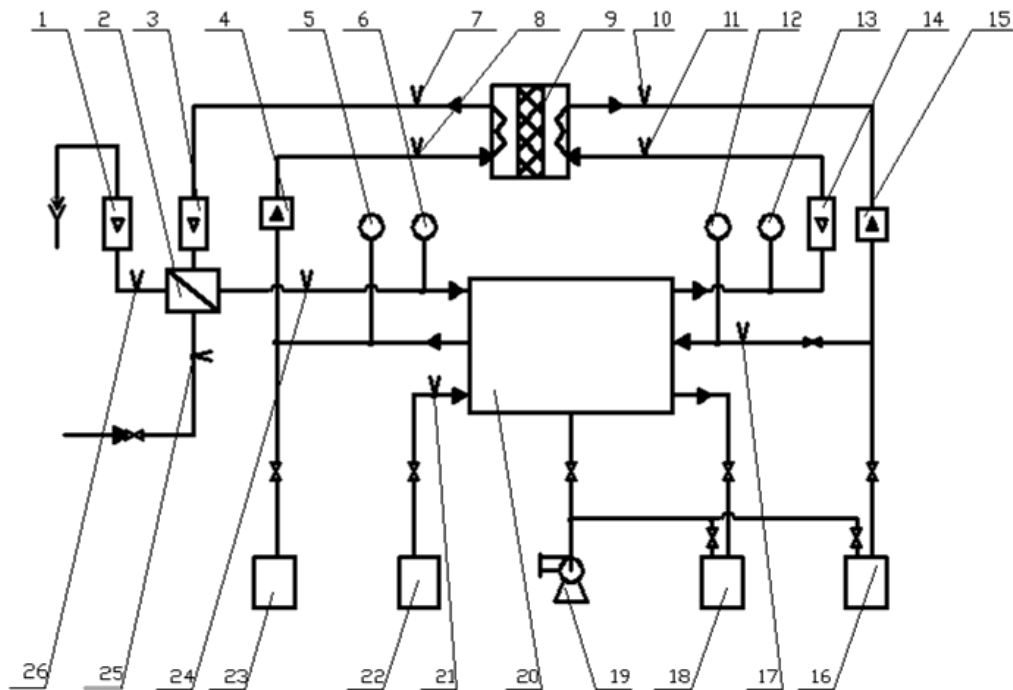
"Холодним" контуром названо контур, що включає черпаковий насос кінцевого конденсатора, тракт із солеміром 4 і термопарою 7, прохолоджуючу порожнину термобатареї 9, тракт із термопарою 8, ротаметром 3, холодильником 2 і термопарою 24, та порожнину кінцевого конденсатора відцентрового дистилятора. "Гарячим" контуром названо контур, що включає черпаковий насос першого ступеня дистилятора, тракт із ротаметром 14 і термопарою 11, гріючу порожнину термобатареї 9, тракт із термопарою 10, солеміром 15 і термопарою 17 та порожнину першої ступені дистилятора.

Робота стенда полягає в наступному.

Система вакуумується за допомогою вакуум-насоса 9. По досягненні необхідного розрідження, що контролюється за допомогою вакуумметра, ротор дистилятора приводиться обертання. "Холодний" контур системи заповнюється технологічним дистилятом з ємності 23. Вихідна

рідина з ємності 22 через гідроавтомат надходить спочатку в п'яту ступінь дистилятора, звідки черпаковим насосом перекачується в четверту ступінь, і далі послідовно до першої ступені. З першої ступені вихідна рідина черпаковим насосом подається в "гарячий" контур.

При включенні термобатарей 9 і подачі охолодної води на теплообмінник-охолоджувач 2 температура технологічного дистиляту в "холодному" контурі починає знижуватися, у результаті чого він (дистилят) повертається в кінцевий конденсатор дистилятора переохолодженим.



1- ротаметр; 2 - теплообмінник-охолоджувач; 3 - ротаметр; 4 – солемір; 5, 6 – вакуумметри; 7, 8 – термопары Т6 і Т5 відповідно; 9 - термоелектрична батарея; 10 - 11 термопары Т3 і Т2 відповідно; 12, 13 - вакуумметри; 14 – ротаметр; 15- солемір; 16 – ємність для концентрату; 17 – термопара Т7; 18 - ємність для дистиляту-продукту; 19 - вакуум-насос; 20 - відцентровий вакуумний дистилятор; 21 - термопара Т1; 22 - ємність із вихідною рідиною; 23 - ємність із заправним дистилятом; 24, 25, 26 – термопары Т7, Т8 і Т9 відповідно .

Рисунок 2.5 - Гідралічна схема стенда для випробування багатоступінчастого відцентрового вакуумного дистилятора.

Вихідна рідина в "гарячому" контурі, пройшовши через порожнину термобатарей, що гріє, перегрівається щодо температури насичення й, повернувшись у першу ступінь, миттєво скипає й частково випаровується. Пара, що утворилася, конденсується на теплообмінній поверхні, що розділяє першу і другу ступені, викликає випар частини рідини в другій ступені, а пара другої

ступені - випар частини рідини в третьої ступені і так до п'ятої ступені. Пара п'ятої ступені конденсується на теплообмінній поверхні, що омивається охолодженим технологічним дистиллятом і розділяє п'яту ступінь і порожнину кінцевого конденсатора.

Конденсат, що утворився в усіх п'яти ступенях, самопливом перетікає в порожнину кінцевого конденсатора через гідрозатвори 23 (рис. 2.1), звідки черпаковим насосом подається в "холодний" контур.

Заповнення обсягу рідини у всіх ступенях відбувається автоматично шляхом підживлення вихідною рідиною з ємності 22 (рис. 2.5)

Надлишок конденсату в "холодному" контурі приводить до росту рівня рідини в порожнині кінцевого конденсатора. При затопленні черпака 4 (рис. 2.1) надлишок конденсату перетікає у збірник дистилляту-продукту 18 (рис. 2.5).

Закінчується цикл роботи дистиллятора по випарюванні певної кількості вихідної рідини, звичайно - 5 л. Термобатарей відключається, концентрат виштовхується вихідною рідиною з "гарячого" контуру в збірник концентрату 16.

2.4 Вимірювальні засоби

Вимірювальні засоби стенда являють собою наступне. Витрата рідин в зовнішніх контурах ("холодному" і "гарячому"), а також в лінії подачі охолодної води вимірюються витратомірами дросельного типу - ротаметрами 1, 3 й 14 з ціною розрізнення 1 кг/год.

Кількість вихідної рідини, що поступає на переробку, та кількість отриманого дистилляту-продукту визначаються за допомогою електронних ваг з ціною ділення 2 г в режимі "on line". За цими даними розраховуються значення продуктивності по вихідній рідині і дистилляту-продукту

Тиск (ступінь розрідження) в різних точках "холодного" і "гарячого" контуру вимірюється мановакуумметрами 5, 6, 12, 13 з межами вимірювання $-1 - +1,5$ і ціною ділення $2 \cdot 10^3$ Па ($2 \cdot 10^{-2}$ бар). Тиск в ресивері (на рис. 7.5 не показаний) вимірюється зразковим вакууметром класом точності 0,4 із ціною розрізнення $4 \cdot 10^2$ Па ($4 \cdot 10^{-3}$ бар). Перепади тиску на окремих ділянках розраховувались по показанням мановакуумметрів 5, 6, 12, 13.

Температури рідини й пари в елементах стенда вимірюється за допомогою термоелектричних датчиків - хромель-копелевих термопар, протарованих по лабораторному термометру із ціною розрізнення шкали $0,1^\circ\text{C}$; вторинним приладом служить електронний вольтметр "Прилад комбінований цифровий Щ301-1". Місця виміру температури показані на гідравлічній схемі стенда.

Солевміст дистилляту-продукту і упареного розчину вимірюється солемірами 4 і 15. Солеміри працюють на принципі вимірювання електропровідності рідини. Ціна розрізнення у

солеміра 4 в діапазоні 1-50 г/л – 0,5 г/л, в діапазоні 50 – 250 г/л – 5 г/л. Ціна розрізнення у солеміра 15 в діапазоні 1-999 мг/л – 1 мг/л.

Витрати електроенергії на привод дистилятора і на термоелектричну батарею розраховуються по показанням електронних вольтметра і амперметра.

Частота обертання ротора дистилятора визначається за допомогою лічильника імпульсів від датчика Холла з наступною обробкою сигналу і виведенням результату в числовому вигляді на монітор комп'ютера. Розпізнавальна спроможність метода складає 6 об/хв.

2.5 Висновки за розділом 2

В розділі 2 було розглянуто багатоступінчатий відцентровий вакуумний дистилятор на прикладі п'ятиступінчастого відцентрового вакуумного дистилятора розробленого в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Розглянутий апарат являється передовою, перспективною розробкою для систем життєзабезпечення космічних станцій. Були розглянуті принципова схема, конструкторська та принцип роботи апарату, основні технічні характеристики були зведені в таблицю 2.1.

В підрозділі 2.2 розглянуто термоелектричну батарею, яка є рушійною силою процесу дистиляції. За показником $\varphi_{\text{ТЕБ}}$ (коефіцієнт ефективності термоелектричної батареї) можна оцінити енергоефективність апарату в цілому. З рисунку 2.3 видно, що для збільшення енергетичної ефективності апарату необхідно зменшувати різницю температур на яку нагрівається потік рідини під час проходження через ТЕБ. При цьому, якщо при сталій потужності ТЕБ збільшувати масову витрату потоку рідини $\varphi_{\text{ТЕБ}}$ має тенденцію до зростання, що видно з рисунку 2.4. Отже, для максимальної енергоефективності треба зменшувати потужність ТЕБ, різницю температур потоку на вході та виході з ТЕБ та збільшувати масову витрату рідини. Для максимальної продуктивності підвищувати потужність ТЕБ, різницю температур потоку на вході та виході з ТЕБ та збільшувати масову витрату рідини.

При збільшенні масової витрати рідини ми неодмінно прийдемо до турбулентного режиму течії плівки на теплообмінній поверхні в зоні випару рідини (при числах $Re > 50$). Теплообмін при плівковому випаровуванні в зоні турбулентної течії плівки рідини на сьогодні вивчений недостатньо.

В розділі 3 розглянемо результати досліджень відцентрового вакуумного дистилятора для більш глибокого розуміння фізичних процесів, які відбуваються в подібних апаратах.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДЦЕНТРОВОГО ВАКУУМНОГО ДИСТИЛЯТОРА В ШТАТНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

3.1 Дослідження роботи дистилятора на воді

Проведення досліджень дистилятора, в яких вихідною рідиною використовувалась дистильована вода, через відсутність концентрування рідини в “гарячому” контурі можна віднести до налагоджувальних. При необхідності робота дистилятора на воді може бути безперервною і обмежуватись лише об’ємом ємності для дистиляту-продукту.

В цих дослідженнях відпрацьовувалися системи керування роботою дистилятора і термоелектричної батареї на різних режимах і перевірка їх електричних і гідравлічних параметрів.

На рис. 3.1 представлена отримана в цих дослідженнях типова картина зміни температури рідин “гарячого” і “холодного” контурів на вході і виході термоелектричної батареї в залежності від електричного навантаження на термобатарею. На рис. 3.2 приведена залежність електричної (теплової) потужності батареї від електричної напруги живлення.

На рис. 3.2 представлена типова картина зміни в часі температури рідини в різних точках зовнішніх контурів при роботі термодистилятора на воді при електричному навантаженні на термобатарею 213 Вт і частоті обертання ротора 1000 об/хв. Як видно з графіка, температура рідини в різних точках синхронно піднімається від початку процесу напевно за рахунок розігріву обладнання. Внаслідок того, що охолоджувана вода на вхід теплообмінника-охолоджувача була перекрита, показання термопар № 8 і № 9 – температура охолодної води на вході і виході теплообмінника - до 80-ї хвилини залишається незмінними.

На 80-й хвилині для запобігання подальшого підвищення температури в системі була включена охолодна вода, внаслідок чого температура рідини в контурах незначно знизилася і після 100-ї хвилини стабілізувалася.

На рис. 3.4 представлено характер зміни в часі продуктивності дистилятора по дистиляту-продукту і питомої витрати електроенергії в тому ж дослідженні. Як видно із графіка після виходу дистилятора на стабільний режим роботи його продуктивність коливалась в районі 3,5 л/год, а питома витрата енергії між 80 і 90 Вт·год/л.

По результатам проведених досліджень на воді була зроблена оцінка в першому приближенні коефіцієнтів теплопередачі в дистиляторі (рис. 3.5) для різних частот обертання ротора дистилятора і електричного навантаження на ТЕБ і визначений вплив частоти обертання ротора на продуктивність дистилятора по дистиляту-продукту (рис. 3.6). Як виходить з графіка на рис. 3.5, теплове навантаження на дистилятор (що є наслідком електричного навантаження на термобатарею) не виявило суттєвого впливу на теплопередачу в дистиляторі. І хоча більшим

значенням частоти обертання відповідають більші значення коефіцієнтів теплопередачі, розкид абсолютних значень величини K відносно середнього (по всім значенням K) не перевищує 15 %, що знаходиться в межах точності експерименту.

