«Термоелектричний охолоджувач»
(шифр)

«ПРОЕКТУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА РІДИНИ»

Галузь:
Енергетичне машинобудування

Секція:
Холодильна та кріогенна техніка

2020/2021

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Робота високонавантажених підшипників ковзання в режимі жидкостного тертя забезпечує тривалу та безаварійну їх експлуатацію. Такі підшипники застосовуються, наприклад, в силових приладах прокатних станів. Важливою умовою для забезпечення режима жидкого тертя є підтримка вязкості мастильного мастила в заданому інтервалі, для чого стабілізується його робоча температура. Застосування для цих потреб термоелектричних охолоджувачів дозволяє підвищити надійність системи, відмовитись від трубопроводів хладоносія, значно спростити систему регулювання. До того ж така система практично не потребує обслуговування та є екологічно чистою. Це обумовлює актуальність розглядаємого питання та проектуємого пристрою.

Мета роботи: аналіз переваг та недоліків термолектричних елементів для застосування в охолоджуючих системах. Розробка алгоритма та програми проектування охолоджувача масла системи змащування підшипників ковзання для стабілізації в'язкості мастила.

Завдання роботи:

1. Аналіз властивостей матеріалів для термоелектричних елементів; фізичні принципи та закони, що описують роботу термоелектричних елементів.
2. Створити алгоритм та програму проектування термоелектричного охолоджувача мастила.
3. Провести варіантні розрахунки та визначити раціональні конструктивні параметри термоелектричного охолоджувача мастила.

Методика дослідження: математичне моделювання термоелектричного охолоджувача мастила

Загальна характеристика роботи: 30 стр., 2 таблиці, 22 рисунка, 2 додатка, 18 джерел інформації.

Ключові слова: ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНЕ ОХОЛОДЖЕННЯ, ЕЛЕМЕНТ ПЕЛЬТЬЄ, НАПІВПРОВІДНИКИ, ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, ДОБРОТНІСТЬ, КОЕФІЦІЄНТ ТЕРМОЕДС, ТЕПЛОВИЙ НАСОС.

ЗМІСТ

Вступ 3
1 Аналітичний огляд 4
1.1 Розвиток теорії термоелектричних перетворювачів 4
1.2 Принцип роботи термоелектричних елементів 6
1.3 Основні розрахункові співвідношення 9
1.4 Режими роботи охолоджуючих термоелементів 13
1.5 Властивості матеріалів для термоелементів 17
2 Розрахункова частина 21
2.1 Конструкція охолоджувача рідини 21
2.2 Математична модель охолоджувача рідини 22
2.3 Результати розрахунків та їх аналіз 25
2.4 Результати проектування термоелектричного охолоджувача рідини 28
Висновки 30
Список джерел інформації 31
Додаток А. Розрахунок режимів термоелемента 33
Додаток Б. Програма проектування термоелектричного охолоджувача 37

ВСТУП

Пряме безмашинне перетворення теплової енергії в електричну і навпаки - одна з найбільш актуальних проблем сучасної енергетики.

З часу відкриття термоелектричних ефектів (Зеєбека - 1821 р., Пельтьє - 1834 р.) пройшли майже два століття , але довгий час практично застосовувалися тільки пристрої, в основу роботи яких був покладений ефект Зеєбека: термопарні датчики температури. Термоелектричні перетворювачі застосовувалися рідко, в основному в контрольно- вимірювальних приладах. Охолодження або нагрів (ефект Пельтьє) практично реалізовано не було. Причиною цього була дуже низька, в порівнянні з іншими способами, ефективність перетворення енергії.

Вимоги до термоелектричних властивостей матеріалів були сформульовані академіком А.Ф. Іоффе. На основі своїх праць він обгрунтував великі можливості застосування напівпровідників і напівметалів в якості термоперетворювачів.

З появою широкого спектру напівпровідникових матеріалів зростає використання їх як в термоелектрогенераторах, так і в пристроях охолодження (нагріву). Термоелектричні охолоджувачі і теплові насоси відрізняють простота і надійність, значний моторесурс, безшумність роботи і відсутність рухомих частин. Охолоджуючі термоелектричні пристрої мають переваги в порівнянні з іншими типами холодильних машин, серед яких екологічна чистота і можливість використання одного пристрою для нагріву або охолодження, хороші массогабаритні характеристики, відсутність вібрацій, шуму, мастильних масел.

Поки термоелектричні перетворювачі застосовуються при малих потужностях, де програш в ефективності компенсують їх інші переваги.

При збільшенні ефективності термоелектричних матеріалів, зменшенні їх вартості і спрощенні технології виготовлення сфера їх доцільного застосування розширюється. Впровадження термоелектричних пристроїв і установок в різні області енергетики прискорюватиметься при їх подальшому вдосконаленню, а також поліпшенню характеристик існуючих і створенню нових високоефективних напівпровідникових матеріалів.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Розвиток теорії термоелектричних перетворювачів

Після виявлення термоелектричних ефектів Зеєбека в 1821 р. і Пельтьє в 1834 р. вони довгий час практичного застосування не знаходили. Тільки у 1909-1911 роках німецький учений Е. Альтенкирх розвинув і створив теорію термоелектричних перетворювачів. Саме він ввів поняття холодильного коефіцієнта, Z - ефективності і інших. Теорія Альтенкирха дозволяла визначати досягаєму різницю температур, холодильний коефіцієнт, ККД термоперетворювача та ін. Але розвитку термоелектричного напрямку техніки вона не сприяла, а навіть зіграла негативну роль, оскільки показала нездатність металевих термоелектричних матеріалів конкурувати з традиційною холодильною технікою ні по досягаємої температурі охолодження, ні по ККД.

