

Имя пользователя:  
Баранюк Александр Володимирович

ID проверки:  
1011616632

Дата проверки:  
20.06.2022 10:36:36 EEST

Тип проверки:  
Doc vs Internet + Library

Дата отчета:  
20.06.2022 10:39:03 EEST

ID пользователя:  
100007114

Название файла: TF81\_Kucherenko\_Diploma

Количество страниц: 61 Количество слов: 10865 Количество символов: 83182 Размер файла: 2.51 MB ID файла: 1011484807

## 12% Совпадения

Наибольшее совпадение: 3.27% с источником из Библиотеки (ID файла: 1004076907)

3.11% Источники из Интернета 187 ..... Страница 63

11.5% Источники из Библиотеки 658 ..... Страница 65

## 0% Цитат

Исключение цитат выключено

Исключение списка библиографических ссылок выключено

## 0% Исключений

Нет исключенных источников

## Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы 82

## РЕФЕРАТ

ДР: 74с., 20 рис., 9 табл., 32 джерел

Об'єкт дослідження – процеси теплообміну та гідродинаміки в високотемпературній тепловій трубі з капілярною структурою.

Предмет дослідження – вплив режимних параметрів на теплотехнічні характеристики теплової труби.

Мета роботи – дослідити робочі характеристики високотемпературної теплової труби з натрієм, поле температур, термічний опір.

Метод дослідження – експериментально – розрахунковий метод дослідження.

Результати досліджень можуть бути використані для розробки теплоакумулюючих пристроїв, в космічній галузі – термостатування приладів, забезпечення ізотермічних умов для реакції, котрі протікають з виділенням або поглинанням тепла у великих об'ємах.

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА ТЕПЛОВА ТРУБА, КАПЛЯРНА СТРУКТУРА, НАТРІЙ, ТЕРМІЧНИЙ ОПІР, ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ, ТЕПЛОВИЙ ПОТІК.

## ABSTRACT

DR: 74p., 20 figs., 9 tables., 32 sources

The object of research is the processes of heat exchange and hydrodynamics in a high-temperature heat pipe with a capillary structure.

The subject of research is the influence of regime parameters on the thermal characteristics of the heat pipe.

The purpose of the work - to investigate the performance of high-temperature heat pipe with sodium, field temperature, thermal resistance.

Research method - experimental - computational research method.

The results of research can be used for the development of heat storage devices, in the space industry - thermostating devices, providing isothermal conditions for the reaction, which occur with the release or absorption of heat in large volumes.

HIGH TEMPERATURE HEAT PIPE, CAPILLARY STRUCTURE, SODIUM, THERMAL RESISTANCE, TEMPERATURE FIELD, HEAT FLOW.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ.....	9
ВСТУП.....	11
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	13
1.1. Особливості та властивості теплових труб.....	13
1.2 Класифікація за теплоносіями.....	15
1.3 Класифікація діапазону робочих температур.....	16
1.4 Конструкції теплової труби та загальні вимоги до її деталей.....	18
1.5 Характеристика високотемпературних теплових труб.....	21
1.6 Металоволокнисті структури теплової труби.....	24
1.7 Способи заповнення теплових труб теплоносієм.....	28
2. КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ.....	35
2.1 Конструкція ВТТ.....	35
2.2 Порівняння сталей AISI 316Ti та AISI 316L.....	39
2.3 Опис конструкції експериментальної установки.....	43
2.4 Методика та програма дослідження теплової труби.....	45
2.5. Аналіз похибок.....	48
3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВТТ.....	51
3.1 Максимальна теплопередаюча здатність в стаціонарних умовах – $Q_{max}$ .....	59
4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	62
4.1. Технічні рішення та організаційні заходи з безпечної експлуатації стенда при виконанні науково-дослідної роботи.....	63
4.2. Мікроклімат робочої зони.....	66
4.3. Пожежна безпека та профілактика.....	68
ВИСНОВКИ.....	72
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	73
ДОДАТОК А.....	74

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

К – проникність;  
Q – теплове навантаження, Вт;  
T – температура, К;  
d – діаметр, м;  
l – довжина, м;  
П – пористість, %;  
 $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, Па с;  
 $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м%;  
r – теплота пароутворення, Дж/кг;

## Індекси

l – рідина;  
max – максимальний;  
s – насичення;  
вн – внутрішній;  
е – еквівалентний;  
еф – ефективний;  
кип – кипіння;  
к.с – капілярна структура;  
п – паровий канал;

## Скорочення

ТТ-теплова труба;  
ВВТ – високотемпературна теплова труба;  
КС – капілярна структура;

МВКС – металоволокниста капілярна структура;  
НТТ – низькотемпературна теплова труба;  
СТТ – середньотемпературна теплова труба;  
НТТ – низькотемпературна теплова труба;  
ЛАТР - автотрансформатор лабораторний;  
Т – термостат;  
Т1, Т2, Т3, Т4,Т5 – термopapa;  
ПЕОМ – персональна електронно-обчислювана машина;  
ІЧ – інфра-червоний;  
УФВ – ультрафіолетове випромінювання;  
ВДТ – відеодисплейний термінал;  
ВПМ – вантажнопідіймальна машина.

## ВСТУП

Теплова труба, як специфічний тепловий пристрій, був запропонований приблизно півстоліття тому. На початку своєї історії розглядалась як автономний теплопровідний пристрій, здатний передавати великі теплові потужності на довжину приблизно одного метру при досить малій різниці температур. Робота теплової труби відбувається без участі сили тяжіння чи будь-яких механічних пристроїв. Її ефективна теплопровідність виявилась в десятки і сотні разів більша, ніж в міді чи срібла – найбільш теплопровідних із відомих матеріалів. Дані властивості теплової труби в поєднанні з високою надійністю визначили інтерес перед усім в інженерів та вчених, котрі працюють в області космічної техніки.

Однак дуже скоро стало зрозуміло, що область застосування теплових труб значно ширша. Знайшлися нові властивості теплових труб; при деяких удосконаленнях труби можуть використовуватись як термостатуючі пристрої, котрі забезпечують постійну температуру тіла в широкому діапазоні потужностей.

Застосування теплових труб в різних галузях: обладнання для нафтовидобувної, нафтохімічної та космічної промисловості, енергетики, радіоелектроніці, комп'ютерної техніки та медицині – створювати принципово нові, високоефективні апарати та установки, чи значно удосконалити вже існуючі.

На ранній стадії вивчення теплових труб виникли основні проблеми, що підлягають ретельному дослідженню. До них, насамперед, належить дослідження можливостей передачі максимальних теплових потужностей та процесів, що лімітують максимальну теплову потужність. Ці питання вивчалися як експериментально, так і теоретично на основі різних моделей, що схематизують процеси у реальній тепловій трубі. Слід зазначити, що зараз для багатьох характерних випадків між експериментом і теорією досягнуто задовільну відповідність, що дозволяє досить впевнено розраховувати теплові труби для різних конкретних умов.

Головним напрямком розвитку теплових труб нині є створення та вдосконалення труб змінної провідності як пристроїв, що забезпечують

наіефективніше та найтонше регулювання температури об'єктів. Принципово нові технічні можливості відкривають здатність теплових труб виконувати функції теплових вимикачів та теплових діодів[1].

Варто відмітити високотемпературні теплові труби, які працюють при досить високих температурах, в діапазоні 400-1100 °C. В цих діапазонах температур більшість традиційних методів та матеріалів для переносу теплоти непридатні для практичної експлуатації; в той час як теплові труби з рідкометалевими теплоносіями, котрі забезпечують надійну передачу високої потужності, володіють високою теплопровідною здатністю та ізотермічністю. Також являються невід'ємним компонентом багатьох найточніших приладів для калібрування температури в первинних калібрувальних лабораторіях по всьому світу.



## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1. Особливості та властивості теплових труб

#### 1.1.1 Класифікація за властивостями

Теплові трубки мають ряд унікальних і корисних властивостей, які можна враховувати для класифікації теплових труб. Для детального аналізу використання ТТ в енергоефективних системах нижче наведено розширену їх класифікацію за конструктивними особливостями [2]:

- 1) ТТ з постійним термічним опором з металоволокнистою, порошковою, сітковою чи канавчатою капілярними структурами;
- 2) термосифони без капілярної структури та з капілярною структурою;
- 3) плоскі ТТ та парові камери;
- 4) гнучкі ТТ;
- 5) ротаційні ТТ;
- 6) ТТ з електродинамічною передачею робочої рідини;
- 7) ТТ термодіоди;
- 8) ТТ змінного термічного опору;
- 9) контурні ТТ та капілярні насосні контури;
- 10) пульсаційні ТТ;
- 11) міні та мікро ТТ.

#### 1.1.1.1 Висока ефективна теплопровідність

Кількість тепла, що переноситься тепловою трубою визначається масовою швидкістю потоку пари та прихованою теплотою пароутворення. Великими потужностями, що переносяться вважаються теплові труби з рідкометалевими теплоносіями. Отриманий потік в даному осьовому напрямку для них досягає 150 кВт/м<sup>2</sup>. Відзначимо, що це значення осьового потоку не є граничним і може бути суттєво перевищене. Оцінюючи ефективну теплопровідність натрієвої теплової труби, отримуємо, що  $\lambda_{\text{еф}}$  досягає 1000 Вт / (м·°С). Це значення коефіцієнта ефективної труби в сотні разів перевищує значення коефіцієнта теплопровідності

кращих провідників тепла – срібла та міді. Діапазон робочих температур труби розраховується правильно обраним теплоносієм та конструкційними матеріалами.

#### 1.1.1.2 Ізотермічність поверхні труби

Температура поверхні труби визначається розподілом температури пари в паровому каналі та перепадами температури у стінках труби та гноту. При тиску пари в трубі від десятої частини атмосфери і вище незалежно від форми труби та її розмірів у всьому обсязі парового каналу зазвичай досягається висока ізотермічність. Товщини стінок труби та гноту, як правило, невеликі, і перепади температур у них також малі. Отже, і поверхня труби практично ізотермічна по всій довжині. Зі зростанням тиску пари ізотермічність парового об'єму всередині труби стає кращою.

#### 1.1.1.3 Трансформація теплових потоків

Процеси випаровування та конденсації у тепловій трубі просторово розділені. Тому теплові трансформації теплових потоків: при високих теплових потоках у зоні нагріву можна отримати малі потоки в зоні охолодження шляхом збільшення поверхні тепловідведення та навпаки. Коефіцієнт трансформації теплового потоку за допомогою теплових труб визначається вибором конструкційних параметрів і може мати практично будь-яке значення. Властивість трансформації теплових потоків широко користується на практиці.

#### 1.1.1.4 Терморегулювання та термостатування

Використання деяких типів теплових труб дозволяє здійснювати регулювання та стабілізацію температури джерела та теплоприймача. Властивістю регулювання температури при зміні кількості теплоти за допомогою труби володіють, наприклад, газонаповнені теплові труби. Окрім теплоносія в таких трубах є деяка кількість газу, що не конденсується. У трубі, що працює, газ концентрується в охолоджуваній частині труби в кінці зони конденсації і утворює газову «холодну» зону. Зі збільшенням кількості теплоти, що підводиться до

труби, збільшується тиск пари теплоносія при нечисленному підвищенні температури труби. Внаслідок стиснення газу зменшується довжина газової холодної зони. При цьому зона тепловідведення зростає. Позаяк тиск пари змінюється приблизно експоненціально при зменшенні або збільшенні температури труби, то відповідна зміна температури труби досить мала в доволі широкому інтервалі зміни потужності[3].

#### 1.1.1.5 Інші властивості

Використання теплоносіїв, а також матеріалів корпусу і гноту з високими діелектричними властивостями дозволяє створювати теплові труби-ізолятори, що має велике значення для деяких застосувань теплових труб в електронній техніці та енергетиці.

Мала вага, відсутність рухомих частин та необхідності обслуговування, безшумність, надійність в роботі, можливість працювати як у полі масових сил, так і в невагомості, відсутність допоміжних систем для підтримання циркуляції теплоносія та пов'язаних з цим витрат енергії, простота конструкції – ці властивості в сукупності з вищепереліченими дозволяють стверджувати, що теплові труби можуть бути ефективно використані при розв'язанні задач тепловіддачі в різних галузях техніки. Відомо багато типів конструкційного виконання теплових труб. Для того, щоб дати уявлення про основні різновиди цих пристроїв, а також для зручності подальшого викладення матеріалу, дамо класифікацію теплових труб за рядом ознак.

#### 1.2 Класифікація за теплоносіями

В принципі, в якості теплоносія в тепловій трубі можуть використовуватися будь-які хімічні речовини та сполуки, які мають рідку і парову фази при обраній робочій температурі. Однак через низку різних обмежень кількість фактично використаної рідини значно зменшується. Можна визначити наступні умови та вимоги, яким повинен відповідати теплоносіє:

1. Забезпечення передачі теплового потоку в осьовому напрямку в багатьох випадках є головною вимогою, якій має задовольняти труба. Для цього теплоносій повинен: добре змочувати капілярну структуру гноту, володіти високою теплою пароутворення, мати великий коефіцієнт поверхневого натягу, досить високу густину пари при робочих температурах і невисоку в'язкість, особливо в рідкому стані. Критичні параметри рідини повинні бути значно вищі за робочі тому, що зі збільшенням температури поверхневого натягу та теплоти пароутворення зменшуються і стають рівними нулю в критичній точці.

2. Тиск насичених парів теплоносія при робочій температурі повинен бути досить високим, щоб забезпечити велику кількість переносу теплоти та створити менший перепад температури по довжині.

3. Теплоносій повинен бути в корозійному відношенні сумісний з матеріалами стінки теплової труби та гноту в усьому діапазоні температур.

4. Для теплоносіїв, молекули яких складаються з кількох атомів, може виникнути вимога достатньої термічної стійкості та стійкості за умов іонізуючого випромінювання. Під впливом нагріву або іонізуючого випромінювання такі теплоносії можуть розкладатися на газоподібні або тверді продукти. У першому випадку внаслідок появи газів виникає неізотермічна зона в тепловій трубі, за якою можливе закупорення гноту продуктами розкладання, відповідно, вихід теплової труби з ладу.

### 1.3 Класифікація діапазону робочих температур

Кріогенні теплові труби (КТТ) призначені для роботи в діапазоні температур від 0 до 200 °К. Теплоносіями в заданому діапазоні температур можуть бути хімічно чисті речовини у вигляді окремих елементів (гелій, аргон, криптон, азот, кисень), так і хімічних речовин (етан, фреони). Теплопровідність КТТ відносно низька через високу в'язкість, малий коефіцієнт поверхневого натягу та низьку теплоту пароутворення теплоносія. Обмежуючим фактором слугує ємність теплового потоку, яка досягається в зоні нагріву.