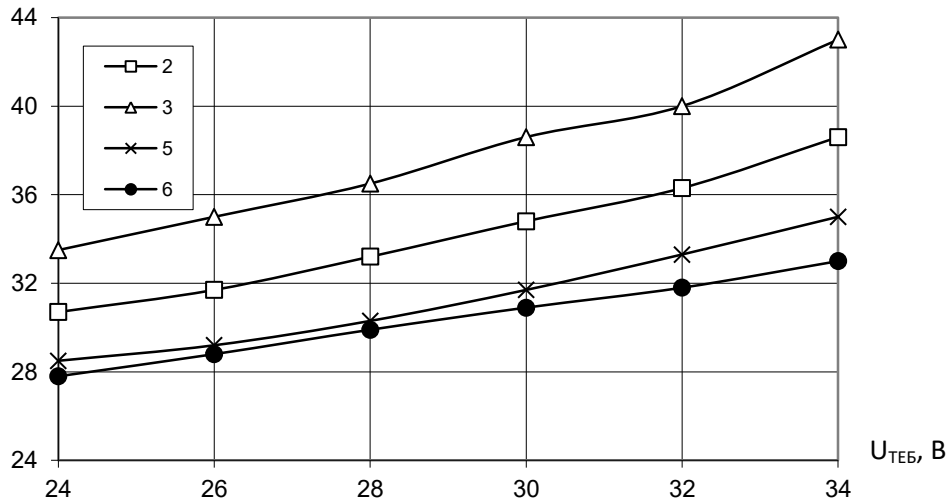


Рисунок 3.1 – Характер зміни температури рідини в різних точках стенда при зменшенні електричного навантаження на термобатарею ($n = 1000$ об/хв., робоча рідина – вода). Цифри на позначках відповідають номерам термопар (Т2-Т6) на рис. 2.5

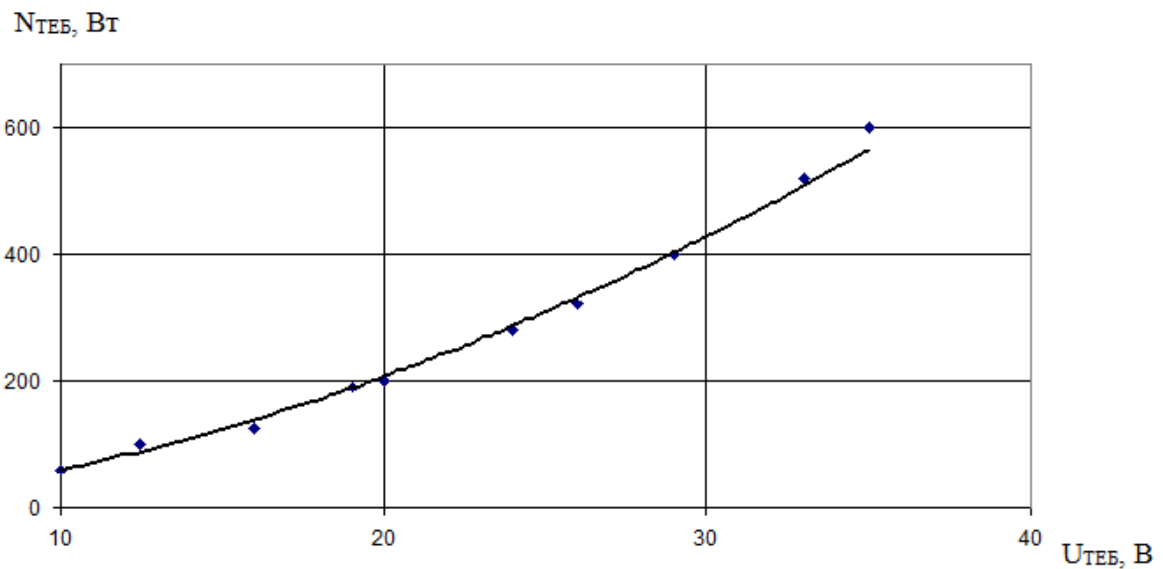


Рисунок 3.2 – Електрична характеристика термоелектричної батареї

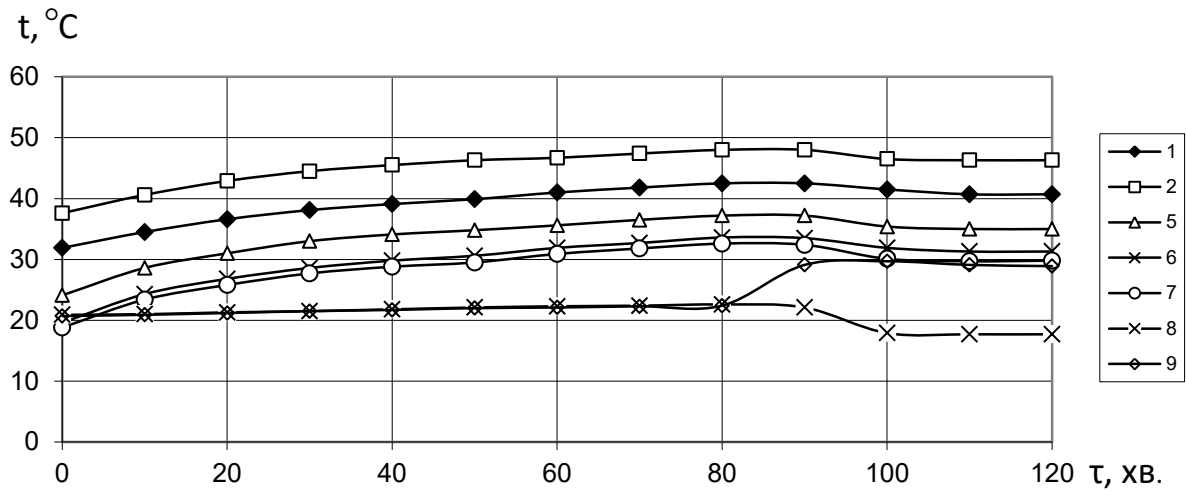
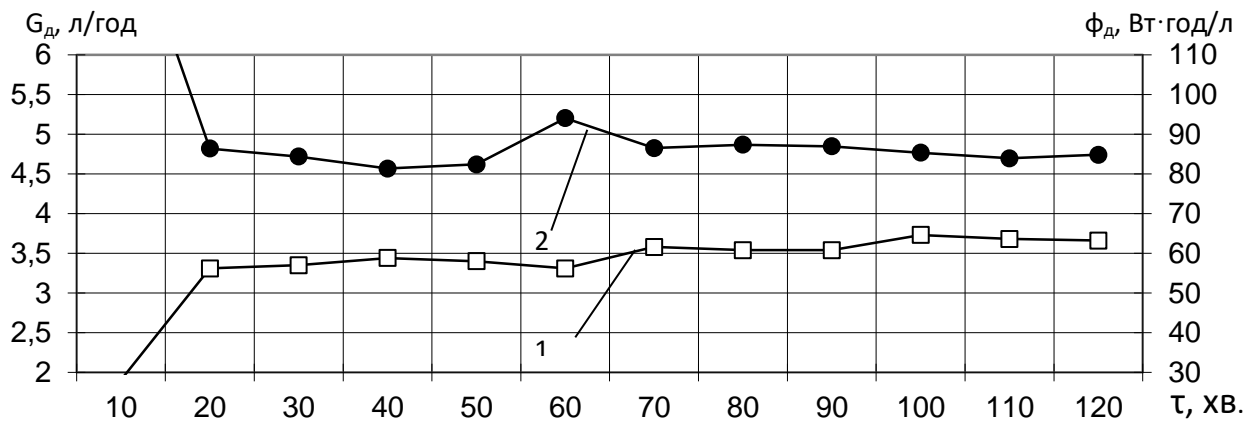


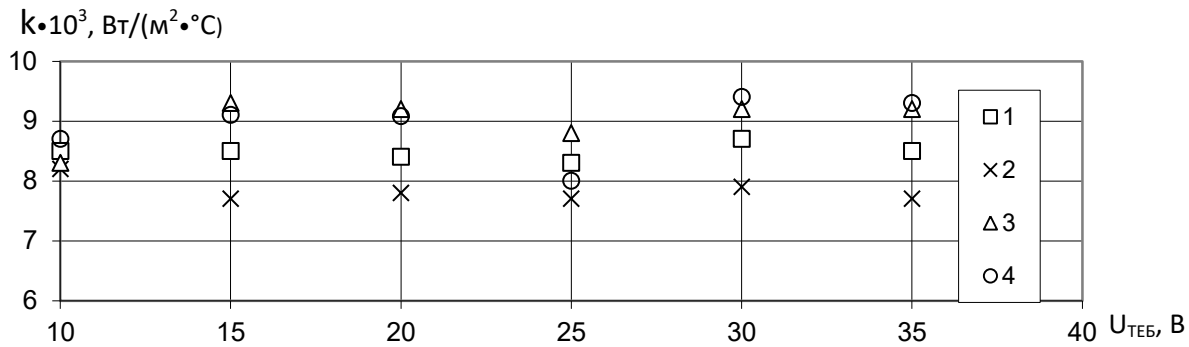
Рисунок 3.3 - Характер зміни в часі температури води в різних точках зовнішніх контурів при роботі дистильатора на воді, $N_{TEB}=213$ Вт. (В позначках номери термодатчиків на рисунку 2.5)



1 – продуктивність (G_d); 2 – питома витрата енергії (ϕ_d).

Рисунок 3.4 – Характер зміни в часі продуктивності дистильатора G_d і питомої витрати електричної енергії ϕ_d , при роботі дистильатора на воді. $N_{TEB}=213$ Вт

Дані на рис. 3.5 свідчать про суттєвий вплив частоти обертання ротора дистильатора на його продуктивність. При збільшенні частоти обертання в 1,6 рази продуктивність дистильатора збільшується більше ніж на 20 %, причому стабільний ріст має місце при всіх значеннях електричного навантаження на термобатарею. Причина цього росту полягає не стільки в збільшенні коефіцієнтів теплопередачі в дистильаторі (див. рис. 3.5), скільки в збільшенні масової швидкості рідини в зовнішніх контурах і, як наслідок, підвищення коефіцієнту ефективності термобатареї (див. рис. 2.4).



1 – $n = 850$ об/хв.; 2 – 1000; 3 – 1200; 4 – 1500.

Рисунок 3.5 – Коефіцієнт теплопередачі в дистилляторі при різних частотах обертання ротора (вихідна рідина – вода)

На рис. 3.7 наведені дані щодо питомої витрати електричної енергії на виробництво дистилляту-продукту шляхом випарування і наступної конденсації за допомогою відцентрового дистиллятора. Дані отримані на воді (вихідна рідина) в діапазоні зміни навантаження на термоелектричну батарею 150 – 460 Вт і в діапазоні зміни частоти обертання ротора 1000 – 1500 об/хв. Мінімальне значення питомої витрати енергії в цих випробуваннях зафіксоване на рівні 79,5 Вт·год/л при мінімальних значеннях електричного навантаження на термобатарею і частоті обертання ротора дистиллятора (150 Вт і 1000 об/хв відповідно). Як виходить із графіка на рис. 8.16, збільшення електричного навантаження на термобатарею (а відповідно - теплового навантаження на дистиллятор) призводить до деякого підвищення питомої витрати енергії, що напевно пов'язано із збільшенням теплових втрат в зовнішнє середовище при рості рівня температур теплоносіїв в контурах.

Від частоти обертання ротора дистиллятора питома витрата енергії залежить суттєво. З ростом частоти обертання збільшуються аеродинамічний опір, гідравлічний опір переміщенню рідини в зовнішніх каналах, опір обертанню в підшипниках. На рис. 3.8 залежність $\phi_d = f(n)$ представлена в явному вигляді. Ці дані отримані при електричному навантаженні на термоелектричну батарею 350 Вт. Із графіка видно, що при збільшенні частоти обертання від 1000 до 1500 об/хв питома витрата збільшується від 85 до майже 95 Вт·год/л.

3.2 Дослідження роботи дистиллятора на водному розчині солі NaCl

Як вже відзначалось, частина досліджень багатоступінчастого відцентрового дистиллятора проведена на водному розчині NaCl. Цей розчин було вирішено використовувати як імітатор урини в зв'язку із його високим показником температурної депресії, пов'язаної із зміною концентрації солі в розчині, а також маючи на увазі невисоку вартість солі і

доступність. Останній фактор відігравав не останню роль в зв'язку з тим, що отримання урини в необхідній кількості і її кондиціювання було пов'язано із певними технічними труднощами.

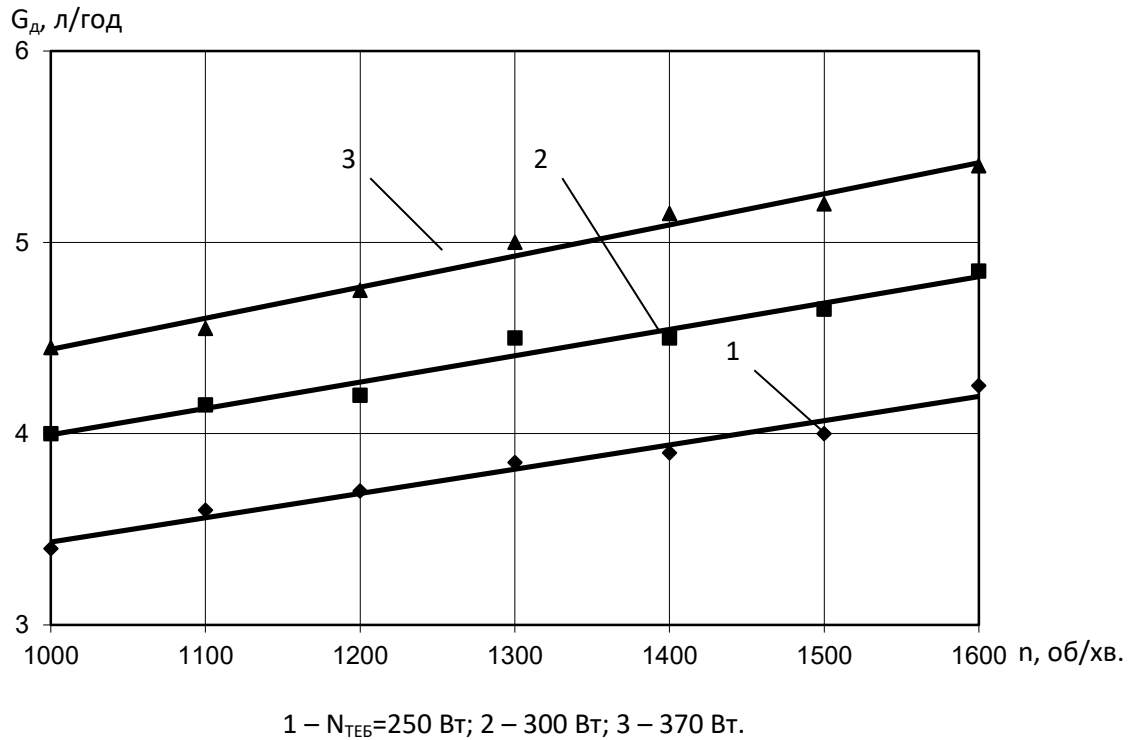
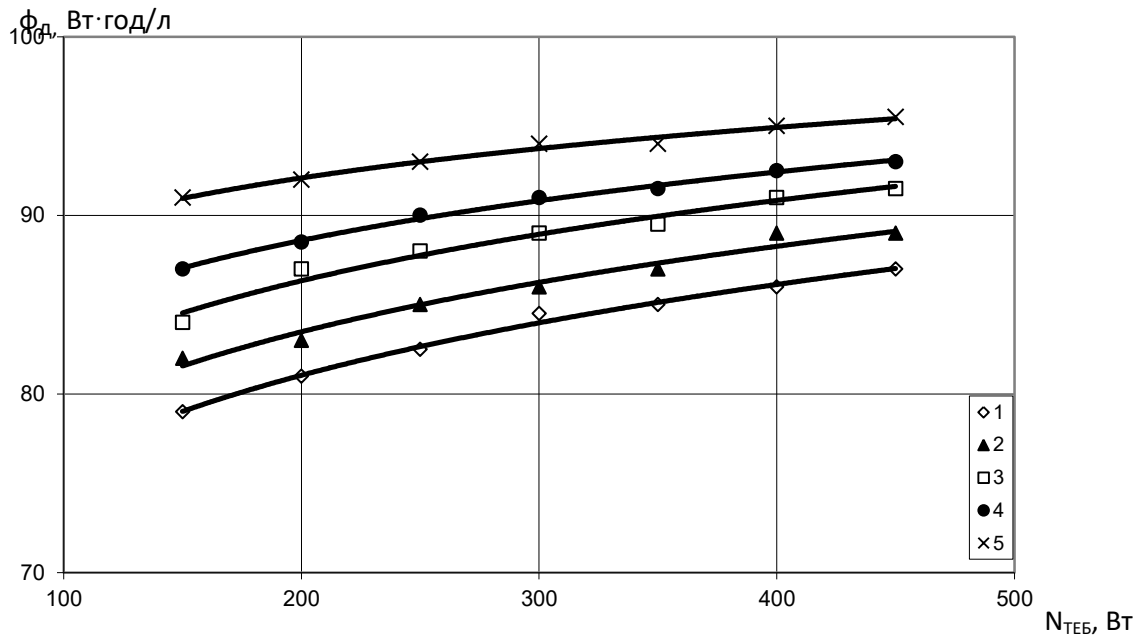


Рисунок 3.6 – Вплив частоти обертання ротора дистильатора на продуктивність дистильатора по дистильату продукту

Вихідна концентрація розчину NaCl складала 2 – 2,6 % (мас). Концентрації розчину 2,6 % відповідає температурна депресія 0,4 °С. По цьому показнику вихідний розчин NaCl відповідав урині з концентрацією 11 %. Процес упарювання - підвищення концентрації в “гарячому” контурі продовжувався до досягнення концентрації наприкінці циклу випарювання 17 – 20 %. При концентрації 20 % температурна депресія розчину складає 4,8 °С, що відповідає урині з концентрацією 47 % (рис. 3.9). Селевміст дистильату-продукту у всіх іспитах на розчині не перевищував 5 мг/л.