Сучасні дослідження в області термоелектрики почалися з робіт А.Ф. Іоффе [1], який показав, що кращими матеріалами для термоелектричних перетворювачів енергії є напівпровідники з домішками атомів інших елементів.

Діелектрики малоефективні з-за малої кількості вільних електронів, а метали із-за малої їх енергетичної можливості. Оптимум ефективності досягається при концентрації носіїв $n_0 \approx 10^{19}$ см$^{-3}$ (рисунок 1.1) [2]. Такими матеріалами є легировані напівпровідники (також їх називають напівметали). Були проведені дослідження усіх відомих у той час напівпровідників, напівметалів і сплавів, виявлені кращі матеріали для термоелектричного охолодження: теллуриды вісмуту і свинцю, сплави вісмут-сурьма. Була виконана огромна теоретична робота, побудовані моделі, дуже добре описуючі існуючі матеріали. Проте навіть кращі матеріали не дозволяли створювати холодильні системи достатньої ефективності, які б конкурували з компресійними та тепловими холодильними машинами. Сучасні дослідження по створенню і пошуку матеріалів для термоелектриків дають підставу чекати в найближчому майбутньому істотного збільшення ефективності термоелектричних холодильних машин [3].

Відродження інтересу до застосування термоелектричного охолодження

пов'язане також з екологічними проблемами, що виникають при використанні традиційних методів отримання холоду (руйнування озонового шару, парниковий ефект і т. д.). Термоелектричні холодильники абсолютно безпечні з екологічної точки зору, не мають елементів, що зношуються і труться, а значить безшумні в роботі, характеризуються відсутністю вібрацій, не вимагають штатних пристроїв очищення робочих тіл, здатні стійко працювати тривалий час. Термоелектричні перетворювачі енергії мають і інші переваги:

- можливість не лише охолодження, але і нагріву;
- дуже велика надійність компонентів, що виробляють холод;
- можливість надшвидкого охолодження;
- висока точність регулювання температури і можливість термостатування шляхом зміни струму живлення;
- незалежність параметрів термоелектричних модулів від сили тяжіння і орієнтації в просторі;
- мала чутливість до високих механічних навантажень;
- відсутність необхідності в технічному обслуговуванні.

Рисунок 1.1 – Залежність ефективності термоелектричних ефектів від концентрації носіїв заряду [2]

1.2 Принцип роботи термоелектричного теплового насоса

Пояснемо ефекта Пельтьє на основі зонної теорії твердих тіл. Залежно від міри заповнення зон електронами і від ширини забороненої зони можливі чотири випадки:

1) Валентна зона заповнена частково (рисунок 1.2, а). або цілком заповнена валентна зона перекривається з дозволеною порожньою зоною (рисунок 1.2, б). У цих випадках поряд із зайнятими електронами рівнями є вільні рівні, на які електрони можуть переходити при незначному тепловому збудженні. Це - метали; валентні електрони металів можуть вільно переміщатися по всьому об'єму.