Низькотемпературні теплові труби (НТТ) розраховані на роботу при температурах 200-550 °К. Діапазон температур дозволяє використовувати такі види теплоносіїв як: фреони, аміак, спирти, ацетон, вода та деякі органічні з'єднання. Маючи досить хороші теплофізичні властивості, теплоносій може забезпечити більш високу теплопередачу в порівнянні з криогенними трубами.

Середньотемпературні теплові труби (СТТ) — труби для роботи в діапазоні температур 550—750 К. Теплоносіями в цих трубах можуть бути сірка, ртуть, лужні метали (цезій, рубідій), а також деякі хімічні з'єднання, наприклад, даутерм. Середньотемпературні теплові труби забезпечують подальше підвищення тепла у порівнянні з криогенними та низькотемпературними тепловими трубами.

Високотемпературні труби (ВТТ) призначені для роботи при температурах вище 750 К. Найкращі теплопередавальні властивості мають металеві теплоносії. Особливо хороші властивості мають літій та натрій. Літій має найсприятливіші властивості щодо теплоперенесення серед усіх теплоносіїв. У діапазоні високих температур решта теплоносіїв (рубідій, цезій), у тому числі використані з тугоплавкими матеріалами, істотно поступається йому теплопередавальними властивостями. Друге місце за теплофізичними властивостями займає натрій.

Натрій широко використовується у теплових трубах. Лише в діапазоні температур, де тиск пари дуже малий, доцільно застосовувати калій, а потім і цезій. Варто відзначити, що для таких металів, як кальцій, магній, ускладнений запуск теплової труби; для розплавлення теплоносія необхідне нагрівання до високих температур. Малоосвоєним в даний час теплоносій в діапазоні температур 200-800 °С (особливо для використання в безготівих трубах) являється сірка. Сірка не є хімічною сполукою і тому не схильна до термічного розкладання і малочутлива до іонізуючого випромінювання. Вартість її невисока. Сірка не корозійно-активна на відміну від сталей. Не має протипоказань та відсутні обмеження використання сірки в ядерних реакторах. Однак у рідкому стані сірка має високу в'язкість. З'ясовано, що добавка елементів із вільними електронами може знизити в'язкість сірки. Наприклад, порівняно невелика

(декілька відсотків) кількість йоду в десятки разів знижує в'язкість сірки, тим самим забезпечуючи ефективну її роботу у гравітаційних теплових трубах.

При використанні натрію та інших рідких металів в якості теплоносіїв теплових труб з'ясувалось, що труба з кільцевою щілиною допускає значно більші теплові потоки. Це обумовлено великим перегрівом (50 – 100 °К для натрію), котрий необхідний для утворення бульбашок[4].

Високотемпературні теплові труби з тугоплавких матеріалів зазвичай використовуються у верхній частині діапазону температур – вище 1300 К. Працюють в контрольованому середовищі, зазвичай вакуум або атмосфера інертного газу. Проблема, яка виникає з даним типом теплоносіїв – забезпечення «життєздатності», оскільки корозія та масоперенесення при високих температурах протікають досить інтенсивно.

#### 1.4 Конструкції теплової труби та загальні вимоги до її деталей

Процес виготовлення теплових труб складається з ряду відносно простих операцій. Ці операції включають зварювання (пайку), механічну обробку, хімічистку та неруйнівний контроль і можуть виконуватися за відносно низької вартості основного обладнання. При цьому найдорожчим, мабуть, є обладнання для контролю герметичності стиків.

У всіх теплових трубах чистота є основним фактором, який забезпечує сумісність матеріалів, що використовуються під час експлуатації (звичайно, за умови, що обрані матеріали гноту, корпусу та робочої рідини в принципі сумісні, а змочування гноту та стінок з робочою рідиною гарантована). Недостатня увага до складання може негативно вплинути на термін служби теплової труби, а також знизити її ефективність через, наприклад, погіршення змочування. Необхідно виключити забруднення атмосфери теплових труб, а також домішки, які можуть міститися в робочих рідинах. Крім того, теплові труби повинні бути дуже герметичними.

#### 1.4.1 Стінка теплової труби

Стінка теплової труби являє собою металеву стінку, здатну передавати тепло до робочої рідини. Цей метал повинен мати гарну теплопровідність, але на вибір впливають і багато інших факторів [5].

Наприклад, змочування, відношення міцності до маси, оброблюваність і пластичність, сумісність із зовнішнім середовищем і робочою рідиною, теплопровідність, зварюваність і пористість. Матеріал стінки повинен володіти високим відношенням міцності до ваги, він повинен бути непористим, щоб уникнути будь-якої дифузії частинок пара, і в той же час повинен забезпечувати мінімальну різницю температур між гнотом і джерелом тепла завдяки його більш високій теплопровідності.

#### 1.4.2 Капілярна структура (гнот)

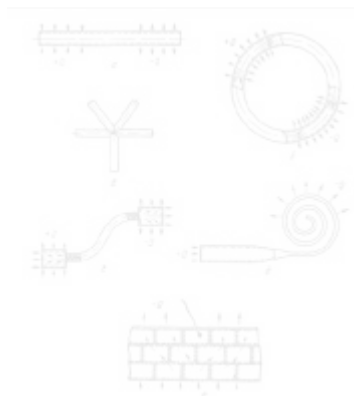
Вона є найбільш важливим компонентом теплової труби. Відповідає за повернення рідини із зони конденсації в зону випаровування за рахунок капілярних властивостей, що допомагає ТТ працювати проти сил тяжіння[6]. Таким чином, наявність гноту примушує теплові трубки працювати у всіх напрямках. Гніт з канавками, порошковий і сітчастий гноти є найбільш важливими типами гноту та широко використовуються в електронній промисловості.

#### 1.4.3 Конструктивні особливості

За конструктивним виконанням теплові труби можуть виконуватися різними геометричними формами: прямі і вигнуті, циліндричні і прямокутні, жорсткі і гнучкі, спіральні і кільцеві, як показано на рисунку 1.1.

Напрямок осі теплової труби повинен збігатися з напрямком потоку пари. В той же час, капілярна структура може мати найрізноманітніші конструкційні рішення.

Гнотові пристрої загалом поділяються на дві категорії, які описують в цілому принцип виконання та роботи гноту, їх особливостей та режимів роботи. Тому гноти розділяються на прості та складні.



а) циліндрична ТТ; б) кільцева ТТ; в) зіркоподібна ТТ; г) гнучка ТТ;  
д) гнучка спіральна зі змінною у міру розкручування спіралі поверхнею тепловідведення, е) парова камера;

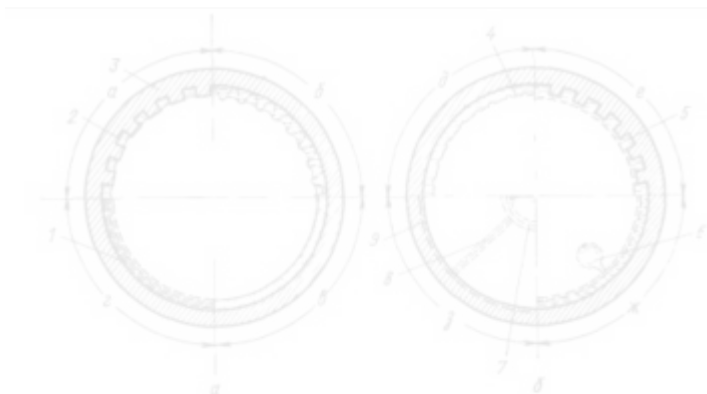
Рисунок 1.1– Конструкційне виконання теплових труб [7]

Теплові труби з простим гнотом. Простим називається тому, що канал для переносу рідини в той же час служить і для створення капілярного перепаду тиску в капілярній структурі.

Теплові труби зі складним гнотом. В даному типі гноту високий капілярний перепад утворюється дрібнопористою структурою, яка знаходиться на поверхні розділу фаз рідина – пар, а маленьке значення гідравлічного опору забезпечується каналами великого гідравлічного діаметра.

Теплові труби з комбінованими гнотами. Комбінований гніт являє собою різновид складеного гніту з поздовжнім секціонуванням каналу для протока рідини (рис 1.2, б). В якості прикладу можна привести капілярну структуру, яка представляє собою поздовжні канавки, виконані на внутрішній поверхні корпусу теплової труби і щільно прилеглим дрібнопористим екраном. Комбінований гніт має всі переваги складного гноту і зменшує деякі його недоліки.



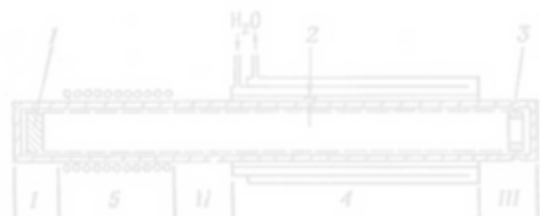


1 – багат шарова сітка; 2 – канавки; 3 – корпус; 4 – екран; 5 – канавки з екран з сітки; 6 – артерії; 7 – тунельна артерія; 8 – капілярний місток; 9 – різьба;

Рисунок 1.2 – Конструкція простих (а) та складених (б) гнотів [7]

### 1.5 Характеристика високотемпературних теплових труб

Для експериментів з натрієм та калієм були виготовлені дві пористі труби (рис. 1.3) зовнішнім діаметром 11,7 мм, внутрішнім діаметром 11,4 мм та довжиною 1370 мм кожна.



1- заглушка парового каналу; 2 – газовий проміжок; 3 – заглушка кільцевого каналу; 4 – конденсатор; 5 - випарник

Рисунок 1.3 – Схема теплової труби [8]

Кожна труба виготовлялась із нержавіючої сітки 400 mesh, навита в 8 шарів на мідну трубу. Потім конструкція вставлялась в іншу мідну трубу, та вся збірка простягалась через фільтри. Після цього мідь розчиняли і видаляли, а сітку

запікали, нагріваючи у вакуумі при температурі 1000 °С. Такий метод дозволяє отримати тонкостінну досить міцну трубу з дрібними порами і відносно гладкою стінкою.

У ролі контейнера використовувалася труба зовнішнім діаметром 13,8 мм і внутрішнім 12,0 мм. Кожна пориста труба вільно поміщалася в контейнері, утворюючи серповидний кільцевий канал для повернення рідини. Середня ширина каналу дорівнювала 0,15 мм в експериментах з натрієм і калієм. У трубу подавалася така кількість рідини, щоб був заповнений канал і насичена пориста труба. Системи вакуумувалися, заварювалися і нагрівалися в печі для забезпечення змочування рідиною гноту (капілярної структури) та контейнера.

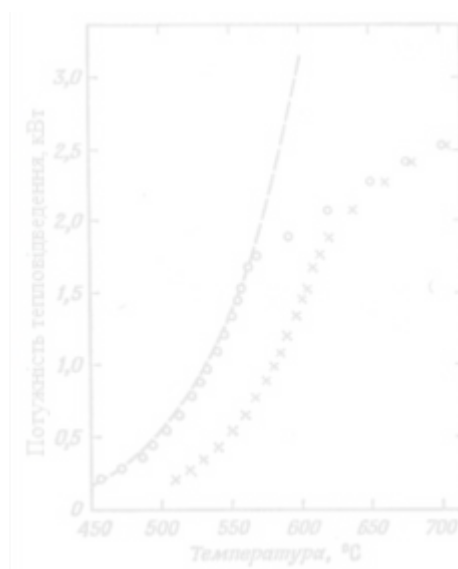
Тепло до випарної секції теплової труби підводилось за допомогою індуктора-соленоїда довжиною 140 мм. Тепловідведення від зони конденсації відбувалась теплопровідністю через газовий проміжок до водяного калориметра. Застосування різних сумішей аргону і гелію в газовому проміжку дає можливість змінювати температуру теплової труби при фіксованій кількості теплоти, що підводиться, або варіювати тепловідведення при постійній температурі теплової труби. Короткі ділянки труби, позначені цифрами I - III, були ізольовані так, що вимірювані температури стінки могли служити для визначення статичного тиску пари в цих місцях (ділянка I - початок випарника, ділянка II - вихід з випарника і ділянка III - кінець конденсатора). Інші вимірювання температури стінки в різних точках по осі труби давали додаткову інформацію про поведінку пари[9].

#### 1.5.1 Запуск теплової труби

Робота теплової труби на етапі запуску залежить від конструкційних особливостей труби, від способів обігріву та охолодження, від графіка зміни потужності в часі, що підводиться. Теплові труби, як правило, призначені для ізотермічної роботи при певній температурі та потужності, що передається. Спосіб запуску теплової труби, що не представляє будь-яких ускладнень, - ізотермічний. Її розігрівають до робочої температури і поступово збільшують потужність, що підводиться до теплової труби, до заданого значення. Однак часто

такий спосіб запуску незручний або навіть неможливий. Як правило, здійснюється й відведення тепла від одночасної зони конденсації теплової труби. При запуску теплової труби виникають питання, яка допустима швидкість при даному способі підведення теплоти, чи можливий запуск теплової труби, який зв'язок між потужністю, що підводиться і передається, залежно від температур у трубі.

Теплова труба на натрії із закритим з торців кільцевим каналом і працюючим водяним калориметром дозволила без особливих труднощів провести пускові випробування. Потужність, котра підводилась поступово підвищувалась. В газовому проміжку калориметра розташовувався аргон. На рис.1.4 зображена крива, по якій можна прослідкувати обмеження в тепловій трубі по звуковій швидкості пари.



X – максимальна температура випарника I; O – температура на виході з випарника II

Рисунок 1.4– Характеристики запуску теплової труби [10]

Температура на виході з випарника поздовж гладкої кривої, доки пара не заповнить конденсатор, досягнувши його виходу. Коли настає цей момент, поверхня тепловідведення залишається незмінною. Тоді при деякому прирості

теплоти, що підводиться, температура на виході з випарника збільшується більшою мірою, ніж у попередніх режимах. На рисунку видно, що це явище спостерігається при температурі  $\sim 560$  °C, але може статись при інших температурах в залежності від довжини конденсатора та умов охолодження.

#### 1.5.2 Ресурс роботи

Основна причина, що призводить до перегорання високотемпературних теплових труб або втрати їх працездатності, є масоперенесення як металевих, так і неметалевих елементів конструкційного матеріалу із зони конденсації в зону випаровування. Забивання гноту при кристалізації перенесених мас призводить до його здійснення. Підвищення концентрації неметалічних домішок у зоні випаровування, сприяє посиленню як міжкристалітної корозії матеріалу стінки та гноту, їх розчинення з одночасним послабленням міцності.

Результати випробувань високотемпературних лужно-металевих теплових труб на ресурс роботи показали, що для температур нище  $1000$  °C ситуація доволі сприятлива – для труб є матеріали, котрі можуть працювати протягом довгого часу при температурах  $500-750$  °C.

Для отримання тривалого ресурсу роботи необхідна відповідна техніка заповнення труби теплоносієм, котра гарантує добру очистку від домішок як конструкційних матеріалів, так і лужного металу.