1- $n = 1000$ об/хв; 2 – 1200; 3 – 1300; 4 – 1400; 5 – 1500.

Рисунок 3.7 – Вплив електричного навантаження на термобатарей і частоти обертання ротора дистилятора на питому витрату енергії

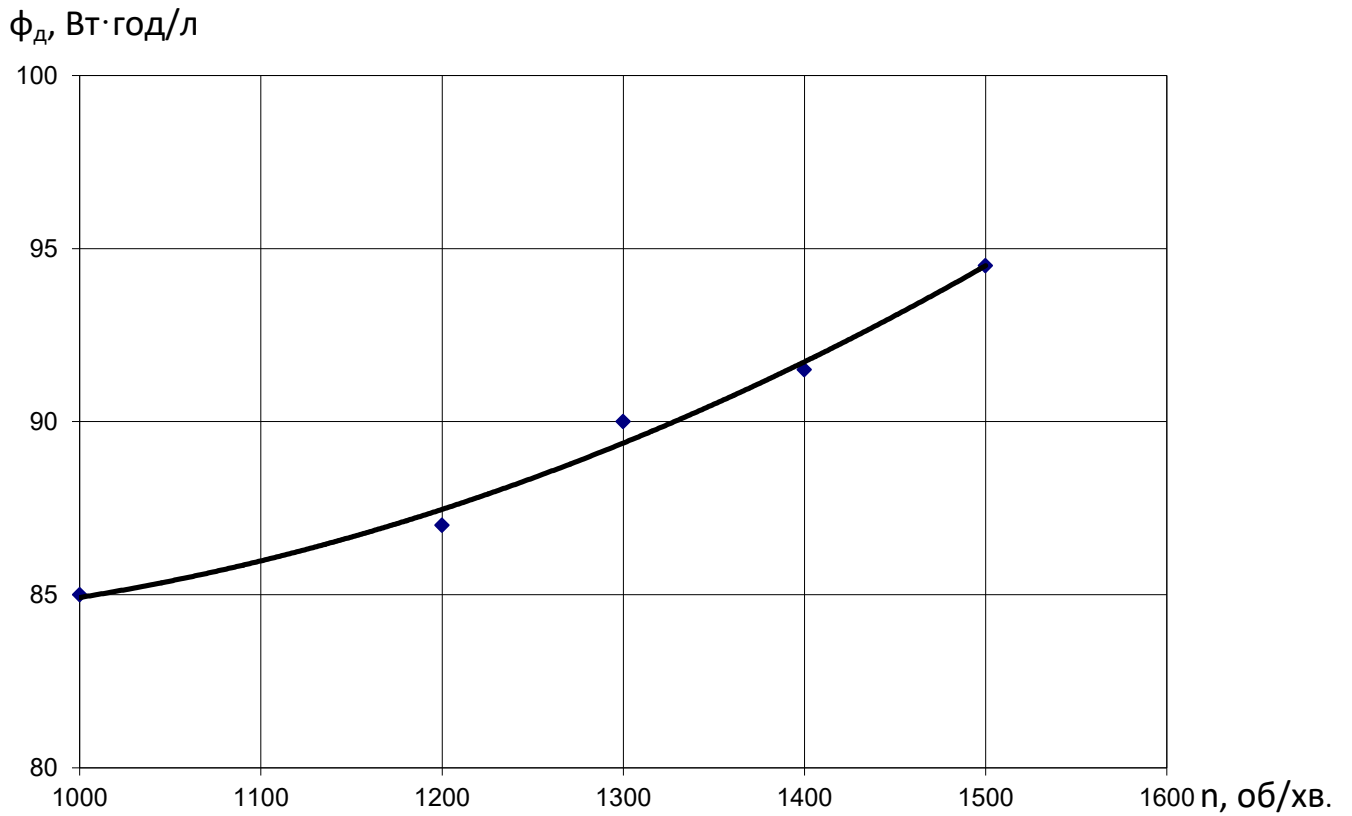


Рисунок 3.8 – Вплив частоти обертання ротора дистилятора на питому витрату енергії на ВВД-5. $N_{TEB} = 350 \text{ Вт}$

На рис. 3.10 приведенні результати досліджень багатоступінчастого відцентрового дистилятора проведена на розчині NaCl. Початкова концентрація солі складала 2,0 %, частота обертів ротора – 1000 об/хв, середня потужність споживання електроенергії термоелектричною батареєю – 270 Вт. За 60 хвилин було споживано 4578 г вихідної рідини - розчину NaCl (в тому числі 705 гр рідини, якою заповнюється весь “гарячий” контур і ступені дистилятора). За той же час було отримано 3746 гр дистиляту-продукту. Показник *REC* (recovery) – ступінь вилучення води із розчину склав величину 92 %, а кінцева концентрація $C_{КІН}$ в “гарячому” контурі на момент останнього заміру – 22,5 %.

Показники *REC* і $C_{КІН}$ підраховані за формулами відповідно:

$$REC = \frac{M_D}{M_D + M_{ГК}} \cdot 100, (\%), \quad (3.1)$$

$$C_{КІН} = \frac{(M_{ГК} + M_D)}{M_{ГК}} C_{Поч}, (\%), \quad (3.2)$$

де M_D – маса отриманого дистиляту-продукту;

$M_{ГК}$ - маса рідини в контурі концентрування (в “гарячому” контурі);

$C_{Поч}$ – початкова концентрація розчину, %.

При порівнянні даних на рис. 3.10 із подібними даними, отриманими при роботі дистилятора на воді, видно, що при майже однакових показниках по продуктивності дистилятора по дистиляту-продукту і частоті обертання ротора дистилятора питома витрата енергії на розчині NaCl в середньому на 9-10 відсотків вища від аналогічного показника на воді, що пояснюється декількома обставинами. По-перше, у розчина більша початкова питома вага ніж у води і ця різниця збільшується в процесі випарування, що потребує збільшення витрат енергії на транспорт рідини (розчину) по “гарячому” контуру. По-друге, при збільшенні питомої ваги рідини збільшується гідравлічний опір при її транспорті по “гарячому” контуру і, відповідно, при однаковій частоті обертання ротора, зменшується її витратна маса через термоелектричну батарею і, як наслідок, погіршується теплообмін на гарячій стороні батареї і падає коефіцієнта її ефективності. І по-третє, із-за наявності температурної депресії зростає температурний перепад в дистиляторі, тобто різниця між температурою рідини в “гарячому” контурі на вході в дистилятор і температурою конденсату на виході із дистилятора. Відповідно зростає і різниця температур між холодною і гарячою сторонами термоелектричної батареї, що також призводить до падіння коефіцієнта ефективності батареї.

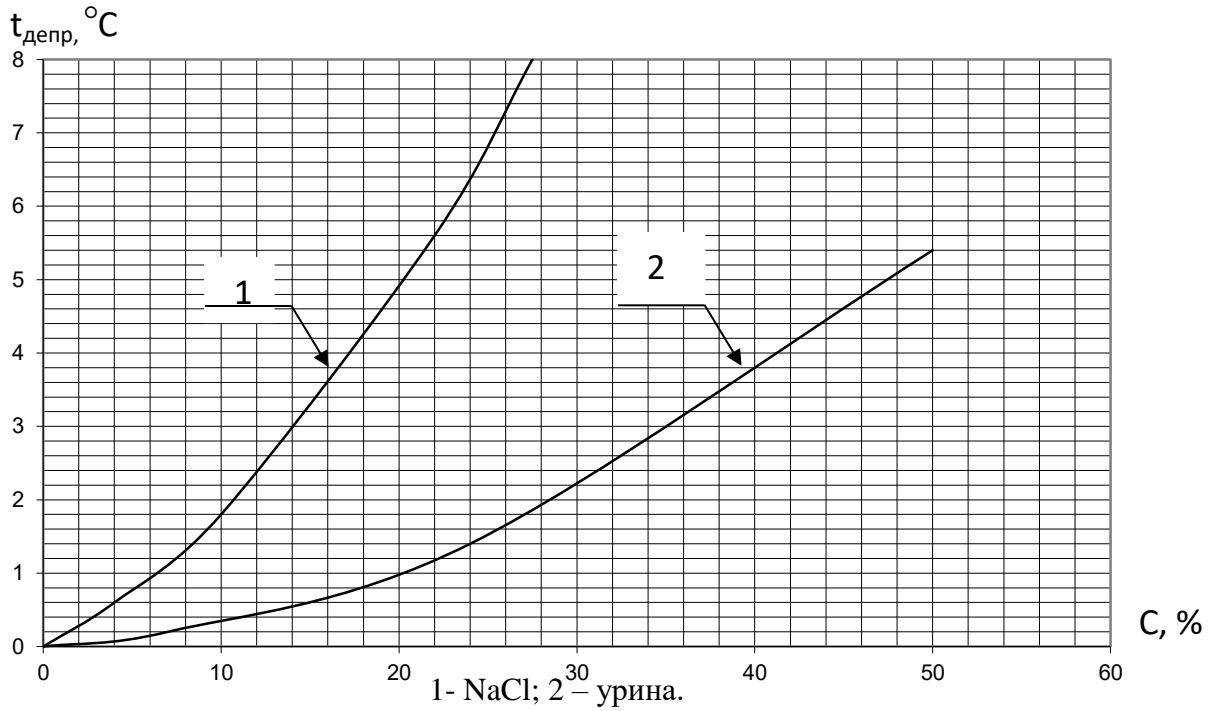


Рисунок 3.9 – Температурна депресія водного розчину NaCl і урини в залежності від концентрації [27]

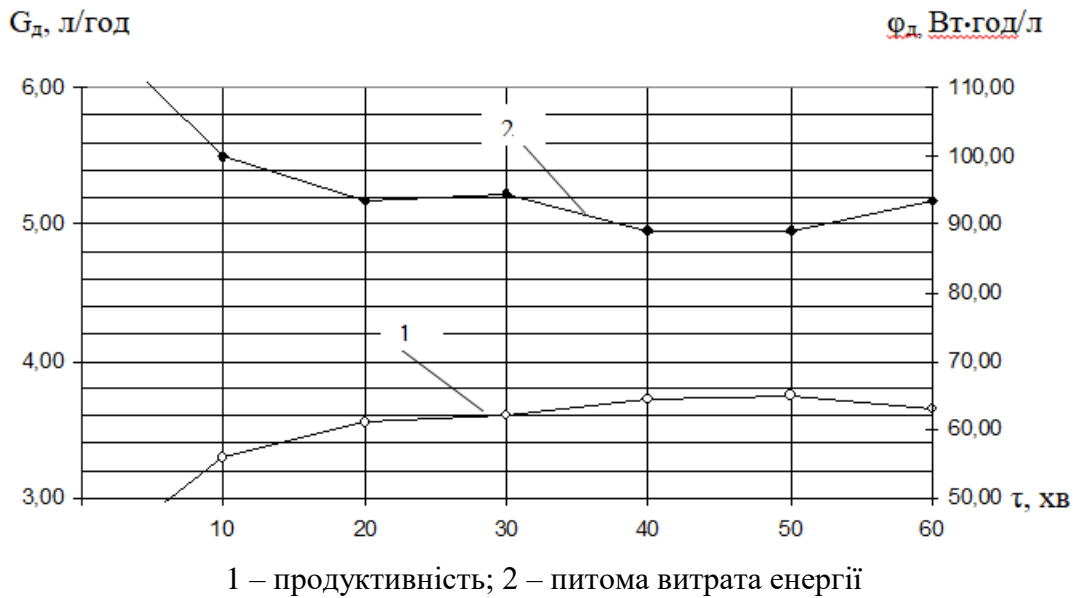


Рисунок 3.10 – Зміна в часі продуктивності і питомої витрати енергії при роботі дистилятора на розчинах NaCl: N_{ТЕБ}=270 Вт; n=1000 об/хв.

3.3 Дослідження роботи дистилятора на урині

Основний обсяг досліджень роботи дистилятора (більш 90 %) проведений при випарюванні урини.

Діапазон зміни параметрів роботи дистилятора :

- частота обертання ротора $n = 800-1200$ об/хв;
- електрична потужність, підведена до ТЕБ – $N_{\text{ТЕБ}} = 150-600$ Вт.

Основні задачі, що ставилися в ході досліджень - визначення оптимальних параметрів дистилятора і відпрацювання режиму його безупинної роботи.

Умови оптимізації стосовно до досліджуваного пристрою повинні бути наступними:

- забезпечення мінімальної витрати енергії при тривалому функціонуванні дистилятора;
- найкращі показники якості води;
- максимальна надійність.

На рис. 3.11 представлений характер зміни в часі продуктивності дистилятора в умовах різних теплових навантажень (електричних навантажень на ТЕБ) при частоті обертання ротора дистилятора $n = 800-1200$ об/хв.

Тривалість циклів роботи дистилятора при різних теплових навантаженнях обмежувалася практично однаковим значенням ступеня вилучення води – $REC \approx 90\%$. Тому, якщо при $N_{\text{ТЕБ}} = 150$ Вт тривалість циклу складала 95-98 хв, то при $N_{\text{ТЕБ}} = 400$ Вт цикл закінчувався на 60-64 хв, а при $N_{\text{ТЕБ}} = 600$ Вт ступінь вилучення води $REC = 89\%$ була досягнута на 54-й хв.

З рис. 3.11 випливає, що після деякого підйому продуктивності дистилятора, зв'язаного з виходом апарата на робочий режим, далі з часом відбувається зниження продуктивності, що є наслідком росту концентрації урини в одному циклі роботи дистилятора. З ростом концентрації урини збільшується в'язкість рідини, знижується її теплоємність і теплопровідність, знижується витрата рідини, що циркулює в контурі концентрування, росте температурна депресія. Усі ці фактори приводять до зниження інтенсивності теплообміну на тепловиділяючій стороні ТЕБ і росту температурного перепаду $\Delta T_{\text{ТЕБ}}$ між тепловиділяючою (гарячою) і теплопоглинаючою (холодною) сторонами ТЕБ і, як наслідок, до погіршення термоелектричних характеристик ТЕБ.