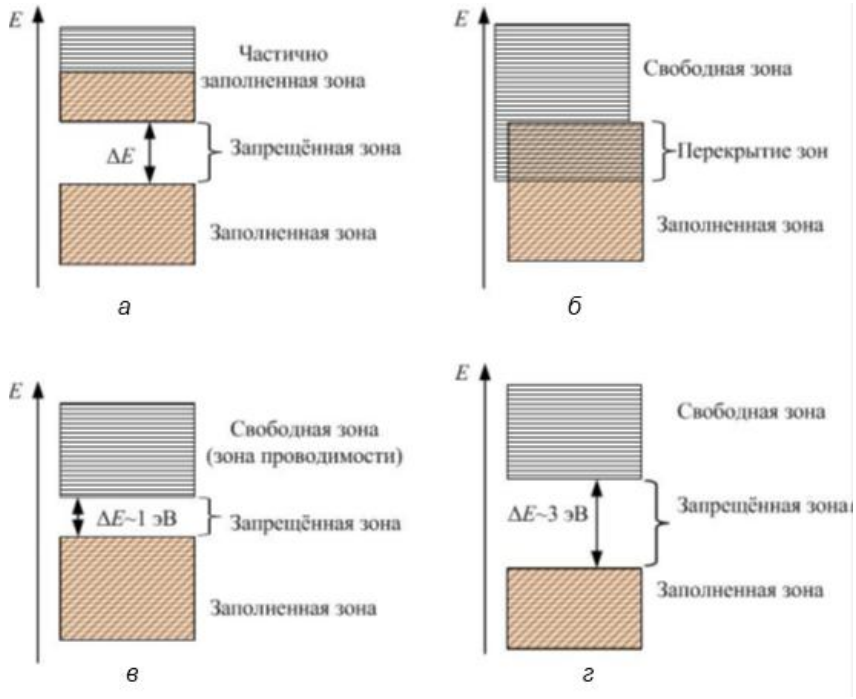


Рисунок 1.2 Діаграми металів, напівпровідників і діелектриків в зонній теорії

2) Цілком заповнена валентна зона відокремлена від наступної дозволеної зони забороненою зоною, ширина якої не більш ΔE~1 еВ (рисунок 1.2, в). Це - напівпровідники. При звичайних умовах за рахунок теплової енергії деякі електрони можуть перестрибувати через заборонену зону з валентної зони на нижні рівні найближчої дозволеної вільної зони, тобто стати вільними. За рахунок цього провідність у напівпровідників є, але менше, ніж у металів. Приклади: германій (ΔE=0.5 еВ), кремній (ΔE=1.1 еВ).

3) Цілком заповнена валентна зона відокремлена від наступної дозволеної зони великою забороненою зоною, ~3 еВ (рисунок 1.2, г). Заборонена зона занадто велика, щоб помітна кількість електронів могла її здолати; вільних носіїв заряду майже немає. Це - діелектрики, які практично не проводять електричний струм. Приклади: NaCl (ΔE=6 еВ), алмаз (ΔE=7 еВ).

Окрім чистих напівпровідників існують ще лігіровані. Залежно від лігіруючого елементу ці напівпровідники називають *n*- типу (з надміром негативних носіїв заряду - електронів) і *p*- типу (з лишком позитивних носіїв заряду - "дірок"). Зонна структура металу і різних типів напівпровідників представлена на рисункуку 1.3.

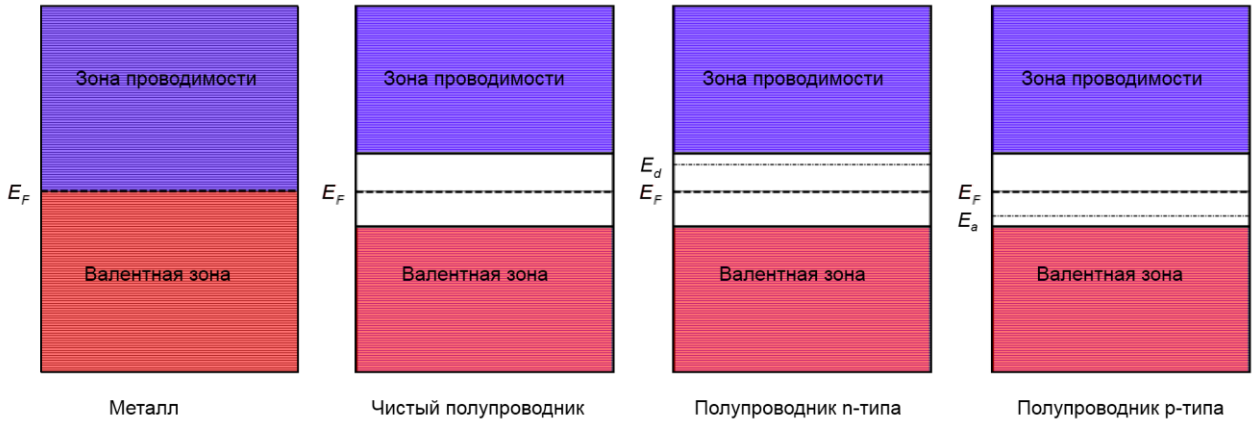


Рисунок 1.3 - Зонна структура металів і напівпровідників

Тут також позначений рівень енергії Ферми і додатково виникаючі донорні (у напівпровідниках *n*- типу) і акцепторні (у напівпровідниках *p*- типу) енергетичні рівні.

Конструкція і схема термоелемента Пельтьє зображена на рисунках 1.4 і 1.5.

При протіканні струму по термоелементу електрони здійснюють периодичні переходи напівпровідник *p*-типа - металл- напівпровідник *n*-типа та напівпровідник *n* -типа -металл- напівпровідник *p* -типа. Зонні диаграмы таких переходів зображені на рисунку 1.6. У першому випадку енергія електронів збільшується за рахунок внутрішньої енергії іонних грат, і, відповідно ця сторона елементу охолоджується. У другому випадку електрони свою енергію зменшують, передаючи її іонним гратам. Ця сторона елементу нагрівається.