### 1.6 Металоволокнисті структури теплової труби

#### 1.6.1 Характеристика капілярної структури

Капілярна структура (КС) є основним конструктивним елементом ТТ. Вона одночасно виконує три важливі функції: капілярного насоса, транспортної артерії та тіла, в котрому відбувається процес теплообміну зі зміною агрегатного стану теплоносія. Особливістю будови КС ТТ обумовлюється структурні параметри, які здійснюють вплив на процеси, що протікають в ТТ. До структурних параметрів

відносять: форма і розміри частинок, котрі утворюють пористу структуру, та пористість для вставних КС чи розміри та крок канавок для конструкційних КС.

Частинки пористої структури можуть мати різну форму: сферичну або округлу (порошкові матеріали), циліндричну (сітки або волокнисті матеріали) діаметром 1...1000 мкм. Капілярна структура може бути утворена частинками однакових або різних розмірів. Крім розмірів і форми частинок, будова КС визначається способом їх укладання. Частинки КС, пов'язані, як правило, між собою, утворюють пори [11].

Однією з основних вимог, що висуваються до капілярної структури ТТ є відсутність нез'єднувальної (тупикових, закритих) пори. Пористість КС ТТ має бути ефективною (проникною).

Крім вихідних параметрів, важливими структурними характеристиками КС є розміри пор (капілярів). Залежно від наявності в КС однакових або різних розмірів їх можна розділити на регулярні (рівномірні) та нерегулярні (нерівномірні) структури. Конструкційні КС відносяться до регулярних структур, а вставні, як правило, — до нерегулярних. Ступінь рівномірності капілярно-пористого матеріалу характеризується розподілом пор за розмірами (радіусами або діаметрами) у вигляді інтегральних або диференціальних функцій розподілу, які знаходяться експериментально методом ртутної порометрії.

#### 1.6.2 Теплофізичні властивості капілярної структури

Якщо теплопередаюча здатність теплової труби залежить від капілярно-транспортних характеристик КС, то термічний опір ТТ багато в чому визначається ефективною теплопровідністю КС. Коефіцієнт ефективною теплопровідності будучи характеристикою КС ТТ, по суті є коефіцієнтом пропорційності в законі теплопровідності Фур'є між питомим тепловим потоком і градієнтом температури в пористому тілі, насиченого рідиною. Коефіцієнт  $\lambda_{\text{эф}}$  - загальна характеристика, що показує спільний результат передачі теплоти теплопровідністю через каркас КС та рідину в поровому просторі. При теплопровідності середовища в порах, близькій до нуля, маємо коефіцієнт каркасної теплопровідності  $\lambda_{\text{кр}}$ . Каркасна

теплопроводність є коректнішою теплофізичною характеристикою пористих матеріалів, ніж ефективна теплопроводність.

Ефективна теплопроводність є умовною величиною, що стає особливо очевидним, наприклад, при вдуванні теплоносія через пористий шар або кипіння в капілярно-пористих матеріалах, у той час, як каркасна теплопроводність і в цих умовах залишається цілком конкретною величиною, що характеризує властивість провідності пористого матеріалу. Однак, у ряді випадків, наприклад, для аналізу термічного опору зони конденсації ТТ або зони випаровування при випаровуванні теплоносія, методично правильно використовувати поняття ефективної теплопроводності КС.

Коефіцієнти ефективної теплопроводності КС ТТ можуть бути знайдені на підставі аналітичних або експериментальних досліджень. Аналітичний підхід до визначення  $\lambda_{\text{эф}}$  полягає у використанні принципу узагальненої провідності стосовно елементарної модельної осередку КС, отриманої в результаті моделювання реальної капілярно-пористої структури. Результати аналітичних досліджень ефективної теплопроводності пористих структур зазвичай відрізняються від істинних значень  $\lambda_{\text{эф}}$ . Це зумовлено тим, що в ідеалізованих моделях не відбиваються особливості будови реальних КС і не враховуються всі істотні чинники, що визначають процес перенесення теплоти. Із вказаних причин знаходження коефіцієнтів ефективної теплопроводності часто використовується або додатково залучається експеримент [12].

Експериментальні дослідження величин  $\lambda_{\text{эф}}$  проводяться, наприклад, стаціонарним методом порівняння. З дослідів зазвичай встановлюється залежність коефіцієнтів ефективної теплопроводності КС від визначальних параметрів (теплопроводності рідини і матеріалу структури, пористості, розмірів частинок). Значення коефіцієнтів ефективної теплопроводності вставних КС ТТ можуть змінюватися в межах від 0,1 до 1 Вт/(м·К) для КС із сіток, високопористих порошкових та волокнистих матеріалів, насичених низькотемпературними теплоносіями, та до 10 . 300 Вт/(м·К) для КС, насичених високотемпературними теплоносіями.

### 1.6.3 Металоволокниста структура теплової труби

Капілярна структура відіграє важливу роль у теплових процесах, що протікають у ТТ, оскільки вона забезпечує рециркуляцію робочої рідини із зони охолодження в зону нагріву для ефективного функціонування ТТ незалежно від її орієнтації у просторі. Існує кілька видів капілярних структур: вставні, конструктивні та комбіновані. Вставні КС виготовляються з капілярно-пористих матеріалів. У теплових трубах використовуються, як правило, сітки, порошкові та волокнисті матеріали. Конструктивні капілярні структури – це система пазів, вирізаних на внутрішній поверхні корпусу ТТ. У комбінованих КС на внутрішній поверхні корпусу крім власне капілярної структури також є артерії, призначені тільки для транспорту теплоносія [13].

Одним з видів КС є металоволокнисті. Використання пористих металоволокнистих матеріалів дозволяє розробляти такі конструкції теплових труб, характеристики яких наближаються до потенційних можливостей цих теплопередаючих пристроїв. Одним з основних параметрів капілярної структури, що впливають на теплопередаючі характеристики ТТ, є проникність, яка характеризує здатність КС пропускати через себе рідину. Виготовлення металоволокнистої капілярно-пористої структури (МВКС) відбувається за допомогою повстунання на плоскій поверхні з подальшим запіканням у печі при температурі, близькій до плавлення металу волокна. Волокна капілярної структури в ТТ розташовуються в основному паралельно осі труби і збігаються з напрямком руху теплоносія. Проникність та капілярні властивості МВКС залежать від її структурних параметрів, фізичних властивостей рідини та поверхневих явищ на межі розділу «волокно – теплоносій». Проникність є однією з важливих транспортних характеристик КС, проте коректне її моделювання, як і інших характеристик таких структур викликає чималі труднощі, оскільки виготовлення таких структур з монодисперсних дискретних частинок (волокон) є дуже складним і багатофакторним процесом. Крім того, МВКС анізотропні за

своею природою, що насамперед виявляється у можливості фільтрації теплоносія у напрямку вздовж волокон і поперек них.

Волокнисті пористі матеріали формують із дискретних волокон, які отримують механічними технологічними способами з дротів або волокон (рис. 1.5). Основою виготовлення волокнистих матеріалів є технологічні процеси отримання заготовок металевої повсті; подальші процеси спікання та пресування повсті [14]. Діаметр дискретних волокон, що зазвичай використовують у ТТ, складає від 10 до 100 мкм, довжина – від 3 до 10 мм, пористість - 40-90%, товщина КС 0,3-3,0 мм.



Рисунок 1.5 - Поверхня пористого металоволокнистого матеріалу (збільшено в 100 разів) [15]

#### 1.7 Способи заповнення теплових труб теплоносієм

Теплові труби з лужно-металевими теплоносіями (натрієм, калієм) в цілому мають характерно високу теплопередачу. Такі теплоносії сумісні з широко поширеними конструкційними матеріалами, як нержавіючі сталі та сплави на основі нікелю. Дані теплові труби можуть забезпечити тривалий ресурс роботи за умови якісного очищення корпусу труби, гноту та теплоносія від небажаних



домішок, насамперед кисню. Натрій має дуже сприятливі теплофізичні властивості і діапазон температур 650-1000 °C є найбільш прийнятним. Калій застосовують лише в тих випадках, коли потрібно забезпечити ізотермічність труби та високу теплопередачу при температурах 550-650°C, тобто в тому діапазоні температур, де для натрію тиск парів замалий.

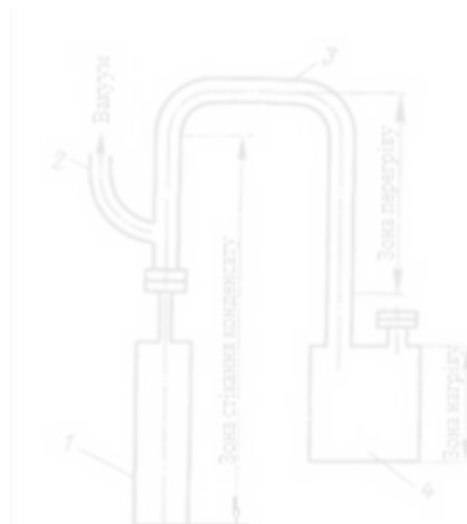
#### 1.7.1 Метод вакуумної перегонки

На рисунку 1.6 представлена схема заповнення теплових труб з натрієм та калієм. Система заповнення попередньо знегажувалась при вакуумуванні впродовж 4 годин при температурі 900°C. Необхідна кількість теплоносія завантажувалась в дистильовану посудину. Нагрівачі та термопари дозволяли підтримувати необхідний температурний режим в дистильованій посудині, опускній трубі, конденсаційному відгалуженні на тепловій трубі. За допомогою перегонки калію опускна та теплові труби в першу чергу нагрівались до 100°C, конденсаційні відгалуження до 350°C. У дистильованій посудині температура підтримувалась близько 400°C завдяки процесу перегонки.

Перегонка натрію відбувалась при температурі опускної та теплової труб, що дорівнювала 150°C, температурі конденсаційного стояка 450°C, та дистильованої посудини, яка нагрівалась до 500°C. На початковому етапі процесу кипіння та перегонки в стояку, потім в опускній трубі спостерігалось значне підвищення температури. Після завершення перегонки температура в дистильованій посудині підвищилась. Під час перекачування рідини необхідно безперервно вистукувати випускную трубу, щоб запобігти накопиченню рідини в цій частині системи.

Після заповнення, нікелеву трубку розміром 1/4 дюйма розплющили та відщипнули біля теплової трубки. Її зварено в атмосфері інертного газу в електронно-променевої вакуумній камері. Вакуумна термічна перегонка теплоносія в теплову трубу дозволяє позбутися від значної частини домішок в теплоносії (таких як окисли калію та натрію), частково зменшує вміст дисоціюючих домішок та добре поєднується з задачею дегазації теплової труби.

Перед тестуванням готові теплові труби нагрівали в печі при температурі 800 °С протягом 60 годин, щоб рідина могла змочити капілярну структуру[16].

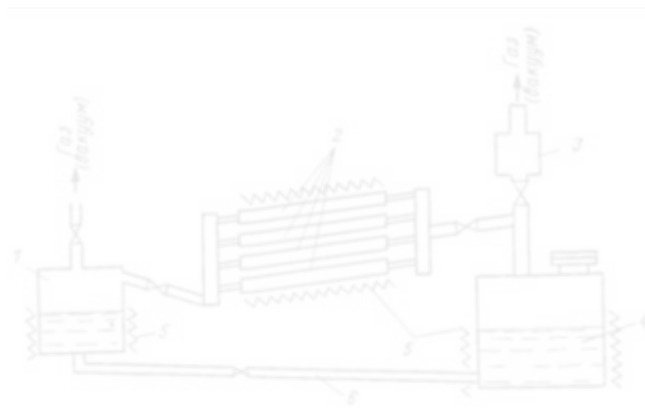


1 – теплова труба; 2 – лінія вакуумування; 3 – з'єднувальна лінія; 4 – завантажувальний бак

Рисунок 1.6– Метод вакуумної прогонки [17]

#### 1.7.2 Метод заповнення наскрізною прокачкою парів теплоносія

Установка представлена на рис. 1.7 складається з парогенератора та зливного баку, до якого через колектори з вентилями приєднана збірка із паралельно з'єднаних теплових труб. Заповнення відбувається наступним чином. Лужний метал (натрій, калій) в парогенераторі протягом доби знегажується при вакуумуванні через парову пастку. Теплові труби також знегажуються у вакуумі при температурі 750 °С. Далі з парогенератора при температурі 480°С для калію та 550 °С для натрію пара лужного металу подається в теплові труби, щоб сконденсуватись.



1 – зливний бак; 2 – теплові труби; 3 – пастка парів лужного металу; 4 – парогенератор; 5 – нагрівач; 6 – лінія для повернення металу в парогенератор

Рисунок 1.7 – Метод заповнення наскрізною прокачкою парів теплоносія [17]

Труби заповнюються конденсатом. При цьому відбувається змочування гноту лужним металом. Після чого труби охолоджуючи температуру на 50-70 °С перевищуючи температуру плавлення, надлишок металу видаляється продувкою через збірку чистого інертного газу (аргону чи гелію). В тепловій трубі залишається лужний метал, який заповнив простір гноту. Необхідний надлишок металу забезпечується внаслідок незливного об'єму металу (підбирається зміна нахилу труб та швидкості продувного інертного газу). Після заповнення, вентилі за колекторами перекривають, збірку теплової труби відокремлюють від стенду та розташовують у вакуумну камеру, де кожна з теплових труб герметизується.

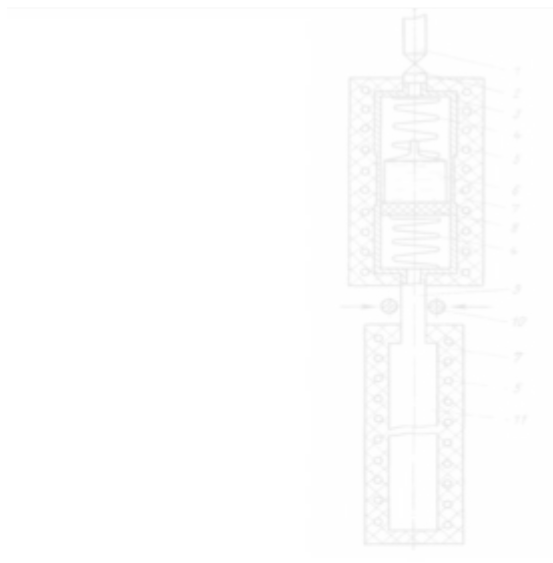
Цей метод дозволяє здійснювати заповнення одночасно великої кількості труб, у тому числі труб, з'єднаних між собою (наприклад, зварених в трубну дошку). Проведення додаткової операції із забезпечення змочування гноту не відбувається – гнот змочується в процесі заповнення. Немає потреби попереднього дозування теплоносія – гнот при такому методі заповнення виявляється необхідна кількість лужного металу. Правильність дозування ще до кінцевої пайки кожного з труб може бути перевірена за допомогою рентгенівського просвічування.