З ростом електричного навантаження $N_{\text{ТЕБ}}$ на термобатарею $\Delta T_{\text{ТЕБ}}$ також збільшується. У результаті коефіцієнт ефективності ТЕБ $\phi_{\text{ТЕБ}}$ з ростом концентрації урини і збільшенням підведеної електричної потужності до ТЕБ падає (рис. 3.12 і 3.13).

Таким чином, величина коефіцієнта ефективності ТЕБ – ϕ_d є вирішальним чинником, що визначає питому витрату енергії комплексу “Багатоступінчастий відцентровий вакуумний дистилятор + термоелектрична батарея”.

Найменше значення величини ϕ_d , що дорівнює 68,2 Вт·год/л, мало місце при $n = 800$ об/хв і $N_{\text{ТНР}} = 150$ Вт. Продуктивність дистилятора при цьому дорівнювала 2,6 л/год. Для порівняння: 3-х ступінчастий дистилятор при аналогічній продуктивності мав $\phi_d = 130...140$ Вт·год/л [2-4].

Максимальна продуктивність G_d , що дорівнює 6,6 л/год, отримана в початковий період роботи дистилятора в режимі $N_{\text{ТНР}} = 600$ Вт і $n = 1100$ об/хв (рис. 3.11). Однак потім впливало значне, більш круте, чим в інших режимах, падіння продуктивності (при $REC = 89\%$ G_d не перевищувало 5,35 л/год) і досить крутий ріст величини φ_d (рис. 3.14).

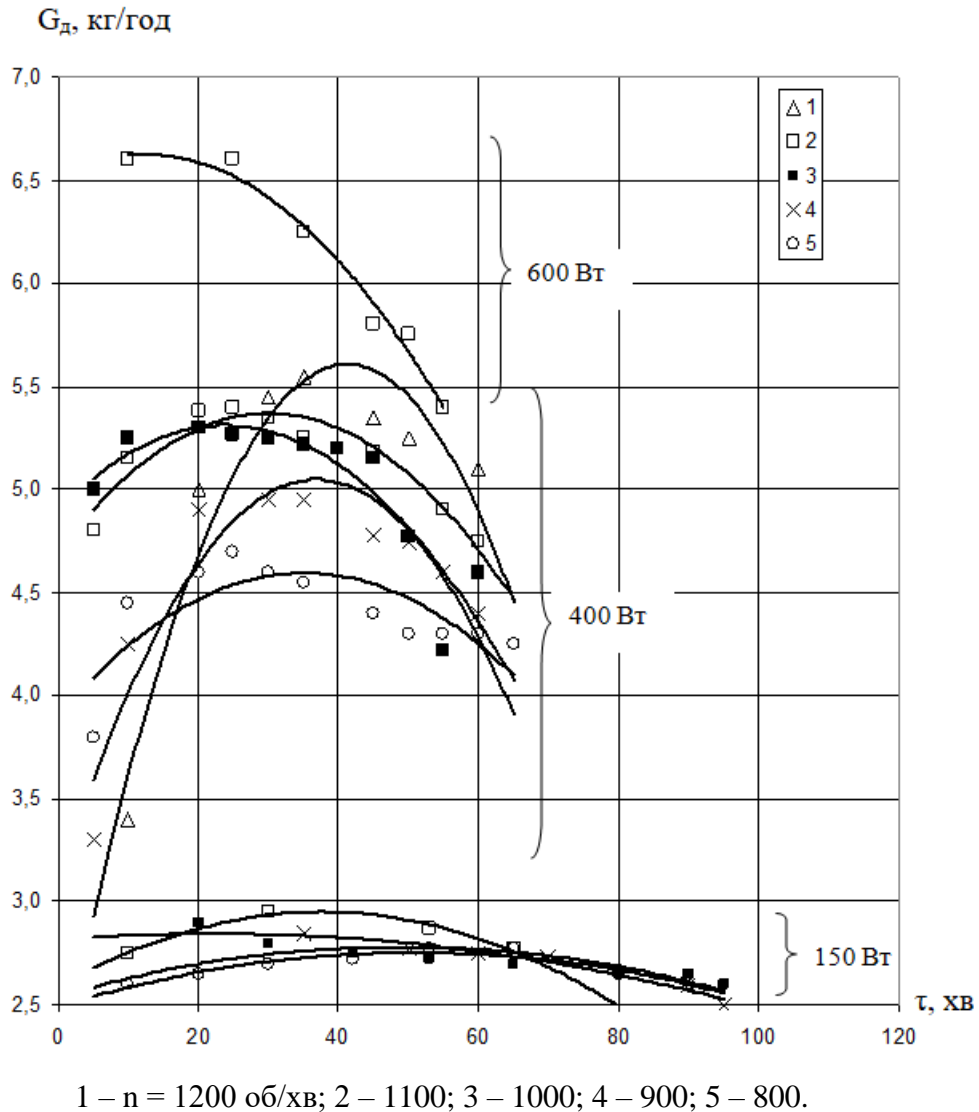


Рисунок 3.11 – Характер зміни у часі продуктивності дистилятора в залежності від частоти обертання ротора і електричної потужності, підведеної до ТЕБ, при роботі дистилятора на урині

З урахуванням приведених результатів іспитів, а також виходячи з того, що зі зниженням частоти обертання ротора дистилятора поліпшуються такі параметри надійності, як ресурс підшипників, герметизація приводних моторів і шумові характеристики, найбільш прийнятним

варіантом режиму роботи ВВД-5 варто визнати частоту обертання ротора $n = 900 \dots 1000$ об/хв при підведеній потужності $N_{\text{ТНР}} = 300 \dots 400$ Вт.

У таблиці 3.1 представлені порівняльні дані по основних відомих системах регенерації урини, що використовують відцентрову вакуумну дистиляцію.

Таблиця 3.1 - Порівняння параметрів різних систем відцентрової вакуумної дистиляції

Система регенерації	Маса, кг	Питома витрата енергії, Вт·год /л
Одноступінчастий ВД із зовнішнім паровим компресором [1]	150	150
Одноступінчастий ВД із встроєною ТЕБ [2]	38	400
Одноступінчастий ВД із встроєним паровим ежектором [2]	45	600
Трьохступінчастий ВД із зовнішньою ТЕБ [2]	55	150
П'ятиступінчастий ВД із зовнішньою ТЕБ	25	< 100

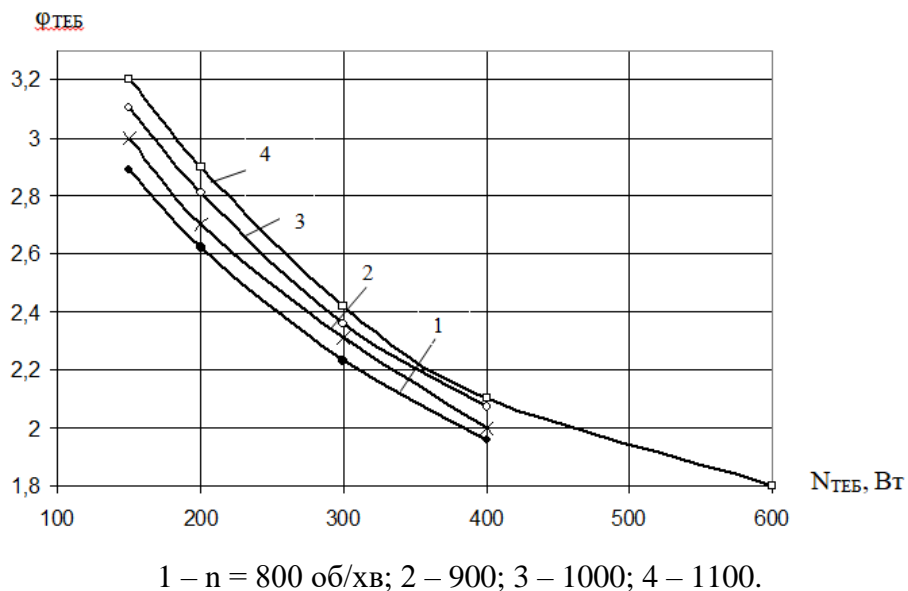


Рисунок 3.12 – Вплив електричної потужності ТЕБ і частоти обертання ротора на ефективність ТЕБ

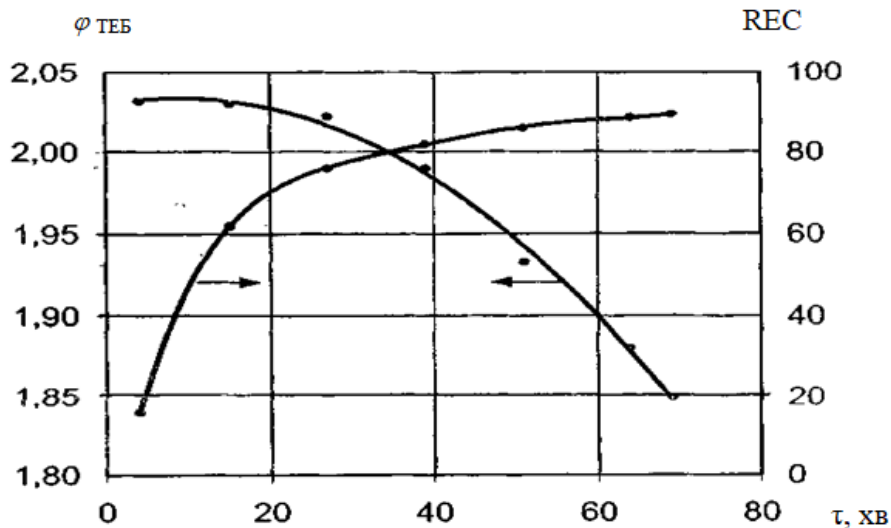
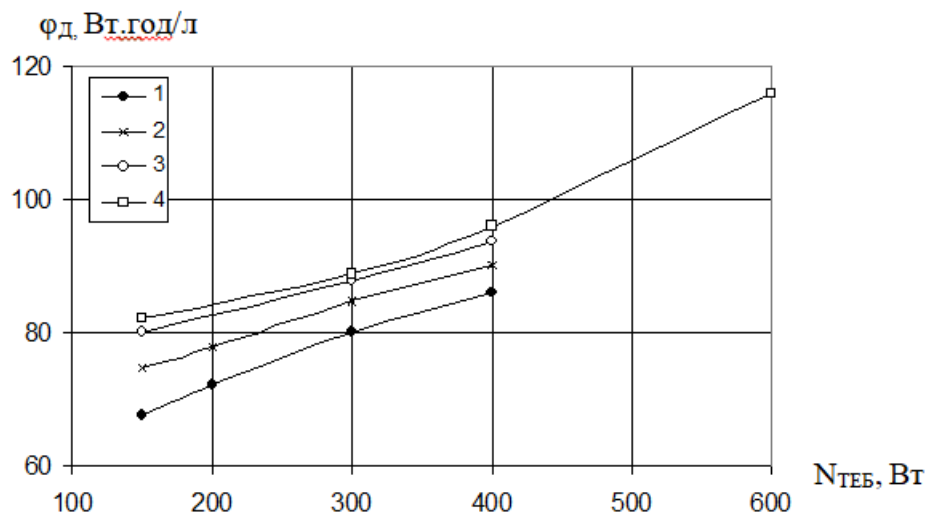


Рисунок 3.13 – Характер зміни ефективності ТЕБ в процесі роботи дистиллятора на урині при перемінному значенні REC



1 – 800 об/хв; 2 – 900 об/хв; 3 – 1000 об/хв; 4 – 1100 об/хв.

Рисунок 3.14 – Вплив електричної потужності, підведеної до ТЕБ, і частоти обертання ротора на питому витрату енергії. (Значення ϕ_d - середнє за цикл при REC = 10 – 90 %)

Таким чином, у результаті випробувань п'ятиступінчастого дистиллятора ВВД-5 у комплексі з термоелектричною батареєю «Алтек 7001» установлено, що при загальній масі (ВВД-5 + «Алтек 7001») 25 кг і номінальній продуктивності 5 л/ч розроблений дистиллятор має найменшу серед пристроїв подібного типу питому витрату енергії. Причому, цей параметр може бути істотно поліпшений за рахунок удосконалення термоелектричної батареї і гідравлічних параметрів зовнішніх контурів.

3.4 Висновки за розділом 3

В розділі 3 були приведені результати експериментального дослідження вакуумного дистилятора в штатних режимах роботи. Результати експерименту з водою показують наступну залежність, при збільшенні частоти обертання диска в 1,6 разів продуктивність дистилятора зростає більше ніж на 20%, причому стабільний ріст має спостерігатися при всіх значеннях електричного навантаження на батарею. Причина росту полягає не стільки в збільшенні коефіцієнта теплопередачі, скільки в зростанні масової швидкості в зовнішніх контурах, що в свою чергу призводить до підвищення коефіцієнту ефективності ТЕБ, хоча ріст коефіцієнту теплопередачі також має місце. Цей результат спостерігається як в експерименті з водою, так і з розчином NaCl та з уриною, з поправкою на їх фізичні властивості, а саме, в першу чергу, на температурну депресію.

Враховуючи те, що експерименти проводились при ламінарній течії плівки що випаровується, можна припустити, що при збільшенні частоти обертання та масового потоку коефіцієнт теплопередачі буде зростати, але не суттєво, як це видно з рисунку 3.5, до того моменту, поки течія плівки не перейде в турбулентний режим.

4 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ГІДРОДИНАМІКИ Й ТЕПЛООБМІНУ ПРИ КОНДЕНСАЦІЇ І ПАРОТВОРЕННІ В ПЛІВЦІ РІДИНИ НА ПОВЕРХНІ, ЩО ОБЕРТАЄТЬСЯ

Багатоступінчастий відцентровий дистилятор із зовнішнім джерелом теплоти у вигляді електричного нагрівача або термоелектричної батареї є, по суті, опріснювальною установкою. Для визначення параметрів такої установки необхідні тепловий розрахунок і розрахунок концентрацій по ступенях.

Ефективність такої установки залежить від інтенсивності тепломасообмінних процесів, що протікають в дистиляторі, схеми руху потоків й ефективності термобатареї.

Для розрахунку тепломасообміну в дистиляторі необхідно знання гідродинамічних характеристик плівки й коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації пари й паротворенні рідини на обертовій поверхні.

4.1 Гідродинаміка плівки рідини на обертовій поверхні

Процеси випарювання рідини й конденсації пари в дистиляторі здійснюються на теплообмінних поверхнях, що обертаються, виконаних у формі диска, конуса або циліндра (рис. 4.1).

Основними гідродинамічними параметрами плівки рідини, що змочує поверхню обертання, є її середня товщина й швидкість плинину. При цьому необхідно знання величини мінімальної витрати рідини, при якому забезпечується змочування рідиною всієї поверхні теплообміну.

Середня швидкість плинину рідкої плівки \bar{w}_f розраховується по формулі:

$$\bar{w}_f = \frac{G_f}{2\pi\bar{\delta}_f\rho_f R} \quad (4.1)$$

де G_f – масова витрата рідини, кг/с;

$\bar{\delta}_f$ – середня товщина плівки, м;

ρ_f – густина плівки, кг/м³;

R – радіус диску, м.