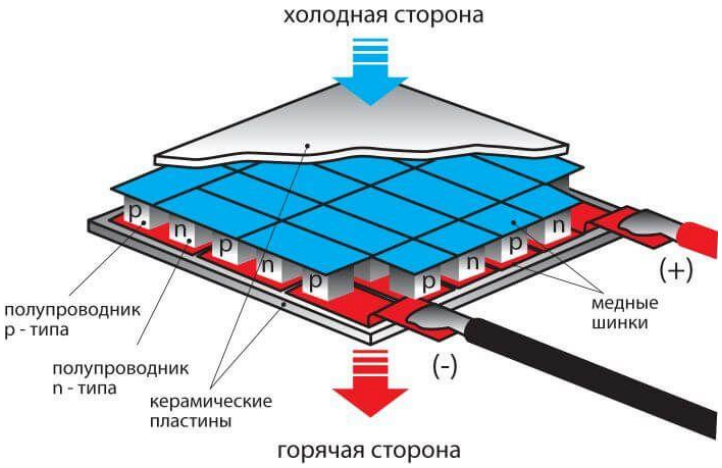


Рисунок 1.4 - Конструкція елементу Пельтьє

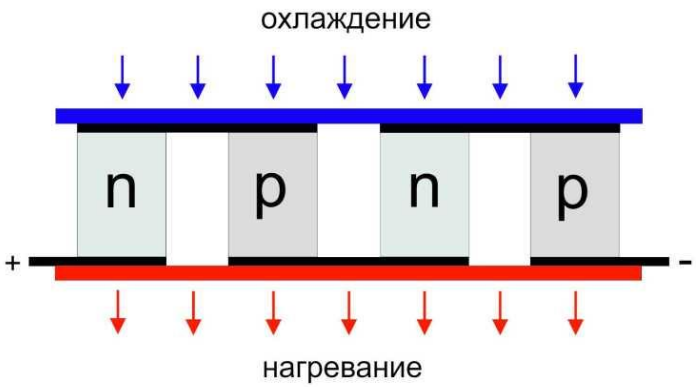


Рисунок 1.5 - Схема елементу Пельтьє

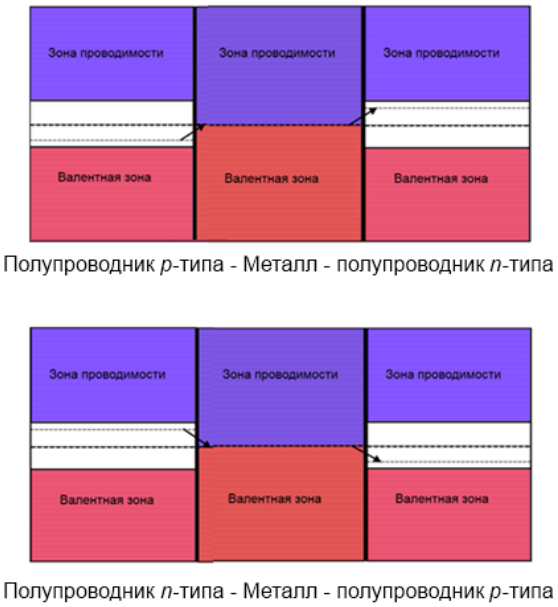


Рисунок 1.6 - Зонні діаграми переходів напівпровідник *p*-типа (*n*-типа)- металл-напівпровідник *n*-типа (*p*-типа)

Також пояснити ефект Пельтьє можна генерацією і рекомендацією електронно - діркових пар в напівпровіднику *p*- типу. При генерації енергія поглинається, а при рекомбінації виділяється (рисунок 1.7).

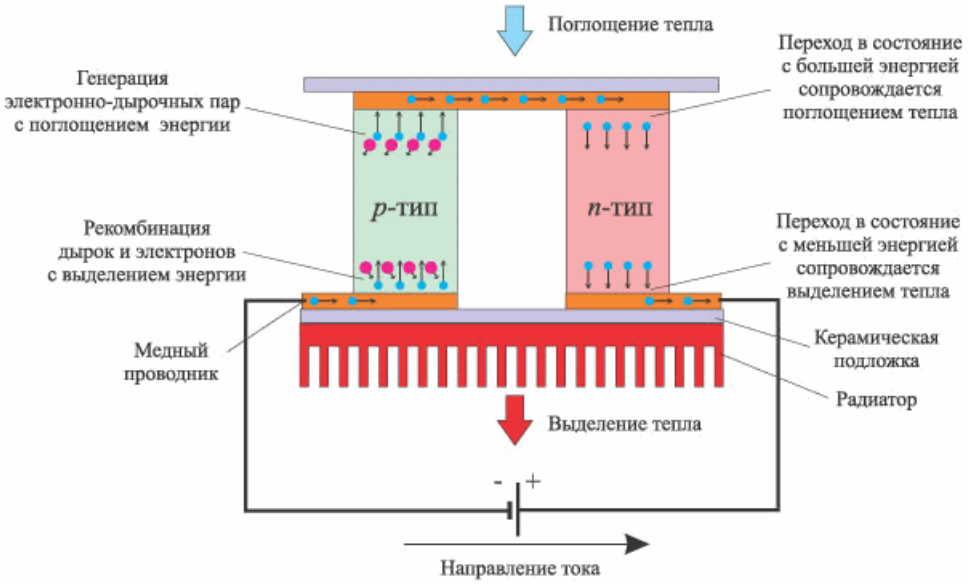


Рисунок 1.7 - Принцип роботи елементу Пельтьє

1.3 Основні розрахункові співвідношення

Розглянемо роботу термоелемента, що складається з двох напівпровідникових гілок з електронною і дірковою провідністю і з металевих контактних перемичок (рисунок 1.4). При протіканні постійного струму у вказаному напрямі нижні перемички нагріваються, а верхні - охолоджуються. В цьому випадку верхню перемичку називають холодним спаєм (температура T_x), а нижню - гарячим спаєм (температура $T_г$).