### 1.7.3 Ампульне заповнення

Схема заповнення представлена на рисунку 1.8. Очищення відбувається шляхом дистиляції та знегажування при вакуумуванні лужного металу, який загерметизований в скляній ампулі, котра поміщається в тонкостінну ємність, що розташована над тепловою трубою. Заповнення проводиться наступним чином.

Вакуумована ємність з ампулою нагрівається до температури вище температури лужного металу. Ампулу роздавлюють, стискаючи стінки ємності, рідкий лужний метал зливається в теплову трубу (за необхідністю надлишок залишають на дні ємності). Лужний метал заморожують в тепловій трубці та проводять «холодне відпаювання» з наступним зварюванням. Для цього всю збірку поміщають в вакуумну камеру та за допомогою електронного струменю розрізається з'єднувальний капіляр між ємністю з ампулою та тепловою трубою, герметизують шляхом оплавлення з'єднувального капіляра. Перед заповнюванням проводиться дегазація труби. Такий спосіб заповнення досить простий, забезпечує високу точність дозування, дозволяє ретельно знегазити теплову трубу. Недоліком способом може бути відсутність можливість очищення лужного металу після розгерметизації ампули.

Повне видалення некондесованих газів для теплових труб з лужно-металевими теплоносіями зазвичай важко виконати. Для більш ретельного видалення газів з труби може бути використана наступна додаткова операція. Після зливу лужного металу в теплову трубу з'єднувальний капіляр перемикають на температурний режим роботи 600-650 °C.



1 – труба до вакуумного насосу; 2 – вентиль; 3 – корпус завантажувального баку; 4 – пружина; 5 – нагрівач; 6 – ампула з теплоносієм; 7 – теплова ізоляція; 8 – фільтр з металевої сітки; 9 – з'єднувальна труба між завантажувальним баком та тепловою трубою; 10 – перетискний пристрій; 11 – теплова труба

Рисунок 1.8 Схема ампульного заповнення теплових труб [17]

Візуально при цьому вдається спостерігати низькотемпературну «холодну» зону в верхній конденсаторній частині труби, котра утворилась завдяки газам, які не сконденсувались. Їх періодично вилучають при ослабленні перетиску з'єднувального капіляру до повного зникнення холодної зони. Проведення такої процедури дозволяє одночасно забезпечити змочування гноту лужним металом, а також, в цілому, перевірити працездатність теплової труби.

Таким чином розглянуто загальні особливості та властивості теплових труб. Розглянуто причини і наслідки високої теплопровідності труб, їхню ізотермічність, вивчено основу та базові принципи трансформації теплових потоків, котрі транспортуються цієї трубою. За допомогою аналізу теплоносіїв можна визначити умови та причини їх відповідностей, а також загальний принцип

дії під час нагрівання труби. Класифікація діапазону робочих температур показала, що для кожного виду температурної теплової труби є свої певні вимоги, які характеризуються матеріалом при застосуванні та можливістю функціонування при певному виді навантаження. Також було виявлено й проаналізовано теплову трубу в її конструктивних деталях, серед яких: стінка, капілярна структура та інші деталізовані особливості.

Під час розгляду загальної характеристики роботи до уваги брався запуск теплової труби та її ресурс роботи, так, врешті, було виявлено, що запуск в більшості залежить від швидкості, потужності та температури, регуляція яких фільтрується за допомогою обігріву та графіка потужності, а для ресурсу необхідна відповідна очищувальна техніка. Було розібрано металоволокнисту структуру теплової труби включно із структурою капілярної труби, її теплофізичними властивостями.

Серед виявлених видів заповнення труби теплоносієм було розглянуто метод вакуумної перегонки, заповнення прокачкою парів та ампульне заповнення, які, за дослідженням, усі рівноцінні за своїми можливостями [18].

Аналіз літератури показав, що високотемпературні труби є досить простими в технологічному відношенні пристрої, котрі дозволяють транспортувати теплову енергію з ефективністю більше 90%, не містять рухомих деталей, безшумні в роботі, що характеризується надійністю та тривалим ресурсом роботи без обслуговування. Основною полумкою високотемпературної труби являється міцність теплової труби, особливо труба, яка містить хімічно-активні теплоносії, такі як натрій, калій та цезій, можуть викликати пожежу на установці та небезпечні опіки обслуговуючого персоналу. Проте, принципову проблему можна вирішити, використовуючи двошаровий корпус: зовнішнього шару та внутрішнього – оптимального для заданого режиму труби та сумісного з робочою рідиною.

## 2. КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ

За минулі роки у світі та в КПП проведено широкі дослідження характеристик теплових труб, розвинуто теорію цих пристроїв, розроблено методи їх розрахунків. Виконано великий обсяг робіт технологічного плану, що ставили за мету визначення найбільш підходящих для високотемпературних теплових труб (ВТТ) робочих рідин-теплоносіїв та матеріалів гнотів, корпусів теплових труб у різних діапазонах робочих температур від 120<sup>0</sup>С до 850<sup>0</sup>С з урахуванням їх сумісності протягом досить тривалого терміну служби. Були проведені ресурсні випробування труб у модельних та натурних умовах. Істотних успіхів було досягнуто в сфері технології виготовлення теплових труб. Одночасно вдосконалювалася конструкція теплової труби, створювалися нові типи труб. Це відбилося у постійному зростанні числа договорів з КПП. Звичайно, основна їхня частка припадає на замовлення з України. Проте в останнє десятиліття все більше договору укладається із зарубіжними замовниками – Китай, Ізраїль, Франція, Польща.

### 2.1 Конструкція ВТТ

Труба має витримувати максимальний тиск пари. З цієї причини корпус і торцеві кришки труби повинні бути точно розраховані, а їх з'єднання має бути виконане за допомогою високоякісного зварювання до завершення розрахунків і виробництва великої партії продукції. Виготовлені експериментальні труби можуть бути випробувані під високим тиском пари шляхом нагрівання труби настільки, щоб переконатися, що корпус труби, кришки та торцеві з'єднання здатні витримувати розрахунковий тиск пари при відповідному запасі міцності, що гарантує безпечну роботу.

На даному етапі розробки ВТТ, ще дуже рано говорити про те, що є єдиний підхід до теорії - розрахунок та виготовлення теплових труб, тому в дослідників були спроби знайти найбільш прийнятний метод.

Виготовлення канавок може здійснюватися протяжкою, екструзією, фрезеруванням, штампуванням, гофруванням, витравленням та іншими способами заготівлі або на внутрішній поверхні корпусу труби. Канавки можуть бути отримані за допомогою набору поздовжніх пластинок, скріплених кільцями і поміщених усередині корпусу теплової труби або шляхом приварювання до корпусу гофрованої фольги. Коли корпус труби виконується методом осадження металу (наприклад, вольфраму) з газової фази, зручно виготовляти канавки безпосередньо в корпусі.

Вельми простий у виготовленні та близький за своїми властивостями до канавкової є структура з гофрованої сітки. У високотемпературних теплових трубах пружних сил сітчастої гофри достатньо, щоб щільно утримувалася всередині корпусу. Така структура легко може бути виготовлена багатоканальною (тобто має канали різних гідравлічних діаметрів), що зменшує чутливість її в недозаправці теплоносія, а також дає інші переваги.

Одним із недоліків витих теплообмінних апаратів з гладкими трубками при створенні систем охолодження або акумулювання теплової енергії є менші значення тепловіддачі в міжтрубному просторі (у 3-5 разів) порівняно з тепловіддачею при оребреній поверхні. Оребрення труб дозволяє помітно поліпшити теплові та масо-габаритні показники ТТ, апаратів та систем. Потреба високоефективних ВТТ з оребреними зі сторони повітря (газу) на їх поверхнях дуже висока. Поверхні утворюються звичайним шляхом насадки окремих пластин на гладку трубу. Проте, крім труднощів технологічного характеру, що спричиняють до підвищення ціни виготовлення, ці ВТТ мають істотний недолік, що тепловий контакт між ребрами і несучою поверхнею не завжди надійний і може порушитись при експлуатації.



### 2.1.1 Характеристики материала трубы

Для ВТТ з натрієм та калієм рекомендуємо виготовляти корпус з нержавіючих сталей марки AISI 316 та AISI 321:

- нержавіюча сталь AISI 316 являється однією з небагатьох сплавів у своїй цінній категорії, котра характеризується високою стійкістю до утворення корозії навіть на протязі тривалого часу експлуатації в агресивних середовищах при температурах 550<sup>o</sup>C–800<sup>o</sup>C. Матеріал широко використовується в багатьох галузях промисловості, зі сталі виготовляють чоловічу біжутерію та різні прикраси;
- марка сталі AISI 321 є слабوماгнітною, в стані після термічної обробки практично немагнітна, чинить опір атмосферній та міжкристалічній корозії в сукупності з жаростійкістю, стабільністю, міцністю, легкістю обробки, можливістю використання в широкому діапазоні температур апаратів продовольчого та торгівельного машинобудування, товарів народного споживання та ін.

### 2.1.2 Порівняння сталей AISI 316 та AISI 321

Серія сталей 300 об'єднує клас хромонікелевих аустенітних сплавів. До цієї серії відносяться AISI 316 і AISI 321. Склад металів налічує схожі легуючі складові. Зіставлена сталь AISI 316 та AISI 321 за хімічним складом, можна визначити їх схожість та відмінності.

Хімічний склад AISI 316 та AISI 321:

AISI 321:

- Вуглець – 0,1%;
- Хром – 17,0 – 19,0%;
- Нікель – 9,0 – 11,0%;
- Титан – 0,5% мах.

AISI 316:

- Вуглець – 0,08%;
- Хром – 16,0 – 18,0%;
- Нікель – 10,0 – 14,0%;

- Молибден – 2,0 – 3,0%.

Мінімальний відсоток вуглецю в обох металах забезпечує зварюваність і досить високу пластичність. Наявність великої концентрації нікелю та легуючої складової – молибдену в 316, визначає цей метал, як дуже стійкий до негативних атмосферних явищ. Титан у сплаві 321 підвищує його міцність, але при цьому значно підвищує вартість. Повний перелік хімічного складу обох металів дивіться табл.2.1.

Таблица 2.1 – Хімічний склад нержавіючих сталей AISI 316 та AISI 321

Марк и _____	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Ti	Fe
AISI 321	<0,0 3	<2, 0	<0,04 5	<0,0 3	<1,0	17,0 - 19,0	9,0- 12,0	-	<0, 5	Інш е
AISI 316	<0,0 8	<2, 0	<0,04 5	<0,0 3	<1,0	16,0 - 18,0	10,0 - 14,0	2,0 - 3,0	-	Інш е

### 2.1.3 Властивості AISI 316 та AISI 321

Обидва сплави в певних умовах експлуатації можуть замінити один одного. Це обумовлено тим, що більшість властивостей подібні між собою (хоча між AISI 316 та AISI 321 є відмінності). AISI 316 відноситься до складу аустенітних, конструкційних нікелевмісних криогенних сталей. AISI 321 – хромонікелева нержавіюча сталь загального призначення, з додаванням до металу титану.

До загальних властивостей відносять:

- можливість експлуатації в умовах впливу агресивних середовищ при високих температурах;
- легка зварюваність;

- стійкість до утворення корозійних відкладень, у тому числі щілинних та піттингових;
- міцність (підвищений показник у **AISI** 321 рахунок титану в сплаві);
- пластичність;
- оброблюваність.

Крім того, щоб точно визначити, яку вибрати сталь для виготовлення конструкцій – **AISI** 321 або **AISI** 316 нержавіюча сталь, необхідно знати умови їх експлуатації. Так, наприклад, незважаючи на підвищену міцність **AISI** 321 за рахунок титану, цей метал рекомендовано використовувати тільки для відповідальних конструкцій (оскільки він дорогий). Без огляду на включення до його складу хрому та нікелю в досить великій концентрації, його не застосовують для виробництва виробів, які працюватимуть в умовах впливу середовищ, що сильно окислюються.

## 2.2 Порівняння сталей AISI 316Ti та AISI 316L

Корозійностійкі сталі загального призначення AISI 316Ti, як AISI 316L, що містять нікель, є версіями аустенітної нержавіючої сталі AISI 316. Тому порівняння AISI 316L AISI 316Ti може стосуватися лише невеликих змін у їх хімічних складах.

Хімічний склад сталей AISI 316L /AISI 316Ti:

- Вуглець – 0,3% / 0,08%;
- Хром – 16,0 – 18,0% / 16,0 – 18,0%;
- Нікель – 10,0 – 14,0% / до 16,0%;
- Молібден – 2,0 – 3,0% / 2,5%;
- Титан – відсутній/ 0,5%, можливо збільшення до 0,7%.

Аналізуючи відсотковий вміст основних елементів в обох сплавах, легко визначити, що до сплаву **AISI** 316Ti додано титан, і трохи збільшено відсотковий вміст молібдену. Повний перелік хімічного складу обох металів дивіться табл.2.2.

Сплав AISI 316L є низьковуглецевим, з малим порівняно з AISI 316Ti відсотком вуглецю – 0,03%. Титан суттєво збільшує міцність, а молібден – підвищує його опірність до корозійних утворень. Таким чином, у деяких випадках, при високих вимогах до технологічності, вибираючи між AISI 316l або AISI 316ti краще зупинити свій вибір на посиленому титановому сплаві AISI 316Ti.

Таблиця 2.2 - Хімічний склад нержавіючих сталей AISI 316L та AISI 321Ti

СТАНДАРТ	МАРКА	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	
ASTM A240	AISI 316L	≤0.030	≤0.75	≤2.0	≤0.045	≤0.030	16.00 - 18.00	10.00 - 14.00	2.00 - 3.00	
СТАНДАРТ	МАРКА	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti
ASTM A240	AISI 316Ti	≤0.030	≤0.75	≤2.0	≤0.045	≤0.030	16.00 - 18.00	10.00 - 14.00	2.00 - 2.50	5 + (C + Ni) - 0.7

### 2.2.1 Досвід виготовлення ВТТ

В ході розробки та дослідження ВТТ доцільно виконати наступні роботи:

- розрахунково – теоретичне дослідження шляхом доступних інструментів моделювання;
- експериментальні роботи по дослідженню ефективності теплопередачі із застосуванням різних типів сталей та теплоносіїв теплових труб;
- вивчення критичних результатів досліджень, що належать до використання їх у такому вигляді експлуатації;
- виготовлення повномасштабної експериментальної установки з теплопередавальною потужністю ВТТ до 10 кВт, включаючи роботи за програмою та методикою проведення ресурсних випробувань.