До початку робіт у КПІ по теоретичному дослідженню гідродинаміки плівки рідини в літературі була інформація лише по визначенню середньої товщини плівки, що ламінарно розтікається по обертовому диску. При цьому експериментальні дослідження локальних і середніх товщин плівки мали суперечливий характер і були нечисленні [6-8]

Вперше рівняння для середньої товщини рідкої плівки було отримано для випадку ламінарного потоку вперше отримали Гінзе та Мілборн [6]:

$$\delta = \left(\frac{3}{2\pi} \frac{Q\nu}{R^2\omega^2} \right)^{1/3} \quad (4.2)$$

де Q – тепловий потік, Вт;

ν - кінематичний коефіцієнт в'язкості, м³/кг;

R – радіус диска, м;

w – швидкість плинину плівки, м/с.

Виміру локальних товщин плівки δ_f методом електропровідності [7-10] проводилися в КПІ з 1978 по 1984 р.. Дослідження показали, що при ламінарному плинину плівки рідини, тобто при $Re_f < 50$ (де $Re_f = G_f / 2\pi R \nu_f \rho_f$) експериментальні значення середньої товщини плівки рідини можуть бути визначені по формулі:

$$\bar{\delta}_f = 0.65R \left(\frac{G_f \nu_f}{\rho_f \omega^2 R^5} \right)^{1/3} \quad (4.3)$$

де R – радіус диска, м;

G_f – масова витрата плівки, кг/с;

ν_f - кінематичний коефіцієнт в'язкості плівки, м³/кг;

ρ_f - густина плівки, кг/м³;

w – швидкість плинину плівки, м/с;

R – радіус диску, м.

При $Re_f > 50$ товщина плівки рідини змінюється за законом, характерному для турбулентного плинину плівки під дією сил гравітації, і визначається по формулі:

$$\bar{\delta}_f = 0.43 \left(\frac{\nu_f^2}{\omega^2 R} \right)^{1/3} Re_f^{0.66} \quad (4.4)$$

де ν_f - кінематичний коефіцієнт в'язкості плівки, м³/кг;

w – швидкість плинину плівки, м/с;

R – радіус диску, м.

Re – число Рейнольдса.

Витрата рідини, що подається на обертову теплообмінну поверхню, повинна перевищувати те мінімальне значення G_{\min} , нижче якого можливий розрив суцільної плівки під дією сил поверхневого натягу. У випадку розриву плівки плинину рідини на обертовій поверхні буде

струминним. У випадку випарювання рідини з наявністю в ній розчинених солей почнеться інтенсивне відкладення солей на осушеній частині поверхні.

Дослідження змочування плівкою рідини обертових поверхонь, проведені на воді [9, 11, 12], показали, що для металевих поверхонь (титан, нержавіюча сталь, латунь, мідь, алюміній) розрив плівки рідини відбувається при її товщині, меншої величини, обумовленої рівнянням:

$$\delta_{\min} = 10 \left(\frac{\sigma_f v_f^2}{\rho_f \omega^4 R^2} \right)^{0.25} . \quad (4.5)$$

де σ_f – коефіцієнт поверхневого натягу плівки Дж/м²;

v_f - кінематичний коефіцієнт в'язкості плівки м³/кг;

ρ_f - густина плівки кг/м³;

w – швидкість плинину плівки м/с;

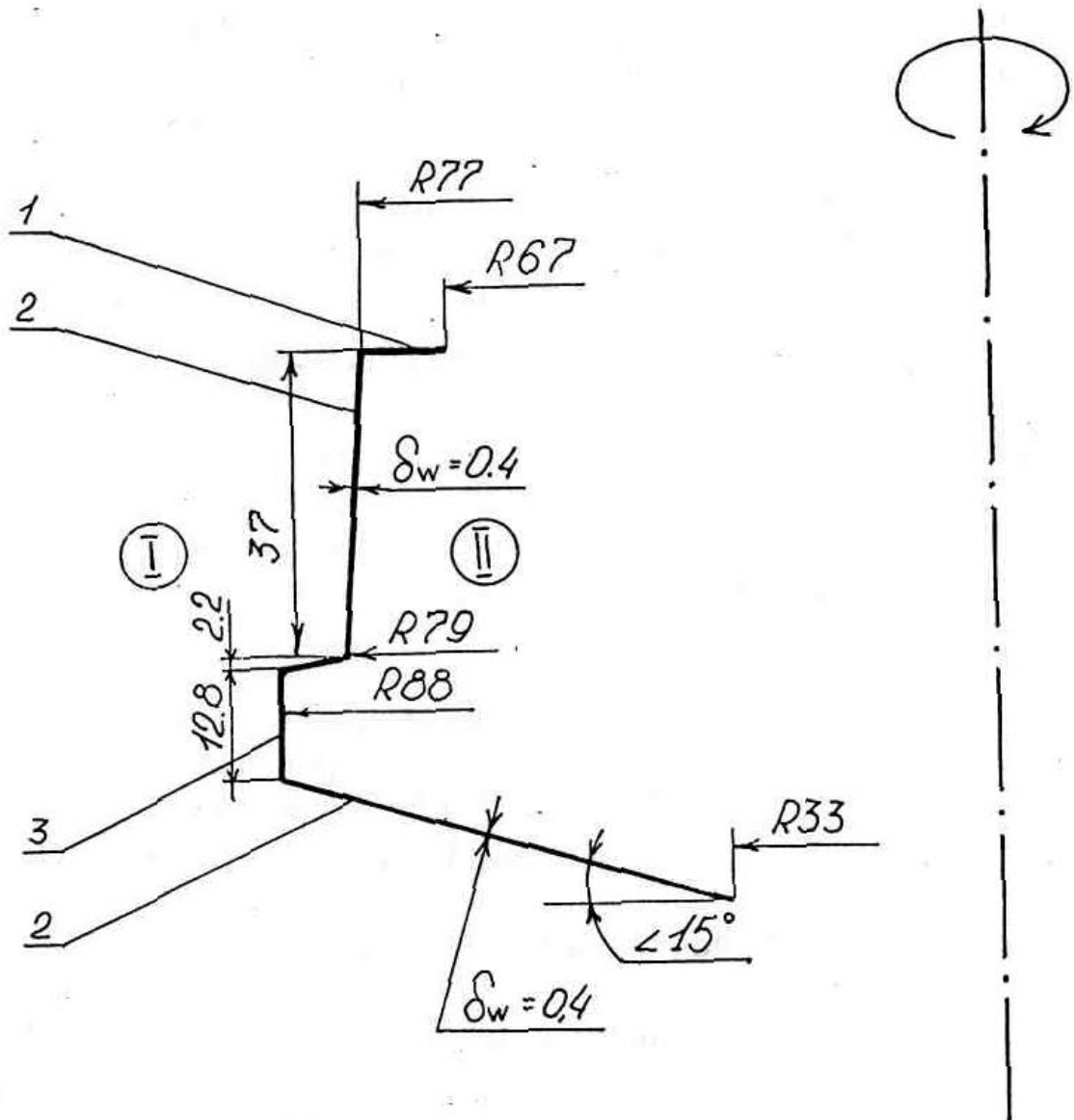
R – радіус диску м.

Для розрахунку величини тієї мінімальної витрати рідини, при якому вже змочується вся обертова поверхня, необхідно розраховану по формулі (4.5) величину δ_{\min} підставити в рівняння (4.2) і визначити з його допомогою величину G_{\min} , що і буде величиною $G_{f \min}$.

4.2 Геометрія теплообмінної поверхні

На рис. 4.1 представлена геометрія теплообмінної поверхні багатоступінчастого дистилятора й її розміри для трьохступінчастого варіанта апарата, виготовленого в КПІ.

Процес випару рідини проходить на внутрішній стороні обертової теплообмінної поверхні, що складається з дискової, конусної й циліндричної частин, а конденсація - на її зовнішній стороні.



де I - зона конденсації; II - зона випару; 1 - дискова частина; 2 - конусна частина; 3 - циліндрична частина.

Рисунок 4.1 - Геометрія теплообмінної поверхні трьохступінчастого дистилятора

4.3 Тепловіддача при конденсації пари на обертовій поверхні

У роботах [3, 4, 11 - 13] наведені теоретичні й експериментальні дослідження конденсації на обертовому диску. Експериментальні дані в [6] розходилися з теоретичними з [12]. У дисертації Риферта В. Г. [13] показано, що це є наслідком неточності у вимірі температури поверхні обертового диска. В [14] описано пристрій, що дозволяє досить точно виміряти температуру обертових поверхонь.

На основі дослідних даних отримано розрахункові залежності для визначення коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації чистої пари на обертовій поверхні. Середній коефіцієнт тепловіддачі на поверхні обертового диска визначається за допомогою залежності з [3, 4], що практично збігається з теоретичної з [12]:

$$\bar{Nu}_f = 0.87 \left(Pr_f \cdot K \cdot Ga_R \right)^{0.25}, \quad (4.5)$$

$$\text{де числа подібності: } \bar{Nu}_f = \frac{\bar{\alpha}_{disk} \cdot R}{\lambda_f}; \quad Pr = \frac{\nu_f}{a_f}; \quad K = \frac{r}{c_p \Delta T}; \quad Ga_R = \frac{\omega^2 R^4}{\nu_f^2}.$$

де \bar{Nu}_f - число Нуссельта;

Pr – число Прандля;

K – критерій фазового переходу;

Ga_R - число Галілея;

$\bar{\alpha}_{disk}$ - середній коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні обертового диска, Вт/(м²·К);

R – радіус диску, м;

λ_f - коефіцієнт теплопровідності плівки, Вт/(м·К);

ν_f - кінематичний коефіцієнт в'язкості плівки, м³/кг;

a_f - коефіцієнт термічної дифузії, м²/с;

Середній коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні обертового конуса можна розрахувати по формулі з [15]:

$$\bar{\alpha}_{con} = \bar{\alpha}_{disk} \sqrt{\sin \beta}, \quad (4.6)$$

де β – кут нахилу утворюючої конусу до його осі обертання теплообмінної поверхні;

$\bar{\alpha}_{disk}$ - середній коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні обертового диска, Вт/(м²·К).

Число Нуссельта для циліндричних обертових поверхонь:

$$\bar{Nu}_{cyl} = 1.13 \left(Pr_f \cdot K \cdot Ga_R \right)^{0.25}. \quad (4.7)$$

де Pr – число Прандля;

K – критерій фазового переходу;

Ga_R - число Галілея.

4.4 Тепловіддача при конденсації пари на плівці рідини

Процес конденсації пари з парогазової суміші на обертовій плівці рідини відбувається на виході пари з останнього ступеня дистилятора. Охолоджуюча рідина подається на обертову дискову поверхню, і пара конденсується, безпосередньо контактуючи із плівкою рідини. У роботах [16-17] досліджувався процес конденсації водяної пари на обертовому диску й конусі.

В [13] результати експериментальних досліджень [16, 18] узагальнені залежністю:

$$Nu_f = 0.108 \cdot Re_f^{0.52} \cdot Pr_f^{0.45}, \quad (4.8)$$

$$\text{де } Nu_f = \frac{\bar{\alpha}}{\lambda_f} \left(\frac{v_f}{\omega} \right)^{0.5};$$

Re_f - число Ренольдса;

Pr_f - число Прандля;

$\bar{\alpha}$ - середній коефіцієнт тепловіддачі від водяної пари до плівки охолоджувача Вт/(м²·К);

λ_f - коефіцієнт теплопровідності плівки, Вт/(м·К);

v_f - кінематичний коефіцієнт в'язкості плівки, м³/кг;

ω - швидкість плинину плівки, м/с.

Площа поверхні, необхідної для конденсації пари на плівці охолоджувача, розраховується по формулі:

$$F_c = \frac{Q}{\bar{\alpha} \cdot \Delta T} = \frac{r \cdot G_{ste}}{\bar{\alpha} \cdot \Delta T}, \quad (4.9)$$

де Q – тепловий потік, Вт;

$\bar{\alpha}$ - середній коефіцієнт тепловіддачі від водяної пари до плівки охолоджувача Вт/(м²·К);

ΔT - різниця температур, К;

r - теплота паротворення, Дж;

G_{ste} - продуктивність останнього ступеня дистилятора по парі.

4.5 Тепловіддача при паротворенні в плівці рідини на обертовій поверхні

Результати експериментальних і теоретичних досліджень процесу паротворення в рідині на обертових поверхнях представлені в роботах [3, 19, 20].

Середній коефіцієнт тепловіддачі на обертовому диску при ламінарному плинні по ньому плівки рідини ($Re_f < 50$) визначається згідно [3] із залежності:

$$\bar{Nu}_f = 0.42 \frac{K}{\left(1 - \frac{K}{2}\right)^{4/3}} f\left(\frac{R_{in}}{R_{out}}\right) \cdot Re_f^{-1/3}, \quad (4.10)$$

де: $\bar{Nu}_f = \frac{\bar{\alpha}}{\lambda_f} \left(\frac{v_f^2}{\omega^2 R_{out}}\right)^{1/3}$ - число Нуссельта;

$K = \frac{2q\pi(R_{in}^2 - R_{out}^2)}{r \cdot G_f}$ - критерій фазового переходу;

$f\left(\frac{R_{in}}{R_{out}}\right) = \frac{1 - \left(\frac{R_{in}}{R_{out}}\right)^{8/3}}{1 - \left(\frac{R_{in}}{R_{out}}\right)^2}$ - безрозмірний комплекс;

$Re_f = \frac{G_f}{2\pi R_{out} \rho_f v_f}$ - число Рейнольдса;

R_{in} - радіус початку зрошення диска, м;

R_{out} - повний радіус диска, м;

$\bar{\alpha}$ - середній коефіцієнт тепловіддачі від водяної пари до плівки охолоджувача Вт/(м²·К);

λ_f - коефіцієнт теплопровідності плівки, Вт/(м·К);

v_f - кінематичний коефіцієнт в'язкості плівки, м³/кг;

w - швидкість плинну плівки, м/с;

q - Тепловий потік, Вт/(м²·К);

r - теплота паротворення, Дж;

G_f - масова витрата рідини, кг/с;

ρ_f - густина потоку плівки, кг/м³.