Тепловий потік поглинаємий (виділяємий) на спаях термоелемента за рахунок ефекту Пельтьє, визначається рівнянням

$$Q_P = \bar{\alpha} \cdot T \cdot I \,, \tag{1.1}$$

де: $\bar{\alpha}$ - коефіцієнт термоЕДС, залежний від фізичних властивостей матеріалу і його температури; T - температура контакту; I - величина струму, протікаючого через контакт.

У ідеальному випадку теплота, яку виділяє гарячий спай, буде більше теплоти, яку поглинає холодний спай, на величину витрат електроенергії:

$$Q_{\text{г}} = N + Q_0 . \tag{1.2}$$

Енергія N витрачається на здійснення роботи A по переміщенню зарядів проти різниці електричних потенціалів, що виникають в ланцюзі при нерівності $T_{\text{г}}$ та $T_{\text{х}}$ відповідно до закону Зеєбека. Таким чином

$$A = Q_{\text{г}} - Q_0 = \alpha \cdot (T_{\text{г}} - T_{\text{х}}) \cdot I \tag{1.3}$$

Холодильний коефіцієнт зворотного циклу термоелемента, в якому роль робочої речовини виконує електронний газ і відсутні необратимі втрати (теплота Джоуля і теплопередача), рівний

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{A} = \frac{\alpha \cdot T_{\text{г}} \cdot I}{\alpha \cdot \ T_{\text{г}} - T_{\text{х}} \ \cdot I} = \frac{T_{\text{г}}}{T_{\text{г}} - T_{\text{х}}} . \tag{1.4}$$

Величина ε співпадає з холодильним коефіцієнтом зворотного циклу Карно, оскільки теплота відводиться при постійній температурі $T_{\text{г}}$, а підводиться до гарячого джерела при постійній температурі $T_{\text{х}}$. Насправді робота термоелемента супроводжується необратимимі втратами двох типів: при протіканні струму по провіднику виникають джоулеві втрати, а по провідниках, з яких складається ланцюг, передається теплота від гарячого спаю до холодного за рахунок теплопровідності.

Джоулеві втрати визначаються співвідношенням:

$$Q_J = I^2 \cdot R , \tag{1.5}$$

де R - опір обох гілок термоелемента.

При розрахунках приймають, що одна половина джоулевої теплоти переходить до гарячих спаїв, а інша - до холодних.

Теплота, що переходить від гарячог спая до холодного за рахунок теплопровідності, визначається рівнянням

$$Q_T = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \ T_г - T_х \ \cdot F \ , \tag{1.6}$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу; δ - довжина контакту; $T_г$, $T_х$ – температура гарячої і холодної поверхні термоелемента; F - площа перерізу контакту.

Таким чином, холодопродуктивність термоелемента (кількість теплоти, що поглинається на холодному спаї термоелемента) визначається рівнянням

$$Q_0 = Q_P - 0,5Q_J - Q_T = \bar{\alpha} \cdot T_х \cdot I - 0,5 \cdot I^2 \cdot R - \frac{\lambda}{\delta} \cdot \ T_г - T_х \ \cdot F \tag{1.7}$$

Тепловий потік, що виділяється на гарячому спаї і відводиться в оточуючу середу, визначається рівнянням

$$Q_Г = Q_P + 0,5Q_J - Q_T = \bar{\alpha} \cdot T_г \cdot I + 0,5 \cdot I^2 \cdot R - \frac{\lambda}{\delta} \cdot \ T_г - T_х \ \cdot F \tag{1.8}$$

Потужність, споживана термоелементом, рівна

$$N = I^2 \cdot R + \bar{\alpha} \cdot \ T_г - T_х \tag{1.9}$$

Енергетична ефективність (холодильний коефіцієнт) термоелектричного охолодження з урахуванням втрат визначається рівнянням:

$$\varepsilon = \frac{\bar{\alpha} \cdot T \cdot I - 0,5 \cdot I^2 \cdot R - \frac{\lambda}{\delta} \cdot \ T_Г - T_X \ \cdot F}{I^2 \cdot R + \bar{\alpha} \cdot \ T_Г - T_X} \tag{1.10}$$

Як видно, холодильний коефіцієнт залежить від величини струму через термоелемент. Максимального значення холодильний коефіцієнт набуває при силі струма [4]

$$I = \frac{\alpha \cdot \ T_Г - T_X}{R \cdot \sqrt{1 + 0,5Z \ \ T_Г - T_X} \ -1} \tag{1.11}$$

Матеріали для термоелектричних перетворювачів характеризуються спеціальним параметром - добротністю Z. Цей параметр визначається фізичними властивостями термоелектричного матеріала - електропровідністю σ, теплопровідністю λ і коефіцієнтом термоЕДС α пов'язаними формулою

$$Z = \frac{\sigma \cdot \alpha^2}{\lambda} \tag{1.12}$$

Максимальний теоретично досяжний холодильний коефіцієнт термоелемента може бути розрахований по формулі

$$\varepsilon_{max} = \frac{T_X}{T_Г - T_X} \frac{\sqrt{1 + 0,5Z\ T_Г - T_X} - T_Г / T_X}{\sqrt{1 + 0,5Z\ T_Г - T_X} + 1} \tag{1.13}$$

У (1.9) перший співмножник - ККД оборотного циклу Карно, а другий враховує його зниження за рахунок необернених втрат за рахунок теплопровідності і ефекту Джоуля. Розрахункові значення ε_{max} термоелемента по формулі (1.9) при $T_г$=350 К залежно від Z і $T_х$ представлені на рисунку 1.8.