Має бути проведений детальний аналіз теплоакumuлюючої системи – від моделювання до її виготовлення для того, щоб вичерпним чином оцінити можливості застосування теплових труб у складі малопотужних установок, а також можливості та ефективність комбінованого типу системи. Доцільно

побудувати та провести випробування у повному обсязі прототип-демонстратор системи з ВТТ потужністю 5 кВт (діаметр труб: 40 – 80 мм. Довжина: до 6 – 10 м, теплоносій - калій або натрій).

Основними цілями такої роботи є:

- розробка, виготовлення та дослідження експериментального зразка ТТ з вихідною потужністю, що передається, не менше 5 кВт;
- практичне підтвердження ефективності застосування теплових труб як теплотрансформуючих елементів у складі малопотужних акумулюючих систем;
- проведення більш глибоких досліджень та розробка плану просування акумулюючих систем.

Розроблений зразок ВТТ повинен відповідати наступним основним параметрам(приклад зображений на рис.2.1):

- діаметр ТТ не менше 40мм;
- потужність, що передається при зонах теплопідведення 1м та більше: понад 5кВт;
- довжин ТТ: не менше 6м.



Параметри натрієвої теплової труби:  $D= 100$  мм,  $h = 10$  м,  $t = 600$  ° С,  $W = 90$  кВт

Рисунок 2.1 – Теплова труба великого габариту

Передбачається вивчення можливостей серійного виготовлення ВТТ із різними теплоносіями, а також їх підготовка.

### 2.2.2 Ресурс теплоносія

Проведена оцінка придатності (за напрацьованим ресурсом та зберіганням) пари теплоносіїв (калій) – корпус (нержавіюча сталь AISI 316) становить для ВТТ КПІ не менше 4-5 років (може бути тільки орієнтовною). Для більш точної оцінки треба скористатися методом, розробленим для стендових систем. Зважаючи на малу товщину оболонки теплової труби та невеликого перерізу труби, правомочність методу оцінки ресурсу ВТТ за аналогією з низькотемпературними тепловими трубами (НТТ) полягає в безсумнівно існуючій спільності закономірностей корозійних процесів у рідкометалевих пристроях різного типу та низькотемпературних ТТ з водою, аміаком, спиртами та іншими теплоносіями. Результати розрахунку терміну служби теплових труб з натрієм при виготовленні їх з хромонікелевих нержавіючої сталі AISI 316 та AISI 321 можна знайти в літературі. Деякі з таких труб після їх виготовлення спочатку забезпечували очікувані характеристики теплопереносу, але в процесі проведення попередніх випробувань погіршували ці характеристики.

В якості теплоносіїв у теплових трубах застосовані певні хімічні речовини та з'єднання, що мають при обраних робочих температурах рідку та парову фази. Проте кількість практично застосованих рідин дуже зменшуються через різні обмеження(табл.2.3). Можна виділити наступні умови та вимоги, яким повинен задовольняти теплоносіїв.

1. Забезпечення передачі великої кількості теплоти в осьовому напрямку є в багатьох випадках головною вимогою, котра повинна задовольнити труба. Критичні параметри рідини повинні бути значно вище робочих, так як із збільшенням температури - поверхневий натяг та теплота пароутворення зменшуються та набувають нуля в критичній точці.

2. Теплоносій повинен бути в корозійному відношенні сумісний з матеріалами стінки теплової труби та гноту в усьому діапазоні температур.

3. Для теплоносіїв, молекули яких складаються з декількох атомів, може виникнути вимога достатньої термічної стійкості та стійкості в умовах іонізуючого випромінювання.

Найкращими теплопровідними властивостями володіють металеві теплоносії. Сприятливі властивості мають літій та натрій. Літій має найсприятливіші властивості щодо теплоперенесення серед усіх теплоносіїв. В діапазоні високих температур інші теплоносії (рубідій, цезій), у тому числі з вогнетривкими матеріалами, мають значно гірші властивості тепловіддачі.

Таблиця 2.3– Діапазон робочих температур для теплоносіїв теплових труб

Теплоносій	Температура, °C		Теплоносій	Температура, °C	
	Нижня	Верхня		Нижня	Верхня
	КТТ			СТТ	
Гелій	–	–	Даутерм-А	150	320
Кисень	–	–	Ртуть	200	500
Азот	–205	–170	Сірка	200	600
Метан	–180	–120		ВТТ	
Етан	–150	–30	Цезій	350	700
Фреон-13	–120	–20	Калій	400	800
Фреон-23	–120	–20	Натрій	600	1000
Фреон-22	–90	40		ТВТТ	
	НТТ		Літій	1000	1700
Аміак	–60	60	Кальцій	1100	1800
Фреон-21	–50	90	Барій	1200	1650
Ацетон	–20	100	Свинець	1350	1900
Етанол	20	120	Індій	1500	2100
Гептан	30	160	Срібло	1600	2400
Вода	40	180			

Не достатньо дослідженою в наш час є сірка (особливо для трубок з гноту) в діапазоні температур 200-800°C. Сірка не є хімічним з'єднанням, тому не піддається до термічного розкладу і не чутлива до іонізуючого випромінювання. Вартість невисока. На відміну від сталі, сірка не викликає корозії. Вона не має протипоказань і проти використання сірки в ядерних реакторах. Проте в рідкому стані сірка має високу в'язкість. Встановлено, що додавання елементів з вільними електронами знижує в'язкість сірки. Наприклад, відносно невелика кількість (кілька відсотків) йоду може знизити в'язкість сірки в десять разів, забезпечуючи її ефективну роботу в гравітаційній тепловій трубі.

### 2.3 Опис конструкції експериментальної установки

На рис. 2.2 представлений зовнішній вид експериментальної установки для дослідження робочих характеристик ВТТ з металоволокнистою капілярною структурою. Робочі характеристики: теплове поле, максимально теплопровідна властивість, інтенсивність зони нагріву та в зоні конденсації, повний термічний опір. Також на рисунку зображена нумерація кожного елемента, котрий входить в систему експериментальної установки. Для контролю потужності використовується ватметр 1 марки Д592. На кожен нагрівач (всього 2) має бути власний ватметр. Так як даний прилад за своїми характеристиками дозволяє нам використати його в якості двох підключень. Саме підключення йде з проводів на обмотки лише потім на ватметр через обігрівач. Нагрівачі з ніхромового (довжиною 250 мм) дроту. Обмотка здійснена на трубу через ізоляцію 3 в зоні нагріву. В якості ізоляції було обрано базальтову вату, за рахунок своєї низької теплопровідності. Накладається на всю поверхню зони нагріву та транспорту, у вигляді багатьох шарів. Вимірювання температурного поля здійснюється цифровим 2 приладом РТМ-4 з датчиками – хромель-алюмелевими термопарами, передається в цифровому вигляді на регулятори температури 2. Термопари рівномірно розташовані по довжині труби. Термостат VEB HLW UN8, котрий являється насосом 4. Циркулює та подає рідину до зовнішньої поверхні зони конденсації теплової труби. Має можливість змінювати температуру рідини перед



подачею в експериментальну установку, але в досліді не використовували – являється малопотужним термостатом, котрий не в спроможі знижувати температуру. Тому було вирішено брати звичайну проточну воду через шланги з крану. Зона конденсації 5 відбувається за рахунок охолодження водою, але конструкцію зроблено за принципом конденсатора, у вигляді труби з трубками. Конденсатор зроблений з латуні, трубки впаяні (мідні). Розташовані по периметру. Всередині вхід-вихід зв'язаний змійкою, задля кращої циркуляції охолодження. Зона транспорту 6 на котрому практично не відбувається теплообміну з навколишнім середовищем та трубою. Це досягається завдяки надійній та ефективній теплоізоляції на цій ділянці. Через трубку 7 відбувається відвід рідини. Підведення теплоти здійснюється через автотрансформатор 8 марки РНО-250-5 завдяки два обмоткам до кожного нагрівача.



1- ватметр; 2 – терморегулятор температури; 3 – нагрівачі; 4 – термостат; 5 – конденсатор; 6 теплова труба; 7 – вихідна трубка для відтоку газу; 8 – силиконові трубки

Рисунок 2.2 - Зовнішній вигляд установки

## 2.4 Методика та програма дослідження високотемпературної теплової труби

В ході проведення випробувань ВТТ отримані експериментальні значення термічного опору та максимальної теплотранспортної властивості – основних теплотехнічних характеристик ВТТ від:

- 1) теплових навантажень;
- 2) робочих температурних рівнів;
- 3) кута нахилу ВТТ в полі сил тяжіння.

### 2.4.1 Підготовка інформаційно-вимірювальної системи до роботи

Послідовність операцій при проведенні замірів наступна:

1. Провести зовнішній огляд приладів, котрі входять в склад комплексу, перевірити наявність та надійність заземлених дротів.

2. Увімкнути вимірювальний прилад ТРМ (2шт.) та перевірити на наявність всіх робочих каналів.

3. а) встановити режим вимірювань (статика, динаміка) та час запису результатів;

б) встановити діапазон вимірювань;

в) ввести кількість датчиків, номери всіх використовуваних та тестувальних каналів;

г) перевірити тарування датчиків температури – термопар хромель – алюмель.

4. Заповнити бак термостата рідиною. Встановити регулятор контактного термометра проти необхідної робочої температури та розігріти термостат. Витрата води в термостаті повинен бути постійною. Включити джерело живлення та задати потужність тепловиділення на нагрівачах ВТТ.

### 2.4.2 Методика проведення випробувань

Основним методом дослідження робочих характеристик ВТТ є стаціонарний метод. Стаціонарний метод дослідження режимів роботи ВТТ розширює можливості визначення термодинамічних характеристик.

Експерименти проводяться при температурі охолоджуючої рідини – води  $t = (10 \dots 60)^\circ\text{C}$ . Основними параметрами при цьому є: температурне поле ВТТ;  $R_{\text{ТТ}}$  – термічний опір ВТТ;  $Q$  – тепловий потік, котрий передається тепловою трубою.

В процесі випробування відбувається зміна температури в зонах нагрів та конденсації ТТ, в зонах встановлення датчиків температури у відповідності зі схемою кріплення установки термопар (рис.2.3).



Датчик Т1 розташований в зоні нагріву на відстані 20 мм від торця труби; Т2 – 125 мм від торця; Т3 – в зоні транспорту на відстані 325 мм від початку труби; Т4 – 420 мм від початку труби; Т5 – розташовано на відстані 50 мм з кінця трубової труби.

Рис. 2.3 – Розташування датчиків температури

Послідовність проведення дослідів:

- 1) Підготувати стенд до роботи відповідно до пункту 2.4.1.

2) До зони випаровування в режимі номінальної роботи підводиться задане теплове навантаження  $Q_{\text{н}}$  при стабілізованій температурі  $T_{\text{пос}}$  та витраті охолоджуючої води  $G_{\text{охл}}$ .

3) За відсутністю збільшення температури пари та стінки або їх коливання на одному рівні (0,5...1К) в експерименті вимірюється електрична потужність нагрівача та витрата охолоджуючої води. Розподілення температури в стінці корпусу ТТ, температура пари та навколишнього середовища реєструється за допомогою приладів ТРМ.

4) За допомогою ЛАТРа встановлюється нове значення  $Q_{\text{н}}$ .

5) Максимальне  $Q_{\text{max}}$  визначається за характерною зміною росту температури стінки  $T_{\text{ст}}$  в крайньому перерізі від торця зони випаровування (в дослідженнях на відстані  $(10...15) \cdot 10^{-3}$  м).

По закінченню випробувань проводить розрахунок термічного опору за формулою 2.1. Будуються залежності  $R_{\text{ТТ}} = f(t)$ ,  $Q_{\text{max}} = f(t)$ .

Термічний опір розраховується за наступними залежностями:

$$R_{\text{ТТ}} = \frac{\left[ \left( \frac{t_1 + t_2}{2} \right) - \left( \frac{t_3 + t_4}{2} \right) \right]}{Q}, \quad (2.1)$$

де  $t_1...t_4$  – значення температур, яким відповідають термопари  $T_1...T_4$ , °С.

$Q$  – тепловий потік, котрий передається ТТ, Вт.

## 2.5. Аналіз похибок експерименту

Визначення величини очікуваних похибок вимірювань є одним із важливих факторів правильної постановки експерименту та отримання достовірних експериментальних даних. Проведено оцінку похибок експерименту з теорією обробки експериментальних даних.

Розрізняють систематичні, випадкові похибки та промахи. Систематичні помилки усуваються завдяки застосуванню вимірювальної апаратури і приладів достатньо високого класу точності.

Помилки усуваються, завдяки повторюваності експерименту, які ставлять під сумнів правильність результатів. Випадкові похибки, пов'язані з явищами, які не контролюються експериментатором (температура навколишнього середовища, тиск, вологість тощо).

У загальному випадку помилки виникають при заміні миттєвих або середніх значень замість істинних значень у обчислених залежностях. При проведенні даної роботи визначались осереднені значення температур зовнішньої стінки в зонах нагріву, охолодження та охолоджуючої рідини, а також значення відведеної теплоти. Їх ми визначали за допомогою термопар типу хромель-алюмель. Дана похибка складається з таких складових як: похибка вимірювань регулятора температури, похибка градування термопар, похибка визначення температур з таблиць.

Для визначення температури використовувався регулятор температури з якого за паспортними даними гранична похибка  $\delta_{рт}$  рівна 0,5%. Похибка градувань  $\delta_{тп}$  хромель-алюмель термопар не перевищує 0,2 °C при застосуванні зразкового платинового термометру опору. Максимальна температура для даного типу термопар 1300 °C, а середнє значення складає 550 °C. Похибка таблиць  $\delta_{таб}$  з яких брали результати, не перевищує 0,05%.

$$\delta_{m} = \frac{2}{550} \cdot 100 = 0,36\% \quad (2.2)$$

Маючи всі необхідні значення визначимо загальну похибку для визначення температур  $\delta_{\tau}$ :

$$\delta_{\tau} = \sqrt{\delta_{рт}^2 + \delta_{тп}^2 + \delta_{таб}^2} = \sqrt{0,5^2 + 0,36^2 + 0,05^2} = 0,61\% \quad (2.3)$$

Далі визначимо похибку визначення термічного опору:

$$\delta R_{\text{T}} = \sqrt{\delta^2(Q_{\text{TT}}) + \delta^2_{\text{під}}}, \quad (2.4)$$

де  $\delta(\Delta T_{\text{TT}})$  – відносна похибка визначення температур в зоні нагріву та зоні конденсації теплової труби і визначається як:

$$\delta(\Delta T_{\text{TT}}) = 2\delta^2_{\text{T}} = 2 \cdot 0,61^2 = 0,86\%, \quad (2.5)$$

$\delta Q_{\text{під}}$  – похибка визначення величини теплового потоку підведеного до ТТ. Для визначення теплового потоку використовувався вагметр в якого за паспортними даними гранична похибка рівна 0,15%.