При $Re_f > 50$, тобто при турбулентному плинні плівки рідини, середній коефіцієнт тепловіддачі на поверхні диска визначається по формулі [25]:

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_l \frac{R_{in}^2 - R_{out}^2}{R_{out}^2} + \bar{\alpha}_t \frac{R_{kr}^2}{R_{out}^2}. \quad (4.11)$$

де $\bar{\alpha}_l$ - середній коефіцієнт тепловіддачі при ламінарному руху плівки, Вт/(м²·К);

$\bar{\alpha}_t$ - середній коефіцієнт тепловіддачі при турбулентному руху плівки, Вт/(м²·К);

Ламінарна складова розраховує по (4.10) з урахуванням того, що при визначенні К

приймається: $R_{in} = R_{kr}$ і $Re_f = \frac{G_f - q\pi \frac{R_{kr}^2}{r}}{2\pi R_{out} v_f \rho_f}$; R_{kr} - критичне значення радіуса, на якому ламінарний

плин плівки переходить у турбулентне, що відбувається при русі плівки в напрямку від центра обертання до периферії; $\bar{\alpha}_t$ - турбулентна складова, визначається по формулі:

$$\bar{\alpha}_t = \frac{1}{F_{kr} - F_{in}} \int_{F_{in}}^{F_{kr}} \alpha_t dF. \quad (4.12)$$

де F_{kr} - площа на якій буде ламінарний характер плин плівки, м²;

F_{in} - площа яку змочує плівка, м²;

У формулі (4.12) локальне значення α_t визначається із залежності:

$$\frac{\alpha_t}{\lambda_f} \left(\frac{v_f^2}{\omega^2 R} \right)^{1/3} = \frac{0.4 \cdot Pr_f \eta_\delta^{1/3}}{\ln \frac{\sqrt{\eta_\delta} + \sqrt{\eta_\delta - 11.6}}{\sqrt{\eta_\delta} - \sqrt{\eta_\delta - 11.6}} + 4.65 Pr_f}. \quad (4.13)$$

де α_t - коефіцієнт тепловіддачі при турбулентному руху плівки, Вт/(м²·К);

λ_f - коефіцієнт теплопровідності плівки, Вт/(м·К);

v_f - кінематичний коефіцієнт в'язкості плівки, м³/кг;

w - швидкість плин плівки, м/с;

R - радіус диску, м;

Pr - число Прандтля;

η_δ - безрозмірний коефіцієнт.

Зв'язок безрозмірного параметра плівки $\eta_\delta = \frac{(\omega^2 R)^{1/2} \delta_f^{3/2}}{v_f}$ й числа Re_f наступний:

$$Re_f = \frac{G_f - q\pi R^2}{2\pi R v_f \rho_f r} = \eta_\delta (3.0 + 2.5 \ln \eta_\delta) - 39. \quad (4.14)$$

де G_f - масова витрата плівки, кг/с;

q - густина теплового потoku, Вт/м²;

R - радіус диску, м;

ν_f - кінематичний коефіцієнт в'язкості плівки, м³/кг;

ρ_f - густина потоку плівки, кг/м³;

r - теплота паротворення, Дж;

η_δ - безрозмірний коефіцієнт.

Із залежності (4.14) можна визначити величину R_{kr} , якщо в ліву частину її підставити $Re_f = 50$.

Для розрахунку тепловіддачі на обертовому конусі при значенні кута між утворюючої конуса й віссю обертання $\beta \geq 5^\circ$ необхідно значення коефіцієнтів тепловіддачі, розрахованих по (4.11), помножити на $\sin(\beta)^{1/3}$.

Випар рідини на внутрішній поверхні обертового циліндра відбувається в товстих плівках. Дослідження подібного процесу у відомих нам роботах відсутні. Зважаючи на те, що циліндрична частина в ступені дистилятора (рис. 4.1) становить менш 2% від сумарної поверхні теплообміну, випаром рідини на цій ділянці можна зневажити.

4.6 Адіабатний випар рідини

Процес адіабатного випару урини відбувається в 1-му ступені багатоступінчастого дистилятора, куди рідина надходить перегрітою.. Перегрів рідини здійснюється або в електричному нагрівачі або в термоелектричній батареї.

Теоретичні й експериментальні дослідження процесу адіабатного випару плівки рідини на обертовому диску досліджувалися в роботах [19-22].

У цих роботах отримана залежність для ламінарного режиму плинку плівки рідини, за допомогою якої визначається зміна величини перегріву плівки рідини щодо температури насичення пари T_s у першому ступені уздовж радіуса диска:

$$\Theta_f = \Theta_0 \exp\left(-\frac{3}{8}BR^{8/3}\right) \quad (4.15)$$

де: $\Theta_f = T_f - T_s$ - перегрів води;

$\Theta_0 = T_3 - T_s$ - перегрів рідини на вході в дистилятор;

B – безрозмірний комплекс;

R – радіус диска.

Безрозмірний комплекс B :

$$B = 19,293 \frac{\lambda_f \omega^{2/3}}{c_f G_f^{4/3}} \left(\frac{\rho_f}{\nu_f} \right)^{1/3}. \quad (4.16)$$

де λ_f - коефіцієнт теплопровідності плівки, Вт/(м·К);

w – швидкість плинину плівки, м/с;

c_f - теплоємність рідини плівки, Дж/(кг·К);

G_f – масова витрата рідини, кг/с;

ν_f - кінематичний коефіцієнт в'язкості плівки, м³/кг;

ρ_f - в'язкість плівки кг/м³.

При $\Theta_f \rightarrow 0$ перегрів рідини дорівнює нулю, що відповідає $R = \infty$. Радіус диска, на якому Θ_f близько до нуля, позначається R_0 . Величина R_0 визначиться з формули (4.15) при підстановці в неї $\Theta_f = 0.05$. Θ_0 Експерименти в [18] показали, що залежність (4.15) добре описує дослідні дані при значенні критерію фазового переходу

$$K = \frac{r}{c_f \Theta_0} \geq 160, \text{ що для урини при } T_s = 30 \text{ }^\circ\text{C} \text{ відповідає } \Theta_0 < 3,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

При $K < 160$ випар перегрітої рідини більше інтенсивний й радіус, на якому перегрів рідини наближається до нуля, істотно зменшується. Для цього випадку необхідно використати рівняння:

$$\Theta_f = \Theta_0 \exp\left(-\frac{3}{8} BR^{8/3} A_1\right), \quad (4.17)$$

де: $\Theta_0 = T_3 - T_s$ - перегрів рідини на вході в дистиллятор;;

B – безрозмірний комплекс;

R – радіус диску.

$A_1 = 58 \cdot K^{-0,8}$ - емпіричний коефіцієнт;

4.7 Середній коефіцієнт теплопередачі в ступенях

Середній коефіцієнт теплопередачі на окремому ступені визначається по формулі:

$$\bar{k} = \frac{\sum_{i=1}^3 (\bar{k}_i \cdot F_i)}{\sum_{i=1}^3 F_i}, \quad (4.18)$$

де: \bar{k}_i – середній коефіцієнт теплопередачі на окремій ділянці ступеню (рис. 4.1);

F_i - площа поверхні окремої ділянки.

Середній коефіцієнт теплопередачі для кожної ділянки розраховується по формулі:

$$\bar{k}_i = \frac{1}{\frac{1}{\bar{\alpha}_c} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\bar{\alpha}_e}}, \quad (4.19)$$

де : $\bar{\alpha}_c$ - коефіцієнт тепловіддачі при конденсації пари на стінці, розраховується: для диска по формулі (4.5), для конуса по формулах (4.5, 4.6);

$\bar{\alpha}_e$ - коефіцієнт тепловіддачі при паротворенні рідини в плівці в 2-й й 3-й ступенях дистиллятора, визначається за допомогою залежностей (4.10 - 4.14);

δ_w - товщина стінки, м;

λ_w - коефіцієнт теплопровідності стінки, Вт(м·К)

Теплофізичні властивості рідини для розрахунків коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації пари на обертових поверхнях (формули 4.5 - 4.7) визначаються по температурі насичення T_s в ступені.

Температура \bar{T}_f , що необхідна для визначенні теплофізичних характеристик конденсату, що утворюється при конденсації пари на холодній рідині в кінцевому конденсаторі дистиллятора, розраховується по формулі:

$$\bar{T}_f = \frac{T_{sIII} + T_6}{2}, \quad (4.20)$$

де: T_6 - температура рідини, що надходить в дистиллятор на охолодження пари в останньому ступені;

T_{sIII} - температура конденсації пари в третьому ступені.

Теплофізичні властивості рідини, що випарюється, які необхідні для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі по формулах (4.10 - 4.14), визначаються по температурі насичення рідини в ступені.

4.8 Висновки за розділом 4

В розділі 4 було проаналізовано особливості гідродинаміки й теплообміну при конденсації і паротворенні в плівці рідини на обертовій поверхні. Аналіз проводився на базі багатоступінчатого відцентрового вакуумного дистиллятора.

В підрозділі 4.1 детально описана гідродинаміка і поведінка плівки при паротворенні в залежності від витрати рідини G . При роботі випарника недопустимий розрив плівки зі сторони паротворення, оскільки в цьому випадку почнеться активне відкладення солей на теплообмінних

поверхнях. Зроблено висновок, що існує мінімальна товщина плівки δ_{min} при якій відбувається розрив плівки, її можна підрахувати за формулою (4.5). Підставивши результат в рівняння (4.3) можна виразити з нього мінімально допустимий потік рідини G_{min} . Данні рівняння узгоджуються з такими можливими матеріалами теплообмінної поверхні, як: титан, нержавіюча сталь, латунь, мідь, алюміній.

Тепловіддача при конденсації пари на обертовій поверхні та при конденсації пари на плівці рідини досить добре вивчена. Вона описана в підрозділах 4.3, 4.4 і додаткових уточнень не потребує.

В підрозділі 4.6 описаний адіабатний випар рідини, який є характерним для першої ступені випарника. Це пов'язано з попереднім перегрівом рідини в ТЕБ на певну температуру Θ_0 . Маємо формулу (4.15) яку слід використовувати при розрахунках коли критерій фазового переходу $K > 160$ і формулу (4.17) для випадку, коли $K < 160$.

В підрозділі 4.7 описаний алгоритм обчислення коефіцієнту тепловіддачі в ступенях випарного апарату. Слід зазначити, що при розрахунку нас цікавить саме середній коефіцієнт теплопередачі, для обчислення якого необхідно визначити середні коефіцієнти теплопередачі для ламінарного і турбулентного режиму течії плівки.

В підрозділі 4.5 описана тепловіддача при паротворенні в плівці рідини на обертовій поверхні для ламінарної (при $Re < 50$) і турбулентної (при $Re > 50$) течії плівки. Причому розрахунок тепловіддачі на конічній обертовій поверхні для турбулентного режиму течії плівки рідини можна удосконалити. Для цього необхідно виокремити фізичні критерії, які впливають на плівку та звести їх в певний комплекс, який в свою чергу дозволить скорегувати існуюче рівняння тепловіддачі для турбулентного режиму течії плівки. Нова залежність має точно описувати результати експериментальних даних. Більш детально процес випаровування рідини на конічній обертовій поверхні буде розглянуто в розділі 5.

5 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ВИПАРОВУВАННЯ ПЛІВКИ НА КОНІЧНІЙ ОБЕРТОВІЙ ПОВЕРХНІ

Перші дослідження, які надали формули для обчислення тепловіддачі під час випаровування потоку рідини вздовж обертової поверхні, були проведені Бромлі [23]. Автор приймає ламінарний потік рідкої плівки, який тоді і зараз приймається (без доказів).

$$\text{Re} = 4G/P\mu < 200. \quad (5.1)$$

де G_f – масова витрата рідини, кг/с;

P – периметр, $P = 2\pi R$, м;

μ – динамічна в'язкість, Па·с.

Для випарників, що вивчаються в реф. [23], автори вважають, що для рівняння $\text{Re} = 4G/2\pi R\mu = 2000$ буде ламінарний потік плівки рідини на більшій частині поверхні. Використовуючи залежність (4.2) для визначення товщини ламінарного потоку плівки, виходить відома залежність у безрозмірному вигляді:

$$\text{Nu} = 1,47\text{Re}^{-1/3} \quad (5.2)$$

де Re – число Рейнольдса.

Результати одержанні при розрахунку за формулою (5.2) корелюють з результатами розрахунку за формулою (4.10) [24].

Використовуючи відому теоретичну модель теплопередачі для ламінарної плівкової конденсації та випаровування тонких ламінарних плівок, маємо безрозмірну залежність:

$$\text{Nu} = \text{Nu}^* A \text{Re}_{\text{in}}^{-1/3} E_{\text{in}}^{-2/3} \left(\frac{R}{R_{\text{in}}} \right)^{2/3} \quad (5.3)$$

де $\text{Nu}^* = \bar{\alpha}\delta / \lambda$ - число Нуссельта;

$A = \left(\frac{v^2}{3gR_{\text{in}}^3} \right)^{1/3}$ - безрозмірний коефіцієнт;

$\text{Re}_{\text{in}} = u\delta / \nu$ - число Рейнольдса;

$u = \omega^2 R\delta^2 / 3\nu$ - кутова швидкість м/с;

$E_{\text{in}} = v^2 / \omega R^2$ - безрозмірний комплекс;

R – радіус диска, м;

R_{in} - радіус початку змочування поверхні диску плівкою, м;

ν - кінематичний коефіцієнт в'язкості плівки, м³/кг;

g - прискорення вільного падіння, м/с^2 ;

δ - товщина плівки, м ;

w - швидкість плинину плівки, м/с ;

Підставляючи в (5.3) $\text{Nu}^* = \bar{\alpha}\delta / \lambda$, $A = \left(\frac{v^2}{3gR_{\text{in}}^3} \right)^{1/3}$, $\text{Re}_{\text{in}} = u\delta / \nu$, $u = \omega^2 R \delta^2 / 3\nu$,

$E_{\text{in}} = v^2 / \omega R^2$ отримана залежність (5.2).

Теоретичні рішення розрахунку теплопередачі та загального теплообміну в плівковому випаровуванні на обертовій конічній поверхні представлені в посилання. [24].

Після аналізу джерел [24] було виведено наступну залежність:

$$\bar{\alpha}_t = \frac{1}{F_{kr} - F_{in}} \int_{F_{in}}^{F_{kr}} \frac{\lambda}{\left[3(G_f - G_e)\nu \right]^{1/3}} \left[2\pi g F_{kr} \sin \beta \cos \beta \left(\frac{\rho - \rho_v}{\rho} \right) + 2\pi x^2 \omega^2 \sin^3 \beta \right]^{1/3} dF_{kr} \quad (5.4)$$

де F_{kr} - площа на якій спостерігається турбулентний режим плинину плівки, м^2 ;

F_{in} - площа на якій спостерігається ламінарний режим плинину плівки, м^2 ;

λ - коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

G_f - витрата рідини, кг/с ;

G_e - витрата концентрату, кг/с ;

ν - кінематичний коефіцієнт в'язкості плівки, $\text{м}^2/\text{с}$;

g - прискорення вільного падіння, м/с^2 ;

β - кут нахилу утворюючої конусу до його осі обертання теплообмінної поверхні;

ρ - в'язкість рідини, кг/м^3 ;

ρ_v - в'язкість пари, кг/м^3 ;

w - швидкість плинину плівки, м/с .

Новизна залежності (5.4) полягає у наявності комплексу $2\pi g x \sin \beta \cos \beta \left(\frac{\rho - \rho_v}{\rho} \right)$.

У реальному відцентровому випарнику, цей комплекс менший, ніж комплекс відцентрового прискорення $2\pi x^2 \omega^2 \sin^3 \beta$. Формула (5.4) дозволяє більш точно оцінити середній коефіцієнт тепловіддачі для конічних поверхонь ніж спосіб описаний в підрозділі 3.5. Спосіб описаний в підрозділі 3.5 враховує лише геометричні особливості поверхні.