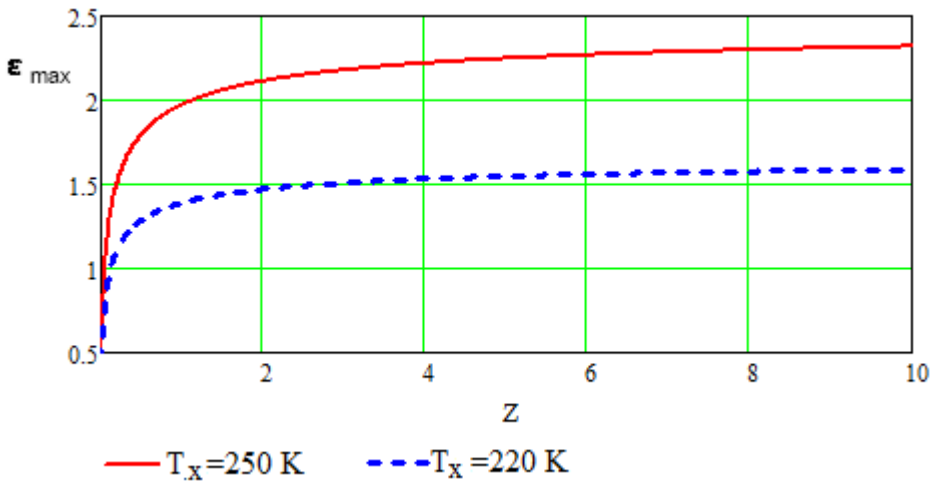


Рисунок 1.8 - Значення максимального холодильного коефіцієнта термоелемента ($T_г$=350 К)

Холодильний коефіцієнт прагне до свого максимального значення при Z стрямящемся до нескінченності. Але в природі немає матеріалів які одночасно

мають високі електропровідність, термоЕДС і низьку теплопровідність. Це пояснюється тим, що хорошу електропровідність забезпечують вільні електрони, але вони ж і переносять теплоту. У діелектриків можуть бути великі значення термоЕДС, але вільних електронів мало і дуже низька електропровідність.

Таким чином, для підвищення ефективності термоелектричного охолодження потрібні матеріали з високим значенням добротності *Z*. На сьогодняшній день ця величина для кращих зразків термоелектричних матеріалів має значення $\sim 3\cdot 10^{-3}$ K^{-1}, а значення комплексу при кімнатних температурах порядку одиниці ($ZT\sim 1$). За оцінками експертів, поява термоелектричесих матеріалів з $ZT\approx 4$ зробить термоелектричні охолоджувачі і генератори конкурентоздатними по енергоефективності з іншими пристроями.

1.4 Режими роботи охолоджуючих термоелементів

Термоелектричний холодильник може працювати в різних режимах, найбільш важливими з яких є режими максимального холодильного коефіцієнта $\varepsilon_{\max}$ та максимальної холодопродуктивності $Q_{\max}$. У першому випадку термоелемент працюватиме з максимальною енергетичною ефективністю, в другому - забезпечується максимальна кількість відведеного тепла в одиницю часу, але при менших значеннях холодильного коефіцієнта.

В умовах максимальної холодопродуктивності холодильний коефіцієнт можна визначити по залежності