Знаючи значення відносної похибки визначення температур та величини теплового потоку підведеного до ТТ можемо скористатись формулою (2.4) для визначення похибки термічного опору:

$$\delta R_{\text{T}} = \sqrt{\delta^2(Q_{\text{TT}}) + \delta^2_{\text{під}}} = \sqrt{0,86^2 + 0,15^2} = 0,87\%. \quad (2.5)$$

Таким чином, розроблена експериментальна установка та методика дозволяють знайти термічний опір високотемпературної теплової труби з металоволокнистою капілярною структурою при заданому температурному діапазоні роботи з середньоквадратичною похибкою 0,87% без потреби підвищення точності вимірювання.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВТТ

В ході дослідження обробки та аналізу даних за робочими характеристиками проводилось для ВТТ (рис.3.1), корпус було виготовлено з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т та заправлена теплоносієм – натрієм (хімічно чистий).



а) – зона нагріву; б) – зона конденсації

Рисунок 3.1 – Теплова труба з нержавіючої сталі

Експерименти, в ході яких було отримано експериментальні значення термічного опору та максимальної теплотransпортної властивості, були проведені у відповідності до методики, котра описана в розділі 2.

Умови роботи терморегулюючих систем космічних апаратів в космосі відрізняються від умов проведення дослідів даних систем на планеті Земля, що пояснюється наявністю сил гравітації. Для створення умов, котрі найбільш краще моделювали роботу теплових труб в невагомості, було запропоновано проводити експеримент при забезпеченні горизонтальності їх положення. В цьому випадку ТТ піддаються дії сили тяжіння лише в одному напрямку. Крім того, враховуючи конструкційні особливості ВТТ та властивості їх роботи вирішили, що нагрівач (імітатор приладу) розташований знизу (зона нагріву), а конденсатор у верхній

частині ТТ. Дослідження проводились стаціонарним методом в діапазоні теплового навантаження, що передається від 50 до 1800 Вт.

В ході роботи було отримано наступні результати.

Можна побачити фрагмент, на котрому видно, що труба починає світитись завдяки високому рівню температур. Вимірювання температурного рівня та положення ВТТ в експерименті на фото (рис 3.2).

На рис.3.3 – 3.4 представлено температурне поле по довжині ВТТ з нагрієм.

Можна побачити, що профілі розподілу температур по довжині теплової труби, яка залежить від потоку падаючої енергії. При підвищенні навантаження збільшується перепад температур між зонами нагріву та конденсації. В зонах ВТТ ріст відбувається при збільшенні теплового навантаження.

При наближенні ВТТ до граничного потоку, що передається – різниця температур по довжині зони нагріву росте. Це пояснюється умовами погіршення тепловіддачі в зоні випаровування, що призводить до осушення МВКС в торцевій частині труби цієї зони. У результаті цього процесу знижується можливість надходження рідини по капілярній структурі в зоні випаровування ВТТ. Потужність, при якій спостерігається дане явище, характеризує  $Q_{\max}$ .

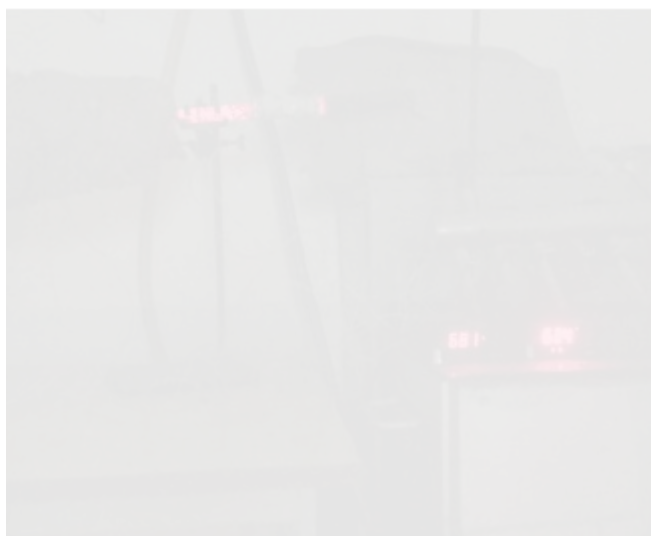


Рисунок 3.2 – фото стенду з ВТТ при потужності 900 Вт



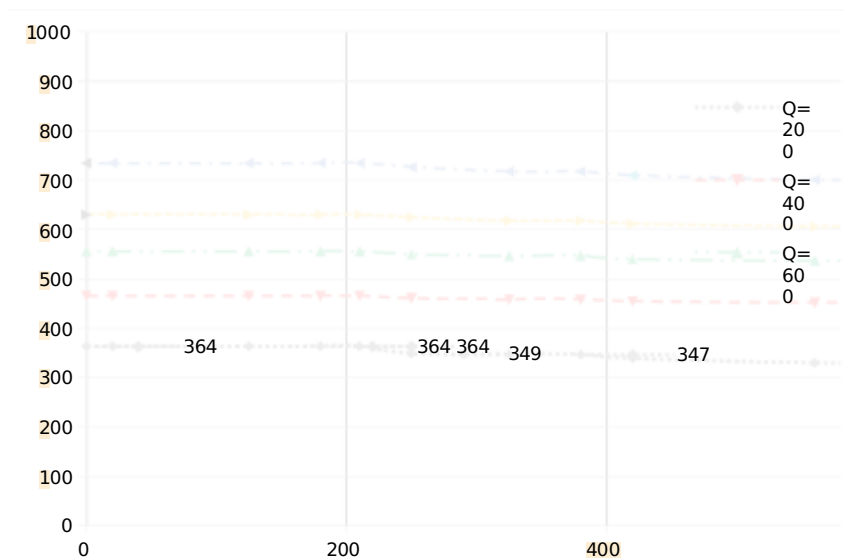


Рисунок 3.3 – Температурное поле по длине ВТТ – горизонтальное положение оси трубы

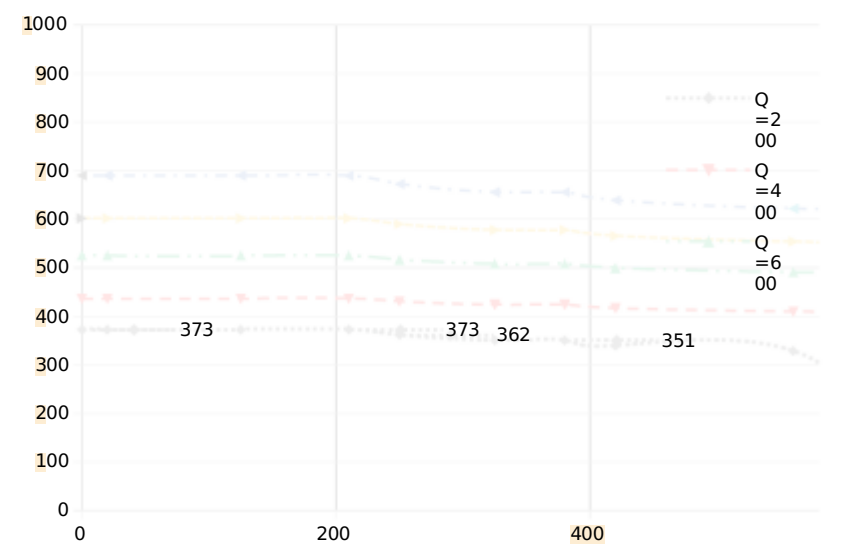


Рисунок 3.4 – Температурное поле по длине ВТТ– под углом 5 град (за силами тяжіння)

Найбільш інтенсивне зростання температури спостерігається в зоні випаровування, на відміну від зони конденсації, при збільшенні теплового потоку, що підводиться, призводить до небажаного росту термічного опору ВВТ (рис.3.3).

У табл. 3.1 представлені результати проведеного вимірювання температурного поля з одним нагрівачем опір якого  $R_{\text{н}}=16,5$  Ом. Положення труби  $0^{\circ}+0,5^{\circ}$ .

Таблиця 3.1 – Результати випробування при куті нахилу труби  $0^{\circ}+0,5^{\circ}$   
(горизонтальне розташування)

Q, Вт	ЗОНА НАГРІВУ (довжина 250 мм)		ЗОНА КОНДЕНСАЦІЇ (довжина = 300 мм)		R, К/Вт
	T1, °C	T2, °C	T3, °C	T4, °C	
100	345	340	323	86	
200	373	364	339	335	
300	396	385	358	363	0,1
400	437	435	411	410	0,06
500	480	480	452	450	0,06
600	525	525	491	490	0,06
700	566	566	526	526	0,05
800	602	601	554	554	0,06
900	644	641	586	587	0,062
1000	671	666	605	607	0,06
1100	690	687	622	623	0,062
1200	719	716	642	645	0,053

Розрахований термічний опір (теплотехнічних характеристик) за формулою 2.1.

У табл. 3.2 представлені результати випробування теплової труби. Проведено вимірювання температурного поля зі зміною термопари хромель-капель на хромель-алюмель. Положення труби приблизно  $+5^{\circ}$ . Розрахований термічний опір (теплотехнічних характеристик).

Таблица 3.2 – Результаты випробування теплової труби при куті нахилу +5°  
(термосифон)

Q, Вт	ЗОНА НАГРІВУ (довжина 250 мм)		ЗОНА КОНДЕНСАЦІЇ (довжина = 300 мм)		R, К/Вт
	T1, °C	T2, °C	T3, °C	T4, °C	
200	364	367	324	330	0,19
300	403	411	387	389	0,06
400	466	477	451	452	0,05
500	512	524	494	496	0,05
600	556	571	536	537	0,045
700	590	608	569	570	0,05
800	630	650	606	606	0,04
900	668	691	641	641	0,04
1050	699	726	670	670	0,04
1190	735	769	701	701	0,04

На підставі експериментальних даних (з табл. 3.1 та табл. 3.2) на рисунку 3.5 представлена залежність термічного опору від величини теплового потоку, що передається ТТ.

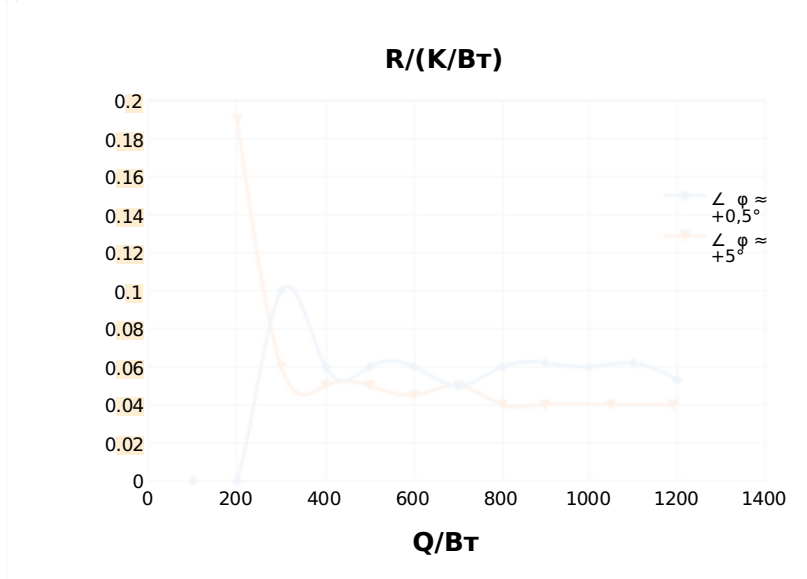


Рисунок 3.5 – Експериментальна залежність повного термічного опору ТТ від величини теплового потоку (табл.3.1 та табл. 3.2)

Спочатку термічний опір великий тому, що йде процес випаровування в зоні нагріву, а не кипіння. Після проходження далі термічний опір зменшується завдяки коефіцієнту тепловіддачі, який в зоні нагріву зростає за рахунок переходу від випаровування до перехідного – далі кипіння.

У табл. 3.3 представлені результати проведеного вимірювання температурного поля з обома нагрівачами ( $H_1 = 0.120\text{мм}$  та  $H_2 = 0.120\text{мм}$ ) при вимушеній конвекції (з вентилятором).

Таблиця 3.3 – Результати випробування з обома нагрівачами при вимушеній конвекції (горизонтальне розташування)

Q, Вт	ЗОНА НАГРІВУ (довжина 250 мм; $H_1 = 0.120\text{мм}$ , $H_2 = 0.120\text{мм}$ )		ЗОНА КОНДЕНСАЦІЇ (довжина = 300 мм)		R, К/Вт
	T1, °C	T2, °C	T3, °C	T4, °C	
400	397	403	330	345	0,15
600	434	443	407	406	0,05
800	512	526	485	486	0,04
1000	569	586	538	539	0,039
1200	623	644	586	585	0,04
1400	674	698	631	629	0,04
1500	692	718	647	646	0,039
1600	716	744	668	667	0,039

На підставі експериментальних даних (з табл.3.3) на рисунку 3.7 представлена залежність термічного опору від теплового потоку, що передається ТТ.

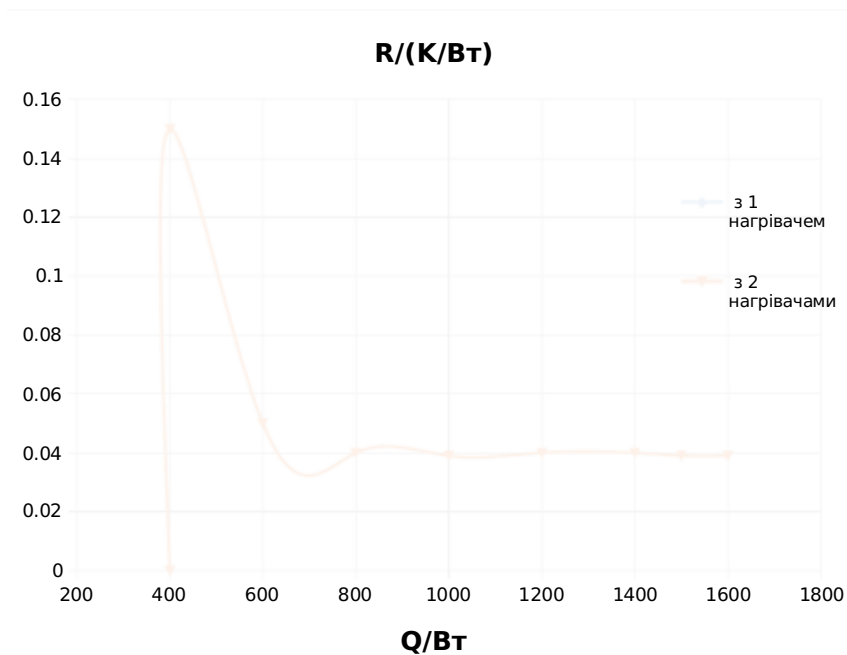


Рисунок 3.6 - Экспериментальная зависимость полного термического опору TT від величини теплового потоку (табл.3.3)

Таблиця 3.5 – Результати випробування при куті нахилу проти сил тяжіння ( $\alpha = -5^\circ$ )

Q, Вт	ЗОНА НАГРІВУ (довжина = 250 мм)		ЗОНА КОНДЕНСАЦІЇ (довжина = 300 мм)		R, К/Вт
	T1, °C	T2, °C	T3, °C	T4, °C	
200	371	375	323	332	0,23
400	433	437	407	406	0,068
600	515	517	483	481	0,056

На рисунку 3.8 представлена залежність термічного опору від теплового потоку, що передається тепловою трубою

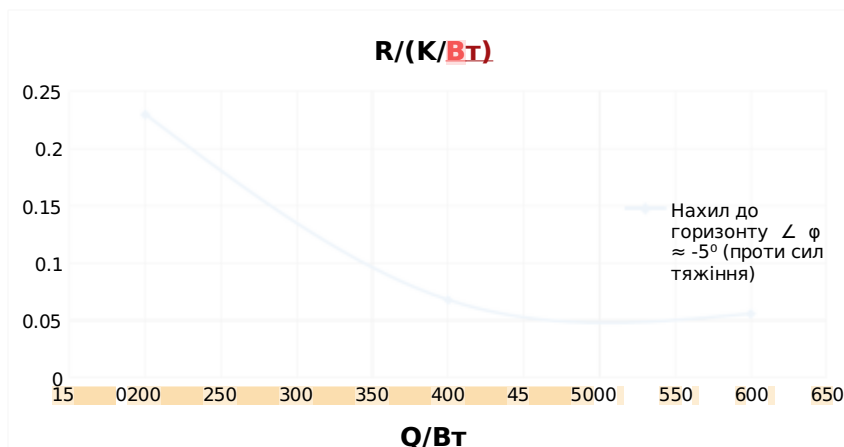


Рисунок 3.8 – Залежність повного термічного опору ТТ від теплового потоку

Розрахунок ВВТ з натрієм за формулою авторів [4] показало, що ВТТ мають високу теплотранспортну властивість. На рисунку 3.9 можна зробити висновок, що максимальний тепловий потік має максимум. Також з рисунку можна сказати, що натрій суттєво кращий, ніж калій за тепловою пароутворення.