Представлений комплекс $2\pi g x \sin \beta \cos \beta \left(\frac{\rho - \rho_v}{\rho} \right)$ враховує також і фізичні властивості

плівки. За допомогою залежності (5.4) можна описати процес теплообміну навіть для

невеликих кутів $\beta \approx 10^\circ$, які трапляються в реф. [24,25]. Якщо виключити комплекс

$$2\pi g x \sin \beta \cos \beta \left(\frac{\rho - \rho_v}{\rho} \right) \text{ з (5.4) ми отримуємо (5.2)}$$

Коефіцієнти тепловіддачі, виміряні в експериментах [25] під час випаровування та конденсації для води, розчинів NaCl та розчину цукру, відрізнялися як значеннями α (на 15 ... 30%), так і характером току рідини. Коефіцієнт тепловіддачі не зменшувався зі збільшенням швидкості потоку рідини (Re_{in}), а мав тенденцію до збільшення (рис.5.1).

У всіх представлених дослідженнях [23 - 25], а також у [2, 3] вимірювали загальний коефіцієнт теплопередачі.

Перші вимірювання коефіцієнтів тепловіддачі під час випаровування та кипіння води в розчинах NaCl були проведені за посиланням [25].

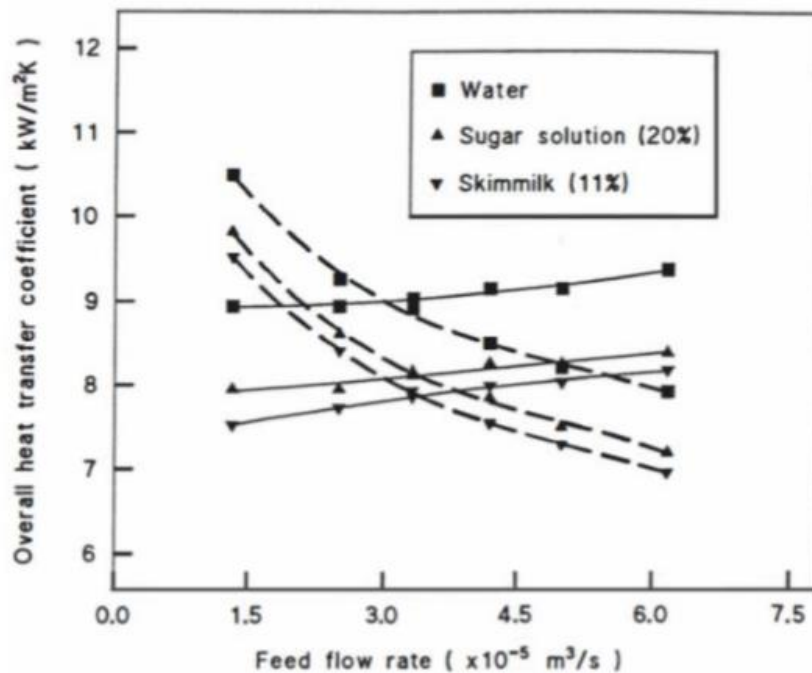


Рисунок 5.1 - Вплив швидкості подачі рідини на загальний коефіцієнт тепловіддачі для води, 20% розчину цукру, знежиреного молока у випарнику Centritherm. Суцільні лінії - експериментальні значення, пунктирні - теоретичні. Температура випаровування 60°C, швидкість обертання 146,6 рад/с, або 1400 об/хв різниця температур 10К.

В експерименті [26] було вивчено вплив швидкості потоку рідини, що надходить до центру диска, швидкості обертання диска ω , розміри диска, щільності теплового потоку та температуру випаровування за середнім коефіцієнтом тепловіддачі під час випаровування та кипіння рідини. У наших експериментах температуру поверхні, яка оберталася,

вимірювали термопарами. Температуру холодних з'єднань вимірювали за допомогою напівпровідникового терморезистора, закріпленого на роторі. Холодні стики разом з терморезистором були якісно ізольовані. Це дало можливість отримати достовірні експериментальні данні, які добре узгоджуються з теорією ламінарних та турбулентних потоків рідкої плівки. Оскільки в експериментах можна було виміряти лише середній тепловий потік, експериментально не можна було оцінити локальний коефіцієнт теплопередачі (за радіусом диска).

Рис. 5.2 і 5.3 показують вплив ω , G і q на середній коефіцієнт тепловіддачі. Головною особливістю цих даних є відсутність ламінарного закону впливу G (Re) на α , що суперечить моделям чисто ламінарної плівки ($\alpha \sim Re^{-1/3}$), прийнятих у літературі [23]. Цей факт був відзначений в дослідженні [21], в якому автор припускає, що з огляду на певні норми споживання рідини та малі розміри диска Re можуть досягти значень, при яких плівка буде турбулентною. Використовуючи двошарову модель турбулентної плівки, описану в дослідженнях Кутателадзе [27], автор [21] представив залежність середнього тепловіддачі під час випаровування рідкої плівки, що враховує вплив турбулентності на диск з радіусом $R_{in} < R_{kr}$ і ламінарним потоком з радіусом $R_{in} > R_{kr}$ (формула (5.1)).

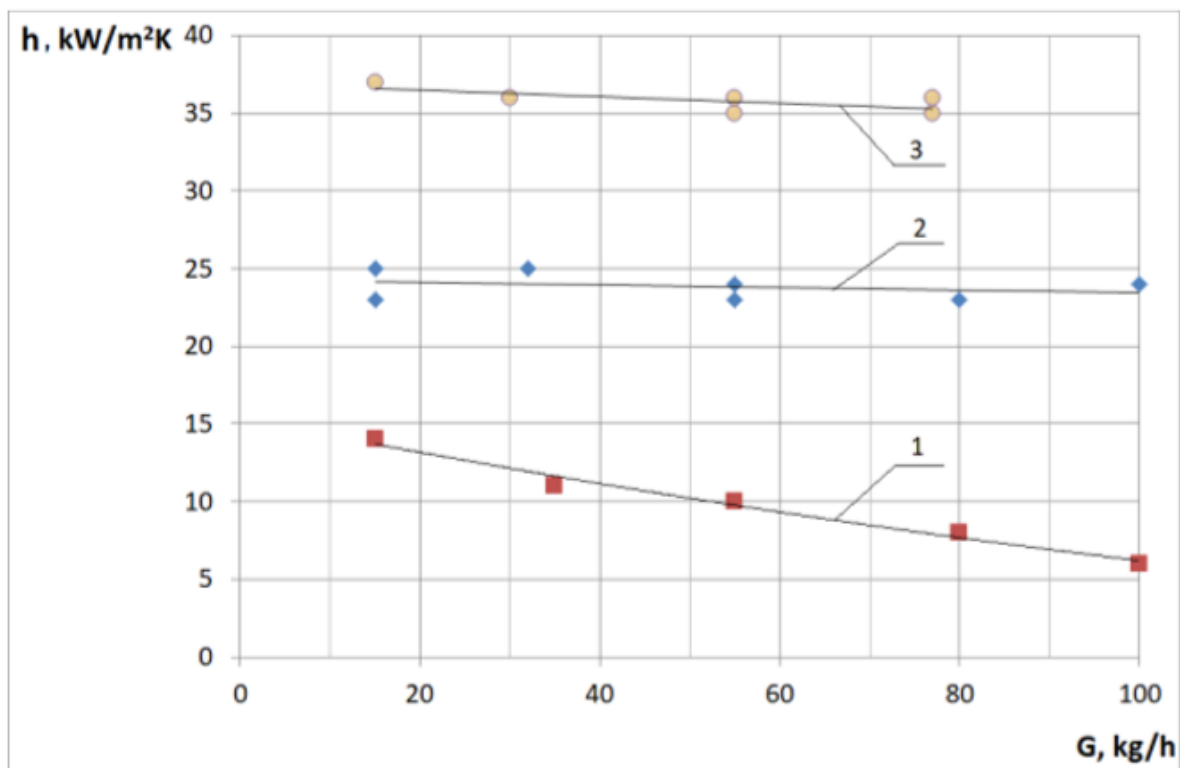


Рисунок 5.2 - Вплив потоку живильної води G на тепловіддачу під час випаровування рідкої плівки на обертовому диску з різною швидкістю обертання ω : 1 - $\omega = 21$ рад/с; 2 - $\omega = 52$ рад/с; $q = 6,6 \cdot 10^4$ Вт/м²; 3 - $\omega = 105$ рад/с; $q = 9,6 \cdot 10^4$ Вт/м².

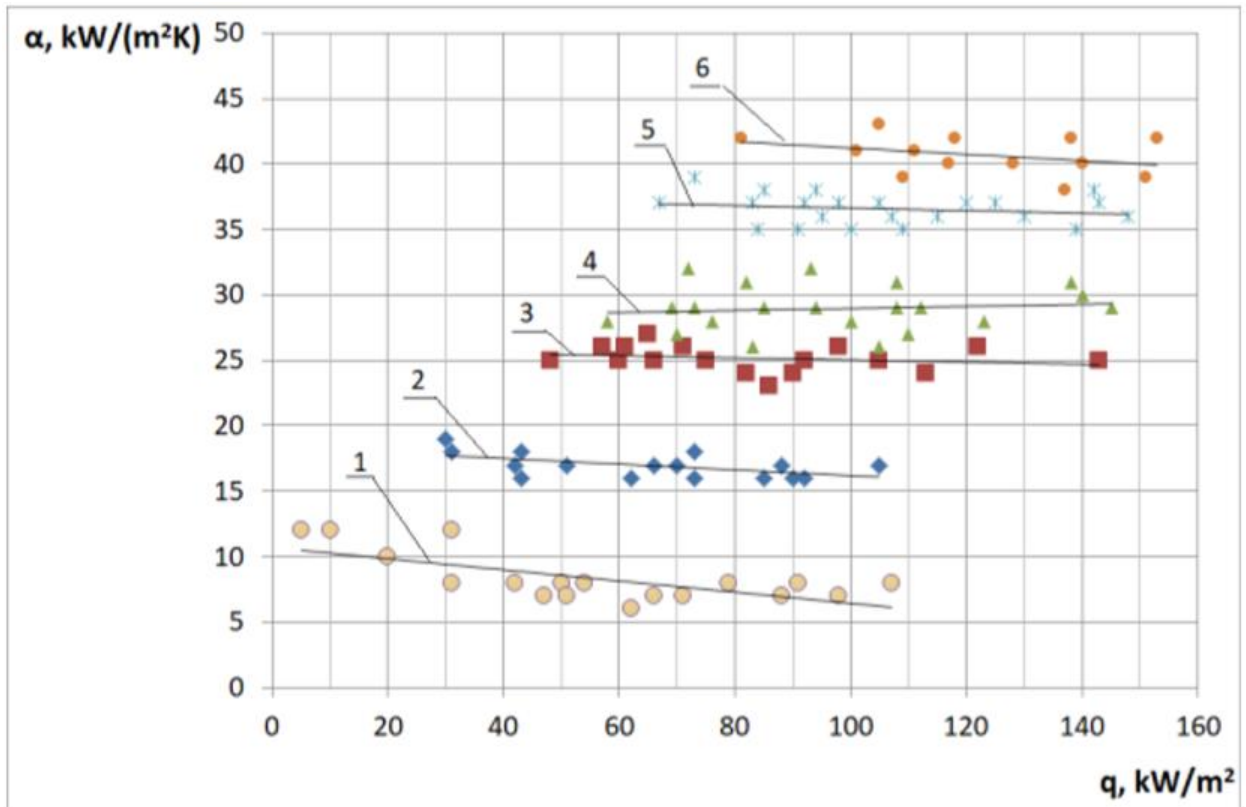


Рисунок 5.3 - Вплив швидкості обертання диска та теплового потоку на середній коефіцієнт тепловіддачі: 1 - $\omega = 21$ рад/с; 2 - $\omega = 31$ рад/с; 3 - $\omega = 52$ рад/с; 4 - $\omega = 73$ рад/с; 5 - $\omega = 105$ рад/с; 6 - $\omega = 126$ рад/с.

Для систематизації розрахунку теплообміну на обертових поверхнях. А саме, розрахунку середніх коефіцієнтів тепловіддачі зі сторони плівкового випару пари, слід виокремити певні типові задачі задачі.

Ці задачі між собою відрізняються геометричними умовами, тобто умовами однозначності.

Для першої задачі приймаємо, що обертова поверхня має певний радіус R , рідина що змочує поверхню подається через центр диска і змочує його не повністю, а лише певний його радіус R_i . Плівка має ламінарний характер течії до певного радіусу R_{kr} , після якого плин течії плівки стає турбулентним. Виходячи з заданих умов пропонуємо наступне рівняння для вирішення подібних задачах, ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$):

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_l \frac{R^2 - R_{kr}^2}{R^2} + \bar{\alpha}_t \frac{R_{kr}^2 - R_i^2}{R^2} \quad (5.5)$$

Для другої задачі приймаємо, що обертова поверхня має певний радіус R , рідина що змочує поверхню подається через центр диска і змочує його повністю. Плівка має

ламінарний характер течії до певного радіусу R_{kr} , після якого плин течії плівки стає турбулентним. Виходячи з заданих умов пропоную наступне рівняння для вирішення подібних задачах, (Вт/(м²·К)):

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_l \frac{R^2 - R_{kr}^2}{R^2} + \bar{\alpha}_t \frac{R_{kr}^2}{R^2} \quad (5.6)$$

Для третьої задачі приймаємо, що обертова поверхня має певний радіус R , рідина що змочує поверхню подається на певній відстані від центру диска і починає його змочувати на певному радіусі R_{in} , причому змочує його не повністю, а лише певний його радіус R_i . Плівка має ламінарний характер течії до певного радіусу R_{kr} , після якого плин течії плівки стає турбулентним. Виходячи з заданих умов пропоную наступне рівняння для вирішення подібних задачах, (Вт/(м²·К)):

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_l \frac{R_{in}^2 - R_{kr}^2}{R^2} + \bar{\alpha}_t \frac{R_{kr}^2 - R_i^2}{R^2} \quad (5.7)$$

Для четвертої задачі приймаємо, що обертова поверхня має певний радіус R , рідина що змочує поверхню подається на певній відстані від центру диска і починає його змочувати на певному радіусі R_{in} , причому змочує його повністю. Плівка має ламінарний характер течії до певного радіусу R_{kr} , після якого плин течії плівки стає турбулентним. Данна задача характерна для відцентрового випарного апарату описаного в розділах 2,3,4. Для її вирішення запропонована формула (4.11).

Формула (4.11) є добре відомою, її особливістю є те, що плівка рідина що змочує поверхню подається на певній відстані від центру диска і починає його змочувати на певному радіусі R_{out} . Тобто геометричні особливості теплообмінної поверхні не дозволяють почати зрошення з центру диска. Це видно з рисунка 4.1, в центрі знаходиться обертовий вал. Новизна формули (5.5) і (5.7) полягає в тому, що в комплексі $\frac{R_{kr}^2 - R_i^2}{R_{out}^2}$ та

$\frac{R_{kr}^2 - R_i^2}{R^2}$ маємо доданок R_i , який відповідає від радіусу змочування плівкою поверхні теплообміну.