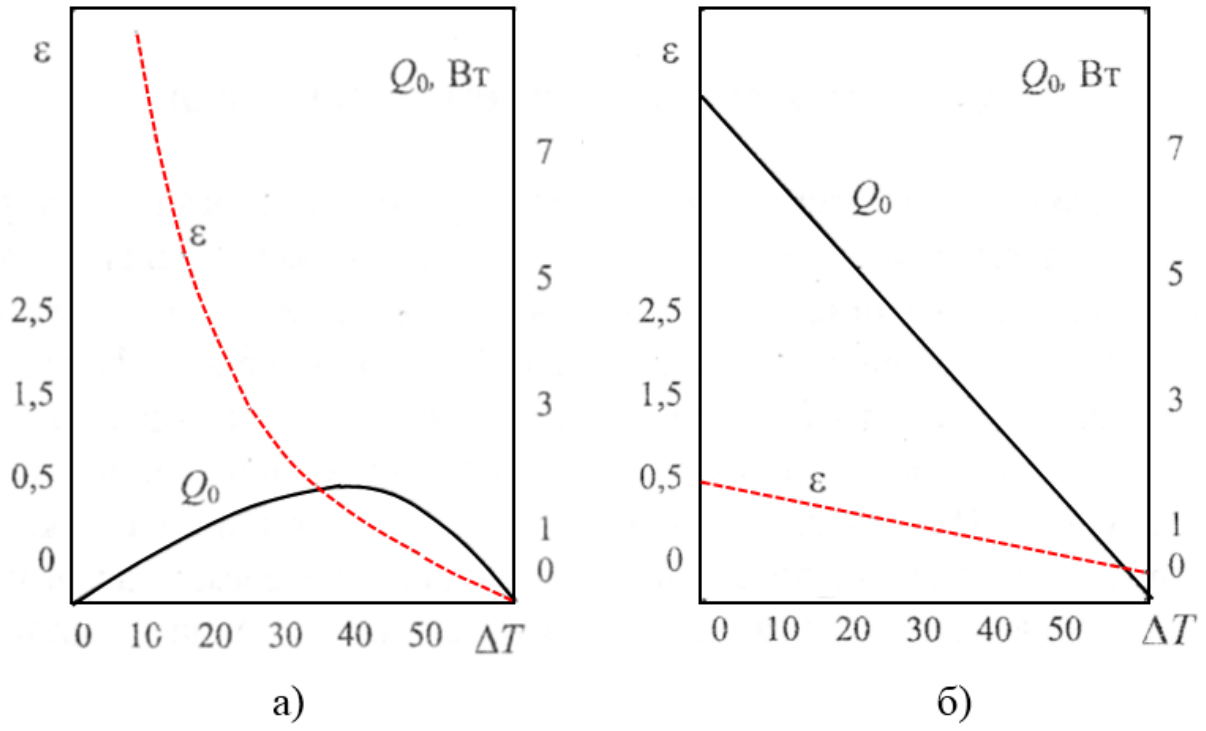
$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{T_Г}\left(T_X - \frac{2\ T_Г - T_X}{ZT_X} \right) \tag{1.14}$$

Режими, близькі до умов максимального холодильного коефіцієнта εmax, використовують, в основному, для потужних пристроїв. Режими, близькі до максимальної холодопродуктивності використовуються в малопотужних системах, в яких економія електроенергії не є важливим фактором. На практиці термоелектричні холодильники зазвичай працюють при струмах, що становлять (25–80)% $I_{\max}$ [3, 5].

Для термоелектричного охолоджувача дуже просто змінювати режим роботи від ε_{max} до Q_{max}, або працювати в деякому проміжному режимі шляхом зміни електричної напруги на термоелементі (струму через термоелемент). Таким чином, система регулювання холодильного пристрою на термоелементах має простий і надійний устрій.

Режим Q_{max} відповідає максимально можливому значенню робочого струму в термоелементі. Для режиму ε_{max} характерна зміна робочого струму відповідно до зміни різниці температур на спаях.

На рисунку 1.9 представлені типові графічні залежності холодильного коефіцієнта і холодопродуктивності від перепаду температур на термоелементі для випадків режиму максимального холодильного коефіцієнта і максимальної холодопродуктивності [5].



а) режим максимального холодильного коефіцієнта;

б) режим максимальної холодопродуктивності

Рисунок 1.9 - Залежність холодильного коефіцієнта та холодопродуктивності від різниці температур на спаях термоелемента

1.5 Властивості матеріалів для термоелементів

Нині напівпровідникові гілки термоелемента виготовляють трьома методами: методом порошкової металургії, лит'єм із спрямованою кристалізацією і витягуванням з розплаву. Найбільш поширеним є метод порошкової металургії з холодним або гарячим пресуванням зразків. У охолоджуючих термоелектричних пристроях застосовуються в основному термоелементи, у яких негативна гілка виготовляється методом гарячого пресування, а позитивна - методом холодного пресування.

Матеріали для термоелектричних перетворювачів характеризуються добротністю Z напівпровідникової речовини. Цей параметр визначається, як вказувалося вище, фізичними властивостями речовини - електропровідністю σ, теплопровідністю λ і коефіцієнтом термоЕДС α, пов'язаними формулою (1.12).

Чим вище Z, тим краще властивості термоелектрика, вище його ефективність, більше максимальне зниження температури на спаях. Холодильний коефіцієнт прагне до свого максимального значення (як для циклу Карно) при $Z \rightarrow \infty$. Тому основне завдання термоелектричного матеріалознавства - пошук або створення матеріалів з можливо вищою добротністю.

Величини, що входять до складу рівняння (1.12), взаємопов'язані, оскільки залежать від концентрації вільних електронів або дірок. Відповідні залежності представлені на рисунку 1.10 [6].

Електропровідність пропорційна концентрації носіїв n, а термоЕДС прагне до нуля при збільшенні n. Теплопровідність λ складається з двох частин ($\lambda = \lambda_p + \lambda_e$) : теплопровідності кристалічної решітки ((λ_p), яка практично не залежить від n і електронної теплопровідності (λ_e), пропорційною n [2, 5].

Оскільки у провідників першого роду (метали і їх сплави) концентрації вільних носіїв заряду лежать в діапазоні n_e=10^{22}- 10^{24} 1/см^3, значення α для них дуже малі, значення λ занадто великі і, незважаючи на хорошу електропровідність, величина Z неприйнятний мала.