### 3.1 Максимальна теплопередаюча здатність в стаціонарних умовах – $Q_{max}$

Розрахунок  $Q_{max}$  здійснюється за формулою:[3.1]

$$Q_{max} = \frac{2,19 \cdot N \cdot S_{жк} \cdot F_{жк}}{0,5 \cdot (L_n + L_k) + L_T}, \tag{3.1}$$

де  $N$  – параметр, котрий залежить від температури та має чіткий максимум для більшості теплоносіїв;[20]

$S_w$  – функція структурного параметру МВКС;

$F_{жк}$ - площа поперечного перерізу капілярної структури (формула 3.3);

$L_n$  – довжина зони нагріву, рівна  $300 \cdot 10^{-3}$  м;

$L_k$  – довжина зони конденсації, рівна  $150 \cdot 10^{-3}$  м;

$L_T$  – довжина транспортної зони, рівна  $290 \cdot 10^{-3}$  м.

Розрахунок N здійснюється за формулою 3.2:

$$N = \frac{\rho_{рід} \cdot \sigma \cdot r}{\eta_{рід}}, \quad (3.2)$$

де  $\rho_{рід}$  - густина рідини теплоносія, кг/м<sup>3</sup>;

$\sigma$  - поверхневий натяг, Н/м;

$r$  - теплота пароутворення, кДж/кг;

$\eta_{рід}$  - коефіцієнт динамічної в'язкості, Н·с/м<sup>2</sup>.

Розрахунок площі поперечного перерізу капілярної структури розраховують за формулою  $F_{к.с.}$ :

$$F_{к.с.} = \frac{3,14 \cdot (D^2 - d^2) \cdot \Pi}{4}, \quad (3.3)$$

де D – внутрішній діаметр корпусу, мм;

d – діаметр парового каналу, мм

Π – пористість, %;

Отримаємо  $F_{к.с.}$ :

$$F_{к.с.} = \frac{3,14 \cdot (D^2 - d^2) \cdot \Pi}{4} = \frac{3,14 \cdot ((21 \cdot 10^{-3})^2 - (18 \cdot 10^{-3})^2) \cdot 0,73}{4} = 6,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2. \quad (3.4)$$

Використовуючи дані властивостей теплоносіїв для ВТГ проведено розрахунок  $Q_{max}$

Результати та вхідні дані для розрахунку представлені в табл. 3.6

Таблица 3.6 – Отримані розрахункові дані максимального теплового потоку за теплоносієм натрій

T, °K	$\rho_{\text{рід.}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$r, 10^3$ кДж/кг	$F_{\text{к.с.}}$ , м <sup>2</sup>	$\sigma, 10^{-3}$ Н/м	$\eta_{\text{р.}}$ , $10^{-4}$ Н·с/м <sup>2</sup>	N	$Q_{\text{max}}$ , кВт
600	873,2	4,429	$6,7 \cdot 10^{-5}$	172,1	3,276	1,389	
700	849,4	4,341	$6,7 \cdot 10^{-5}$	162,1	2,69	1,518	
800	825,6	4,237	$6,7 \cdot 10^{-5}$	152,1	2,298	1,579	
900	801,8	4,131	$6,7 \cdot 10^{-5}$	142,1	2,018	1,593	
1000	778	4,026	$6,7 \cdot 10^{-5}$	132,1	1,809	1,559	
1100	754,2	3,925	$6,7 \cdot 10^{-5}$	122,1	1,645	1,497	

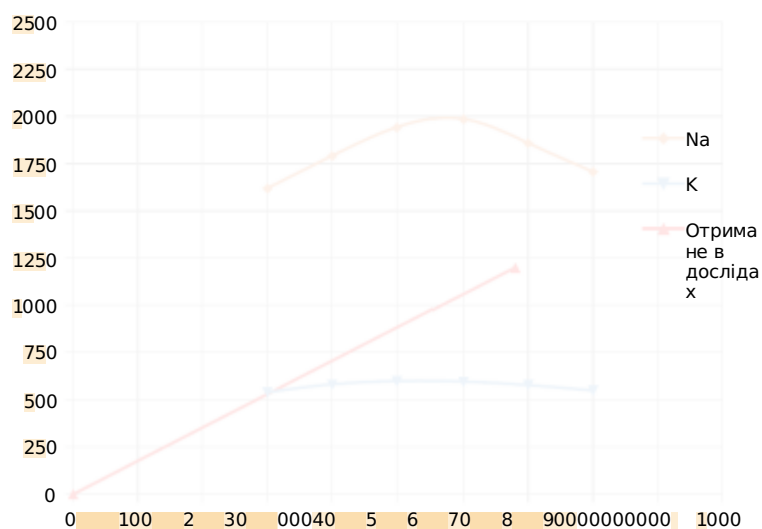


Рисунок 3.9 –  $Q_{\text{max}}$  теплотранспортна властивість ВТТ в залежності від температури труби



В результаті розрахунку отримані значення  $Q_{\max}$  показують залежності максимальної теплопередаючої здатності від температури насичення, що обумовлено зміною теплофізичних властивостей натрію.

## ВИСНОВКИ

1. Виконано експериментальне та розрахункове дослідження робочих характеристик ВТТ та проаналізовано вплив режимних параметрів – теплового потоку та положення простору при  $+0,5^\circ$  та  $+5^\circ$ .

2. Температурне поле по довжині ВТТ, яка заправлена натрієм має типовий профіль. Ізотермічність температурного поля показує, що криза теплообміну не досягнута (рис. 3.3., рис.3.4).

3. Термічний опір ВТТ залежить від режимів теплообміну в зоні нагріву і в зоні конденсації (рис.3.5), але при низьких теплових потоках термічний опір в зоні нагріву буде великим тому, що теплообмін буде за рахунок випаровування, а при середніх та високих – режим кипіння. Наслідок – загальний термічний опір падає.

4. В результаті розрахунку  $Q_{\max}$  отримані значення показують залежність максимальної теплопередаючої здатності від температури насичення, що обумовлено зміною теплофізичних властивостей натрію.

5. Граничний тепловий потік розраховується за формулою 3.1. Резерв до  $Q_{\max}$  можна бачити на цьому рисунку –  $680^\circ\text{C}$  (рис. 3.9). Обладнання не дозволило отримати максимальний тепловий потік.

6. Також слід відмітити, що натрій має значну перевагу щодо передачі теплових потоків порівняно з калієм у відношенні  $Q_{\max}$  (рис.3.9 ) в такому діапазоні температур в наслідок більш сприятливих теплофізичних властивостей, а саме теплоти пароутворення.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Чи С. Тепловые трубы теория и практика / С. Чи. – Москва: Машиностроение, 1981. – 205 с
3. Васильев Л. Д. Теплообменники на тепловых трубах / Л. Д. Васильев. – Минск: Наука и техника, 1981. – 143 с.
4. Семена М. Г. Тепловые трубы с металловолокнистыми капиллярными структурами / М. Г. Семена, А. Н. Герштуни, В. К. Зарипов. – Киев: Высшая школа, 1984. – 146 с.
5. Васильев Л. Л. Тепловые трубы в системах возобновляемыми источниками энергии / Л. Л. Васильев, Л. П. Гракович, Д. К. Хрусталеv. – Минск: Наука и техника, 1988. – 159 с.
6. Дан П. Д. Тепловые трубы / П. Д. Дан, Д. А. Рей. – Москва: Энергия, 1979. – 272 с.
7. Ивановский М. Н. Физические основы тепловых труб / М. Н. Ивановский, В. П. Сорокин, И. В. Ягодкин. – Москва: Атомиздат, 1978. – 256 с.
8. Высокотемпературные тепловые трубы для энергетического модуля космических ЯЭУ / [В. С. Васильковский, В. П. Сметанников, В. А. Евтихин та ін.]. – Москва: Атомная энергия, 2000. – 86 с.
9. Шпильрайн Э. Э. Тепловые трубы / Э. Э. Шпильрайн. – Москва: Мир, 1972. – 420 с.
10. Фото – приклад пористої структури [Електронний ресурс]. URL: <https://elenergi.ru/osnovnye-sposoby-oxlazhdeniya-specialnykh-elektronnykh-eleventov.html>
11. Технологические основы тепловых труб / М. Н. Ивановский, В. П. Сорокин, Б. А. Чулков, И. В. Ягодкин. – Москва: Атомиздат, 1980. – 146 с.
12. Елисеев В. Б. Что такое тепловая труба? / В. Б. Елисеев, Д. И. Сергеев. – Москва: Энергия, 1971. – 133 с.

13. Исследование тепло- и массопереноса в тепловой трубе с натриевым теплоносителем / М. Н.Ивановский, В. П. Сорокин, В. И. Субботин, М. В. Шустов., 1970. – 319 с. – (№8; т. 2).
14. Методы исследования пористых структур / В.П.Фадеев, К.С. Самохина – Наукоедение, 2015 – Т.7.№4 – с.1-21.
15. Heat pipe lifetests at 1600°C and 1000°C / С.А. Busse, F.Geiger, D.Quataert, P.Pötzschke. Paper presented at the Thermionic Conversion Specialist Conf., Houston, USA, 1966.
16. Тепловые трубы с капиллярными структурами на основе композиционных градиентных материалов для теплообменных систем космического и авиационного назначения / А.Г. Косторнов, А.А. Шаповал, А.Л. Мороз, Г.А. Фролов, И.В. Шаповал – космічна наука і технологія, 2009 – Т.15.№2 – С.69-79.
17. Гершуни А.Н. Энергосберегающее оборудование на тепловых трубах. Методические рекомендации [Текст] / А.Н. Гершуни, В.К. Зарипов. К. – КПИ, 1999. – 24 с.
18. Петров В.М. Тепловые трубы в электрических машинах [Текст] / В.М. Петров, А.Н. Бурковский, Е.Б. Ковалев и др. Под ред. В.М. Патрона. М. – Энергоиздат, 1987. – 152 с
19. Закон України про охорону праці №2694-ХІІ. URL: [https://zakononline.com.ua/documents/show/151241\\_\\_591220](https://zakononline.com.ua/documents/show/151241__591220).
20. ДСанПіН 3.3.2-007-98. «Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплеями терміналами електронно-обчислювальних машин». URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=6007](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=6007).
21. Методичні рекомендації до виконання розділу «Охорона праці і безпека у надзвичайних ситуаціях» у дипломному проекті для студентів енергетичних спеціальностей за освітньокваліфікаційним рівнем «спеціаліст» / Укл.: Л. Д. Третьякова. – К.: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2013.
22. ДБН В.2.5-27-2006. «Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд»

23. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною безпекою : ДСТУ Б В.1.1-36:2016. – [Чинний від 2017 – 01 – 01]. – Київ : Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, 2016
24. Системи протипожежного захисту: ДБН В.2.5-56:2014. – [Чинний від 2015 – 07 – 01]. – Київ : Українська спілка пожежної та техногенної безпеки, 2014.
25. Захист проти ураження електричним струмом. Загальні аспекти щодо установок та обладнання : ДСТУ ІЕС 61140:2015. . – [Чинний від 2016 – 01 – 01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.
26. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень : ДСН 3.3.6.042-99. – [Чинний від 1999 – 12 – 01]. – Київ : Міністерство охорони здоров'я,
27. Пожежна безпека об'єктів будівництва : ДБН В.1.1-7:2016. – [Чинний від 2017 – 06 – 01]. – Київ : Український науково-дослідний інститут цивільного захисту , 2017.
28. Правила улаштування електроустановок : НПАОП 40.1-1.32-01. – [Чинний від 2017 – 08 – 21]. – Київ : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2017.
29. Пожежна техніка. Вогнегасники переносні: ДСТУ 3675-98. [Чинний від 1999 – 01 - 01]. – Київ. Український науково-дослідний інститут пожежної безпеки, 1999.
30. Теплова ізоляція будівель. ДБН В.2.6-31:2016. [Чинний від 2017 – 05 – 01]. – Київ . Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій, 2016.
31. Природне і штучне освітлення: ДБН В.2.5-28:2018. – [Чинний від 2018 –03 – 01]. – Київ : Міністерстві регіонального розвитку, будівництва та житловокомунального господарства України, 2018.
32. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. – [Чинний від 2017 – 02 – 21]. – Київ : Міністерства палива та енергетики України, 2017.