5.1 Висновки за розділом 5

Було розглянуто теоретичні дослідження випаровування плівки на конічній поверхні. В результаті теоретичних досліджень турбулентного режиму течії плівки було виявлено комплекс $2\pi g x \sin \beta \cos \beta \left(\frac{\rho - \rho_v}{\rho} \right)$, який в свою чергу відноситься до формули

(5.4). Комплекс уточнює фізичні властивості плівки при випаровуванні на конічній поверхні при турбулентному режимі течії. Формулу (5.4) слід використовувати для розрахунку середнього коефіцієнту тепловіддачі плівки при її турбулентному режимі течії у відцентрових випарниках. Формула актуальна для умов, коли прискорення вільного падіння g більше нуля.

Як результат дослідження плівкового випаровування при турбулентному режимі течії плівки на обертовій конічній поверхні були виокремлені типові задачі, з певними граничними умовами пов'язаними з типовою геометрією теплообмінних поверхонь. Для кожної задачі пропонується теоретична залежність яка описує процес тепловіддачі для заданих умов.

ВИСНОВКИ

У результаті порівняльного аналізу різних відцентрових дистиляторів зроблено висновок, що для пілотованих космічних систем найбільш підходить багатоступінчастий відцентровий вакуумний дистилятор.

Було розглянуто багатоступінчастий відцентровий вакуумний дистилятор на прикладі п'ятиступінчастого відцентрового вакуумного дистилятора розробленого в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Розглянутий апарат являється передовою, перспективною розробкою для систем життєзабезпечення космічних станцій. Були розглянуті принципова схема, конструкторська та принцип роботи апарату.

Джерелом теплоти апарату є термоелектрична батарея, яка є рушійною силою процесу дистиляції. Діапазон зміни параметрів роботи дистилятора при дослідженні: частота обертання ротора $n = 800-1200$ об/хв; електрична потужність, підведена до термоелектричної батареї, $N_{ТЕБ} = 150-600$ Вт; ступінь вилучення води із розчину (урини) 88-93 %.

Приведені результати експериментального дослідження ТЕБ та процесу теплообміну в вакуумному дистиляторі в штатних режимах роботи. Результати експерименту з водою показують наступну залежність, при збільшенні частоти обертання диска в 1,6 разів продуктивність дистилятора зростає більше ніж на 20%, причому стабільний ріст має спостерігатися при всіх значеннях електричного навантаження на батарею. Причина росту полягає не стільки в збільшенні коефіцієнта теплопередачі, скільки в зростанні масової швидкості в зовнішніх контурах, що в свою чергу призводить до підвищення коефіцієнту ефективності ТЕБ, хоча ріст коефіцієнту теплопередачі також має місце. Цей результат спостерігається як в експерименті з водою, так і з розчином NaCl та з уриною, з поправкою на їх фізичні властивості, а саме, в першу чергу, на температурну депресію.

При роботі випарника недопустимий розрив плівки зі сторони паротворення, оскільки в цьому випадку почнеться активне відкладення солей на теплообмінних поверхнях. Зроблено висновок, що існує мінімальна товщина плівки δ_{min} при якій відбувається її розрив.

Було розглянуто теоретичні дослідження випаровування плівки на конічній поверхні. В результаті теоретичних досліджень турбулентного режиму течії плівки було виявлено комплекс $2\pi g x \sin \beta \cos \beta \left(\frac{\rho - \rho_v}{\rho} \right)$. Цей комплекс враховує фізичні властивості

плівки та пари при випаровуванні на обертовій конічній поверхні при турбулентному режимі течії. Але у випадку, коли $g = 0$ (прискорення вільного падіння) цей комплекс також дорівнює нулю. Тобто у умовах невагомості при розрахунку тепловіддачі на обертовій конічній поверхні зі сторони випаровування коефіцієнти тепловіддачі слід помножити на $\sin \beta^{1/3}$, за методикою розрахунку з розділу 4.

Як результат дослідження плівкового випаровування на обертовій поверхні при турбулентному режимі течії плівки були виокремлені типові задачі, з певними граничними умовами пов'язаними з типовою геометрією теплообмінних поверхонь. Виокремлено 4 типові задачі для теплообміну при турбулентному плинні плівки на обертовій поверхні зі сторони випару:

Задача 1. Для випадку, коли рідина, що змочує поверхню, подається через центр диска і змочує його не повністю

Задача 2. Для випадку, коли рідина, що змочує поверхню, подається через центр диска і змочує його повністю.

Задача 3. Для випадку, коли рідина, що змочує поверхню, подається на певній відстані від центру диска і починає його змочувати на певному радіусі R_{in} , причому змочує його не повністю, а лише певний його радіус R_i .

Задача 4. Для випадку, коли рідина, що змочує поверхню подається на певній відстані від центру диска R_{in} причому змочує його повністю.

Розрахункові залежності приведені для кожної з задач можна використовувати для розрахунку теплообміну при плівковому випаровуванні на обертовій поверхні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Phase Change Water Recovery for the Space Station Freedom and Future Exploration Missions, / L Noble, F. Shubert, R. Pudoka, and J. Miernik // SAE Paper 901294, 20th International Conference on Environmental Systems – Williamsburg, 1990.
- 2 Rifert V.G. Methods and Processes of Thermal Distillation of Water Solution for Closet Water Supply Systems / V.G Rifert, Barabash P.A., and Goliyad N.N. // SAE Paper 901294, 20th International Conference on Environmental Systems – Williamsburg 1990.
- 3 Риферт В. Экспериментальное исследование теплообмена при дистилляции соленой воды на вращающемся диске: диссертация кандидата технических наук – Киевский политехнический институт – Киев 1969.
- 4 Бутузов А.И. Экспериментальное исследование теплообмена при конденсации пара на вращающемся диске./ А,И.Бутузов, В.Г. Ріферт // Известия ВУЗов СССР. Энергетика – 1971. – №9. – с. 118-121.
- 5 Бутузов А.И. Экспериментальное определение минимальной плотности орошения в центробежном тонкопленочном аппарате / А.И.Бутузов, И.И. Пуховой, В.Г. Риферт – В кн. «Теплофизика и теплотехника» – Киев 1973 – №24 – с. 78-82.
- 6 Астафьев В. Конденсация пара на вращающемся диске / В. Астафьев, Бакластов А. // «Известия ВУЗов СССР. Теплоэнергетика» – 1971 – №9 – с. 68-73.
- 7 Риферт В.Г. Статистический анализ волновой структуры поверхности пленки жидкости, движущейся под действием центробежных сил / В.Г.Риферт, Барабаш П.А., Мужилко А.А.// «Известия ВУЗов СССР. Энергетика» – 1982. – №2, – с. 62-66.
- 8 Muzilko A. Flow of Liquid Film over the Surface of a Rotating Disk /A. Muzilko, V. Rifert, P. Barabash // Heat Transfer - Soviet Research, 1983, vol. 15, Vol. 5. – 1-6.
- 9 Мужилко А.А. Теплообмен и пленочное течение жидкости в центробежных дистилляторах: диссертация кандидата технических наук – Киевский политехнический институт – Киев 1984.
- 10 Риферт В.Г. Закономерность изменения средней толщины пленки жидкости на вращающемся диске / В.Г.Риферт, А.А. Мужилко, Е.Б. Курилова // Теоретические основы химической технологии. – 1988. – т. 22 – №5 – с. 642-646.
- 11 Барабаш П.А. Минимальная плотность орошения теплообменной поверхности центробежного испарителя / П.А.Барабаш, А.А. Мужилко, В.Г.Риферт // В кн.: «Теплопроводность и конвективный теплообмен» – Киев, 1980. – с. 59-63.
- 12 Sparrow E. The Effect of vapor drag on rotating Condensation / E.Sparrow, J Gregg – Journal of Heat Transfer. – 1968. – vol. 82 – p. 71-72.

13 Риферт В.Г. Теплообмен и гидродинамика при пленочной конденсации на гладких и профилированных поверхностях: диссертация доктора технических наук – Киев 1987.

14 Риферт В.Г. К вопросу использования термистеров в схеме измерения температур вращающихся объектов / В.Г.Риферт, В.И.Усенко // В кн.: «Вестник Киевского политехнического института. Теплоэнергетика» – Киев 1971. – вып. 8. – с. 34-36.

15 Rifert V. Condensation on steam on a water film falling down a rotating Surface / V.Rifert, P. Barabash, N. Goliad // «Heat Transfer - Soviet Research» – 1984. – Vol. 16. – p. 132-137.

16 Риферт В. Нагрев вращающейся пленки хладителя при конденсации на ней чистого пара / В.Риферт, Н. Голяд , В.Богданов // В кн.: «Кипение и конденсация» – Рига, Латвия 1980. – с. 99-107.

17 Риферт В. Конденсация чистого пара на пленке охладителя, стекающей по вращающейся поверхности / В.Риферт, Н.Голяд // «Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Wroclawskiej» – Wroclaw 1988. – Vol. 11 – p. 105-109.

18 Sparrow E. Конденсация на вращающемся конусе / E. Sparrow, E. Harnet // «Journal of Heat Transfer» – 1961. – Vol. 83.

19 Экспериментальные исследования адиабатного испарения пленки жидкости на вращающемся диске / О.Долинский, В.Риферт , П.Барабаш , И.Лавриненко // «Химическая технология» – 1988. – №5 – с. 61-65.

20 Rifert V. Character and Intensity of Heat Exchange at Evaporation of the Fluid Film on the Rotating Disk / V. Rifert, I. Pukhovoy, E. Nikitenko // Pr. 2-nd European Thermal – Sciences and 14-th vir National Heat Transfer Conference – Rome 1996 – p. 249-252.

21 Риферт В. Анализ теплообмена при испарении пленки жидкости на вращающемся диске / В.Риферт // «Инженерно-физический журнал» – 1973. – т. 25, №2, с. 232-236.

22 Долинский О. Расчет концентрации солей на поверхности адиабатно испаряющейся пленке раствора / О. Долинский, В.Риферт , П.Барабаш // «Промышленная теплотехника» – Eng. 1983. – т. 5 – №6. – с. 16-21.

23 Bromley, L. Prediction of performance characteristics of Hickman–Badger centrifugal boiler compression still/ L. Bromley // Ind. Eng. Chem. – 1958. – Vol. 50 – p.233.

24 Chen H. Food Bioprod / H. Chen, R. S. Jebson, O. H. Campanella // Proc. Trans. Inst. Chem. – Eng. 1997. – Vol. 75. – p. 17.

25 Wang C. The Effect of Impingement on Heat Transfer in Rotating Condensation
/ C.Wang, R. Grief R // Int. J. Heat Mass Transfer – 1981. – Vol. 24 – p.1097-1104.

26 Butuzov A. Heat Transfer in Evaporation of Liquid from a Film on a Rotating Disk
/ A. Butuzov, V. Rifert // Heat Transfer-Soviet Research – 1973. – Vol. 5 – p. 1-3.

27 Kutateladze S. Fundamentals of Heat Transfer. London / S. Kutateladze, E.Verlag –
London, 1963. – 307 p.

ДОДАТОК А

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан теплоенергетичного
факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського

_____ Євгеній ПИСЬМЕННИЙ
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2020р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Термодистиляція»
(керівник підприємства, організації)

_____ Олександр ЗОЛОТУХІН
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2020р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на науково-дослідну роботу

«Вдосконалення та підвищення ефективності відцентрових плівкових випарників»

1. Термін виконання роботи

Початок – 01.09. 2019 р.

Закінчення – 15.05. 2020 р.

2. Обґрунтування для виконання роботи

Для вдосконалення плівкових обертових випарних апаратів необхідно зробити аналіз процесу теплообміну, а саме: процесу випаровування при турбулентному режимі течії рідини

3. Мета роботи

Проаналізувати сучасний стан випарних систем на базі відцентрових випарників та шляхи підвищення їх енергоефективності; проаналізувати існуючі методи розрахунку теплопередачі; проаналізувати та вдосконалити розрахунок коефіцієнта тепловіддачі на конічній обертовій поверхні

4. Зміст основних етапів виконання роботи

Отримання завдання. Літературний огляд. Оцінка існуючих плівкових відцентрових випарних апаратів. Аналіз та теоретичне дослідження теплового розрахунку.

5. Матеріали, що подаються після закінчення роботи

5.1. Магістерська дисертація.

5.2. Презентація.

5.3. Довідка про впровадження результатів.

6. Порядок розгляду і приймання роботи

Результати роботи розглядаються на засіданні ЕК із захисту атестаційних робіт освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 144 «Теплоенергетика», спеціалізацією «Промислова та муніципальна теплоенергетика і енергозбереження».

Керівник роботи

_____ проф., д.т.н., Володимир РИФЕРТ

(підпис) (посада, ініціали, прізвище)

« _____ » _____ 2020р.

Виконавець

Студент гр. ТП-81мн,

ТЕФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського

_____ Петро СТРИНАДА

(підпис) (ініціали, прізвище)

« _____ » _____ 2020р.

ДОДАТОК Б**ЗАТВЕРДЖУЮ**Директор ТОВ «Термодистиляція»

(керівник підприємства, організації)

_____ Олександр ЗОЛОТУХІН

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«___» _____ 2020 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів магістерської дисертації

студента КПІ ім. Ігоря Сікорського Стринади Петра Сергійовича

Результати магістерської дисертації на здобуття ступеня магістра студента теплоенергетичного факультету КПІ ім. Ігоря Стринади П.С. на тему «Вдосконалення та підвищення ефективності відцентрових плівкових випарників» упроваджені в лабораторії ТОВ Термодистиляція в частині, теплового розрахунку дистилятора, розрахунку тепловіддачі при конденсації пари на обертовій поверхні, тепловіддачі при конденсації пари на плівці рідини, тепловіддачі при випаровуванні в плівці рідини на обертовій поверхні.

Головний інженер проекту

_____ Олександр СТРИКУН

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«___» _____ 2020 р.

ДОДАТОК В

Ф.№3.3

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ Стринади Петра Сергійовича

№ п/п	Найменування праць	Рукописні або друковані	Назва видавництва, журналу (номер, рік) або номер авторського свідоцтва, номер диплома на винахід	Кількість друкованих аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів праць
1	Дослідження роботи теплонасосного опріснювача води	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. – с.266.	1	Соломаха А.С.
2	Термодинамічний аналіз відцентрового парокompресорного дистилятора	Друк	Підготовлена для публікації в журналі «Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського» Вийде в липні 2020 р.	18 стор.	Соломаха А.С.

ДОДАТОК Г



Власник документу:
Гавриш Андрій Сергійович

ID перевірки:
1003125857

Дата перевірки:
14.05.2020 13:35:22 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
14.05.2020 13:36:37 EEST

ID користувача:
77138

Назва документу: Strynada_magistr

ID файлу: 1003142568 Кількість сторінок: 69 Кількість слів: 13134 Кількість символів: 97379 Розмір файлу: 8.69 MB

18.2% Схожість

Найбільша схожість: 17.7% з джерело бібліотеки. ID файлу: 1000456102

10.3% Схожість з Інтернет джерелами 5 Page 71

18.1% Текстові збіги по Бібліотеці акаунту 27 Page 71

0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

0% Вилучень

Вилучений текст відсутній

Підміна символів

Заміна символів 157