ДОДАТОК А

Вариант	Элемент	Наименование	Значение	Примечание
<i>Документация</i>				
А1		ТФ814.3.0003.144.0К	Кресленок складальний	
<i>Деталі</i>				
А1	1	ТФ814.3.0003.144.001	Корпус	1
А1	2	ТФ814.3.0003.144.002	Хомут з'єднвальний	2
А1	3	ТФ814.3.0003.144.003	Труба мірна	6
А1	4	ТФ814.3.0003.144.004	Труба приєднвальна	2
А1	5	ТФ814.3.0003.144.005	Перехідник	2
А1	6	ТФ814.3.0003.144.006	Фітинг приєднвальний	2
А1	10	ТФ814.3.0003.144.010	Кільце ущільнюче	4
<i>Стандарти виробу</i>				
	7	Болт М3х14 ГОСТ 7798-70		2
	8	Гайка М3 ГОСТ 11371-78		2
	9	Шайба М5х0,8 ГОСТ 5975-70		4
<i>Матеріал</i>				
	11	Труба силіконова ГОСТ 5496-78		3м Ø10х2мм
	12	Клей Thermoflex		0,2 кг
ТФ814.3.0003.144.000				
<b>Конденсатор</b>				
Контракт				
Формат А4				

## Совпадения

Источники из Интернета 187

8	<a href="https://core.ac.uk/download/pdf/15055094.pdf">https://core.ac.uk/download/pdf/15055094.pdf</a>	0.49%
12	<a href="https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php?file=/475304/mod_resource/content/2/%D0%93%D0%B5%D0%BD%D1%87">https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php?file=/475304/mod_resource/content/2/%D0%93%D0%B5%D0%BD%D1%87</a>	4 источника 0.44%
15	<a href="http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72758">http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72758</a>	0.4%
16	<a href="http://www.tsatu.edu.ua/mvz/wp-content/uploads/sites/5/pidruchnyk-ond.pdf">http://www.tsatu.edu.ua/mvz/wp-content/uploads/sites/5/pidruchnyk-ond.pdf</a>	0.39%
17	<a href="http://alexbeutel.com/papers/CMU-CS-16-105.pdf">http://alexbeutel.com/papers/CMU-CS-16-105.pdf</a>	0.39%
20	<a href="http://www.kdu.edu.ua/spec_rada/vidguk/F_48_14.pdf">http://www.kdu.edu.ua/spec_rada/vidguk/F_48_14.pdf</a>	0.37%
29	<a href="https://kursoviks.com.ua/bd_kompyuternyye/article_post/5373-diplomna-robota-doslidzhennya-adaptivnikh-tekh">https://kursoviks.com.ua/bd_kompyuternyye/article_post/5373-diplomna-robota-doslidzhennya-adaptivnikh-tekh</a>	14 источников 0.28%
32	<a href="http://eom.com.ua/index.php?action=dlattach;topic=19481.0;attach=22115">http://eom.com.ua/index.php?action=dlattach;topic=19481.0;attach=22115</a>	3 источника 0.27%
38	<a href="https://users.ugent.be/~ldupre/phd_hendrik_vansompel.pdf">https://users.ugent.be/~ldupre/phd_hendrik_vansompel.pdf</a>	0.24%
40	<a href="http://ir.nmu.org.ua/jspui/bitstream/123456789/147892/1/CD678.pdf">http://ir.nmu.org.ua/jspui/bitstream/123456789/147892/1/CD678.pdf</a>	0.23%
41	<a href="https://e-catalog.nlb.by/Record/BY-NLB-rr10922830000">https://e-catalog.nlb.by/Record/BY-NLB-rr10922830000</a>	2 источника 0.23%
42	<a href="https://allrefrs.ru/2-10057.html">https://allrefrs.ru/2-10057.html</a>	5 источников 0.22%
43	<a href="https://moluch.ru/archive/38/4295">https://moluch.ru/archive/38/4295</a>	0.22%
57	<a href="http://nbuv.gov.ua/sites/default/files/msd/bibl_rob13_18.pdf">http://nbuv.gov.ua/sites/default/files/msd/bibl_rob13_18.pdf</a>	0.19%
69	<a href="http://history.org.ua/LiberUA/978-966-02-7025-1/978-966-02-7025-1.pdf">http://history.org.ua/LiberUA/978-966-02-7025-1/978-966-02-7025-1.pdf</a>	2 источника 0.17%
70	<a href="http://ndch.diit.edu.ua/upload/%D0%97%D0%B0%D1%89%D0%B8%D1%82%D1%8B/%D0%96%D1%83%D1%80%D0%B0%D0...">http://ndch.diit.edu.ua/upload/%D0%97%D0%B0%D1%89%D0%B8%D1%82%D1%8B/%D0%96%D1%83%D1%80%D0%B0%D0...</a>	0.17%
72	<a href="https://core.ac.uk/download/pdf/323529734.pdf">https://core.ac.uk/download/pdf/323529734.pdf</a>	0.17%
73	<a href="https://itgip.org/wp-content/uploads/2016/10/%D0%94%D0%98%D0%A1-03.pdf">https://itgip.org/wp-content/uploads/2016/10/%D0%94%D0%98%D0%A1-03.pdf</a>	0.17%
79	<a href="http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00980484">http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00980484</a>	0.15%
83	<a href="https://budinfo.org.ua/doc/1809115/Derzhavni-sanitarni-pravila-i-normi-DSanPiN-3-3-2-007-98-Gigienichni-vimogi-d">https://budinfo.org.ua/doc/1809115/Derzhavni-sanitarni-pravila-i-normi-DSanPiN-3-3-2-007-98-Gigienichni-vimogi-d</a>	3 источника 0.14%
84	<a href="https://dorndi.org.ua/files/upload/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80">https://dorndi.org.ua/files/upload/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80</a>	5 источников 0.14%





3	TF81-Konko-diploma-2022	ID файла: 1011417249	Учебное заведение: National Technical University of U	<a href="#">3 Источник</a>	1.91%
4	Мартинюк	ID файла: 8468591	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic I...		0.85%
5	TF91mp-MykhailykVY-thesis-2020-2	ID файла: 1005717060	Учебное заведение: National Technical University of U...		0.74%
6	TF91mp-TkachVM-thesis-2020-2	ID файла: 1005717212	Учебное заведение: National Technical University of Ukra...		0.73%
7	Студенческая работа	ID файла: 1005193362	Учебное заведение: National University of Water Mana	<a href="#">48 Источник</a>	0.54%
9	Записка МД Шаповал	ID файла: 5660148	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv ...		0.49%
10	Студенческая работа	ID файла: 1003698897	Учебное заведение: National University of Life and Environment...		0.46%
11	TF01mp-KharchenkoOV-diploma-2021	ID файла: 1009590769	Учебное заведение: National Technical Un	<a href="#">68 Источник</a>	0.45%
13	Мищенко_РТФ	ID файла: 1000782353	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "К	<a href="#">12 Источник</a>	0.4%
14	Туа71mn_TrofymenkoOR_MAIN_PART_2019	ID файла: 1000039579	Учебное заведение: National Technic	<a href="#">2 Источник</a>	0.4%
18	TF-91mn-LipnitskiyLV-diploma-2021	ID файла: 1007843677	Учебное заведение: National Technical Unive	<a href="#">3 Источник</a>	0.38%
19	Пашинський Ю М	ID файла: 1000092974	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Po...		0.38%
21	Нгуен ФІ-51	ID файла: 1000049479	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv	<a href="#">31 Источник</a>	0.37%
22	Студенческая работа	ID файла: 1000097714	Учебное заведение: Lviv Polytechnic National University		0.37%
23	Студенческая работа	ID файла: 1000720890	Учебное заведение: National University of Water Management a...		0.36%
24	TF91mp-SviderskiiAV-thesis-2020	ID файла: 1005755968	Учебное заведение: National Technical University of Ukr...		0.35%
25	TF91mp-BachencoAO-thesis-2020	ID файла: 1005656201	Учебное заведение: National Technical University of Ukr...		0.34%
26	TF81mp-ZhurakivskiyAV-thesis-2019-2	ID файла: 1000800629	Учебное заведение: National Technical University o...		0.31%
27	Студенческая работа	ID файла: 1000045315	Учебное заведение: Lviv Polytechnic National Universit	<a href="#">2 Источник</a>	0.3%
28	TF51-DatsenkoOO-diploma-2019	ID файла: 1000054852	Учебное заведение: National Technical University of Ukra...		0.3%
30	Шульга-РС	ID файла: 1000802114	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv	<a href="#">24 Источник</a>	0.28%
31	magera_12_12_19	ID файла: 1000777297	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "К	<a href="#">3 Источник</a>	0.28%
33	Кулявец_РТФ	ID файла: 1000782661	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "К	<a href="#">7 Источник</a>	0.27%

34	Студенческая работа	ID файла: 1011413374	Учебное заведение: National University of Life and Envi	2 Источник	0.26%
35	TF41-ZhurakivskuiAV-diploma-2018	ID файла: 5990707	Учебное заведение: National Technical University of Ukra...		0.26%
36	TF01ms-Glushko-diploma-2022	ID файла: 1011316444	Учебное заведение: National Technical University	6 Источник	0.25%
37	TF71-SkrypkoEI-diploma-2021	ID файла: 1008298361	Учебное заведение: National Technical University o	2 Источник	0.25%
39	TF51-KonkoDV-diploma-2019	ID файла: 1000051021	Учебное заведение: National Technical University o	23 Источник	0.23%
44	Студенческая работа	ID файла: 1000078031	Учебное заведение: Lviv Polytechnic National Universit	21 Источник	0.21%
45	AlekseikOS_kndr	ID файла: 1000166290	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polyt...		0.2%
46	TF41-ChervonyukAO-diploma-2018	ID файла: 5946561	Учебное заведение: National Technical University of Ukrai...		0.2%
47	Прилепа_mag_2019	ID файла: 1000779591	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Po...		0.2%
48	Студенческая работа	ID файла: 108934	Учебное заведение: Lviv Polytechnic National University		0.2%
49	Студенческая работа	ID файла: 1003699039	Учебное заведение: National University of Life and Environment...		0.2%
50	Романюк_стаття №5-2019	ID файла: 1000461357	Учебное заведение: National Technical University of	2 Источник	0.19%
51	LukianovOleksandr batchelor thesis	ID файла: 1000024363	Учебное заведение: National Technical University of ...		0.19%
52	магістерська Кугот	ID файла: 1000782216	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv...		0.19%
53	TE-61-2-Kharchenko-diploma-2020-mod	ID файла: 1004076919	Учебное заведение: National Technical University ...		0.19%
54	Диплом v2.0 Ганчев Б.С. v0.9	ID файла: 1000750721	Учебное заведение: National Technical University of Ukra...		0.19%
55	Студенческая работа	ID файла: 1000096638	Учебное заведение: National University of Water Manag	2 Источник	0.19%
56	Студенческая работа	ID файла: 1005711630	Учебное заведение: Zaporizhzhya National University		0.19%
58	Студенческая работа	ID файла: 1005623429	Учебное заведение: National University of Water Management a...		0.18%
59	TF51-Tkach-diploma-2019	ID файла: 1000053913	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "K...		0.18%
60	Студенческая работа	ID файла: 1000041700	Учебное заведение: Lviv Polytechnic National University		0.18%
61	Студенческая работа	ID файла: 12187472	Учебное заведение: National University of Water Manag	7 Источник	0.18%
62	Студенческая работа	ID файла: 1004319137	Учебное заведение: Zaporizhzhia National University		0.18%

63	Студенческая работа	ID файла: 1009723613	Учебное заведение: National University of Water Management a...	0.18%
64	Студенческая работа	ID файла: 1000787118	Учебное заведение: Poltava National Technical Yuri Kondratyuk ...	0.18%
65	Иващенко Т С	ID файла: 1000085290	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytec...	0.18%
66	Студенческая работа	ID файла: 1005763176	Учебное заведение: National University of Water Mana	2 Источник 0.17%
67	Студенческая работа	ID файла: 1001143734	Учебное заведение: National Aviation University	28 Источник 0.17%
68	Студенческая работа	ID файла: 1004137658	Учебное заведение: Lviv Polytechnic National University	0.17%
71	Студенческая работа	ID файла: 1001012658	Учебное заведение: National Aviation University	24 Источник 0.17%
74	Студенческая работа	ID файла: 1003519961	Учебное заведение: National University of Water Management a...	0.17%
75	TereschenkoDV_Rlg61_bachelor_2020	ID файла: 1004123574	Учебное заведение: National Technical University of...	0.16%
76	Дипломна работа Михайленко А. А.1	ID файла: 1004042410	Учебное заведение: National Technical Universi...	0.16%
77	Студенческая работа	ID файла: 109365	Учебное заведение: Lviv Polytechnic National University	0.15%
78	Студенческая работа	ID файла: 1003704362	Учебное заведение: National University of Life and Envi	4 Источник 0.15%
80	Студенческая работа	ID файла: 8237000	Учебное заведение: Lviv Polytechnic National University	8 Источник 0.15%
81	Студенческая работа	ID файла: 110624	Учебное заведение: Lviv Polytechnic National University	2 Источник 0.14%
82	Kovshar-P	ID файла: 1000086507	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic...	0.14%
85	Студенческая работа	ID файла: 1000787288	Учебное заведение: Poltava National Technical Yuri Kon	2 Источник 0.12%
91	ТҮа61-Stukanenko-diploma-2020-mod	ID файла: 1004150240	Учебное заведение: National Technical University o...	0.11%
92	TF81mn-ChervonyukAO-thesis-2020-mod	ID файла: 1003029973	Учебное заведение: National Technical University...	0.11%
93	Студенческая работа	ID файла: 1000097871	Учебное заведение: National University of Water Mana	3 Источник 0.11%
97	Студенческая работа	ID файла: 5959312	Учебное заведение: National University of Life and Environ	21 Источник 0.1%
101	Сидякіна_Я.В._без_літ	ID файла: 5971424	Учебное заведение: National Technical University of Ukrain	3 Источник 0.09%
103	Lukashevych	ID файла: 1000802107	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv	27 Источник 0.09%
105	ПЗБП_АУТС_КПІ_2020_СемченкоЯО	ID файла: 1004091888	Учебное заведение: National Technical U	13 Источник 0.09%

107	Студенческая работа	ID файла: 1000802175	Учебное заведение: National University of Water Mana	<a href="#">23 Источник</a>	0.09%
108	Студенческая работа	ID файла: 1000927737	Учебное заведение: National Aviation University	<a href="#">4 Источник</a>	0.08%
109	Ступак І.В. ЗВ-з81мп	ID файла: 1000789537	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv...		0.08%
110	Студенческая работа	ID файла: 1000777197	Учебное заведение: National University of Water Management a...		0.08%
117	Студенческая работа	ID файла: 1009695508	Учебное заведение: Lviv Polytechnic National Universit	<a href="#">2 Источник</a>	0.07%
118	ТҮа71mn-OnyshchukYA-thesis-2019	ID файла: 11883545	Учебное заведение: National Technical University of Uk...		0.07%
119	Burd_Tezy (1)	ID файла: 1000457374	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytech...		0.07%
120	Студенческая работа	ID файла: 1876199	Учебное заведение: Yuriy Fedkovych Chernivtsi National Un	<a href="#">3 Источник</a>	0.07%
121	TF41-LetenkoDE-diploma-2018	ID файла: 6029755	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "...		0.07%