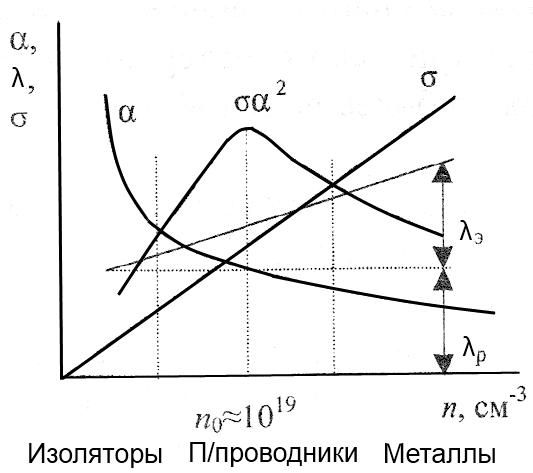


Рисунок 1.10 - Якісна залежність коефіцієнта термоЕДС, електропровідності і теплопровідності від величини концентрації носіїв заряду

У ізоляторів кількість вільних носіїв аряда в одиниці об'єму незначна. Тому високі значення α і низькі значення λ не можуть компенсувати дуже малі значення σ, що у свою чергу не дозволяє набути прийнятних значень коефіцієнта добротності.

Таким чином, найбільшу ефективність можуть мати напівпровідникові матеріали, які, як це уперше показав академік А. Ф. Іоффе [1], дозволяють розв'язати проблему енергетичного застосування термоелементів. Напівпровідникові матеріали, окрім характерних для них найбільших значень $\alpha^2\sigma$, мають ту особливість, що з введенням приміси значення α можуть змінюватися в широкому діапазоні (рисунок 1.9).

Ефективність термоелектриків залежить також від температури T. Нині усі термоелектричні матеріали, що використовуються, є напівпровідниками зі значними концентраціями домішок. Проте виявлені рідкоземельні матеріали, які мають набагато вищі значення так званого фактора потужності $\alpha^2\sigma$. На жаль, такі матеріали мають високу теплопровідність λ, яка не дозволяє їм досягати високих значень Z. Проте, на основі рідкоземельних з'єднань можна створювати нові термоелектричні матеріали, активно використовувані. У термоелектричному матеріалознавстві основні зусилля спрямовані на те, щоб знайти матеріал з максимально високим значенням безрозмірного параметра ZT.

Були систематизовані вимоги до термоелектриків [5]:

1. Багатовалентність. Як мінімум потрібний 4-валентний зв'язок.
2. Висока рухливість електронів або дірок (μ > 1000 см^2/с).
3. Висока щільність.
4. Низька теплопровідність. Теплопровідність кристалічної решітки повинна знаходитися в межах від 0,5 до 1,0 Вт/(м·К).

Низькою теплопровідністю характеризуються матеріали що складаються з елементів з високою атомною вагою. Такі матеріали мають малу енергію кристалічної решітки і незначну власну теплопровідність. Ось чому кращі термоелектрики створюються з вісмута, теллура, свинцю і аналогічних елементів.

В таблиці 1.1 приведені значення основних параметрів термоелектричних матеріалів на основі твердого розчину $Bi_2Te_{2,3}Se_{0,7}$ *n*-типа и $Bi_{0,56}Te_{2,9}Sb_{1,44}Se_{0,1}$ *p*-типа для основних методів виготовлення термоелектричних матеріалів, а на рисунках 1.11, 1.12 – величини термоелектричної добротності і властивостей деяких промислових і перспективних матеріалів, що працюють в різних температурних діапазонах [7].

Таблиця 1.1 - Термоелектрична ефективність *Z*, температури T_m максимумів *Z*, параметри α, σ і λ при цих температурах для зразків ТЕМ [7]

Метод виготовлення ТЕМ	Тип провідності	$Z\cdot10^3$, 1/К	T_m, К	$\alpha\cdot10^6$, В/К	$\sigma\cdot10^{-2}$, Ом$^{-1}$·м$^{-1}$	λ, Вт /(м·К)
Екструзія	*p*	2,49	330	159	1431	1,45
	n	1,57	360	152	1006	1,48
Зонна плавка	*p*	2,95	400	205	1350	1,92
	n	2,43	440	193	1150	1,76
Пресування порошку	*p*	2,45	410	182	1250	1,69
	n	1,65	440	175	890	1,65

Поки не досягнуте значне поліпшення термоелектричних характеристик однорідних напівпровідникових матеріалів на основі Bi_2Te_3. Значення термоелектричної добротності промислово вироблюваних термоелектричних

матеріалів, які широко використовуємих в холодильних і генераторних пристроях в інтервалі температур (200 – 600) К залишаються близькими до одиниці [7]. Серед твердих матеріалів генераторного призначення найбільшу добротність *ZT*=1,18 при 410 К має склад Bi2Te2, 7Se0,3 *n* -типа провідність, а для матеріалів *p* -типа найбільшу добротність *ZT*=0,9 при 410 К мають состави $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_{2,9}Se_{0,1}$ або $Bi_{0,52}Sb_{1,48}Te_{2,9}Te_3$ або $Bi_{0,3}Sb_{1,6}Te_{2,9}Te_3$ [7].

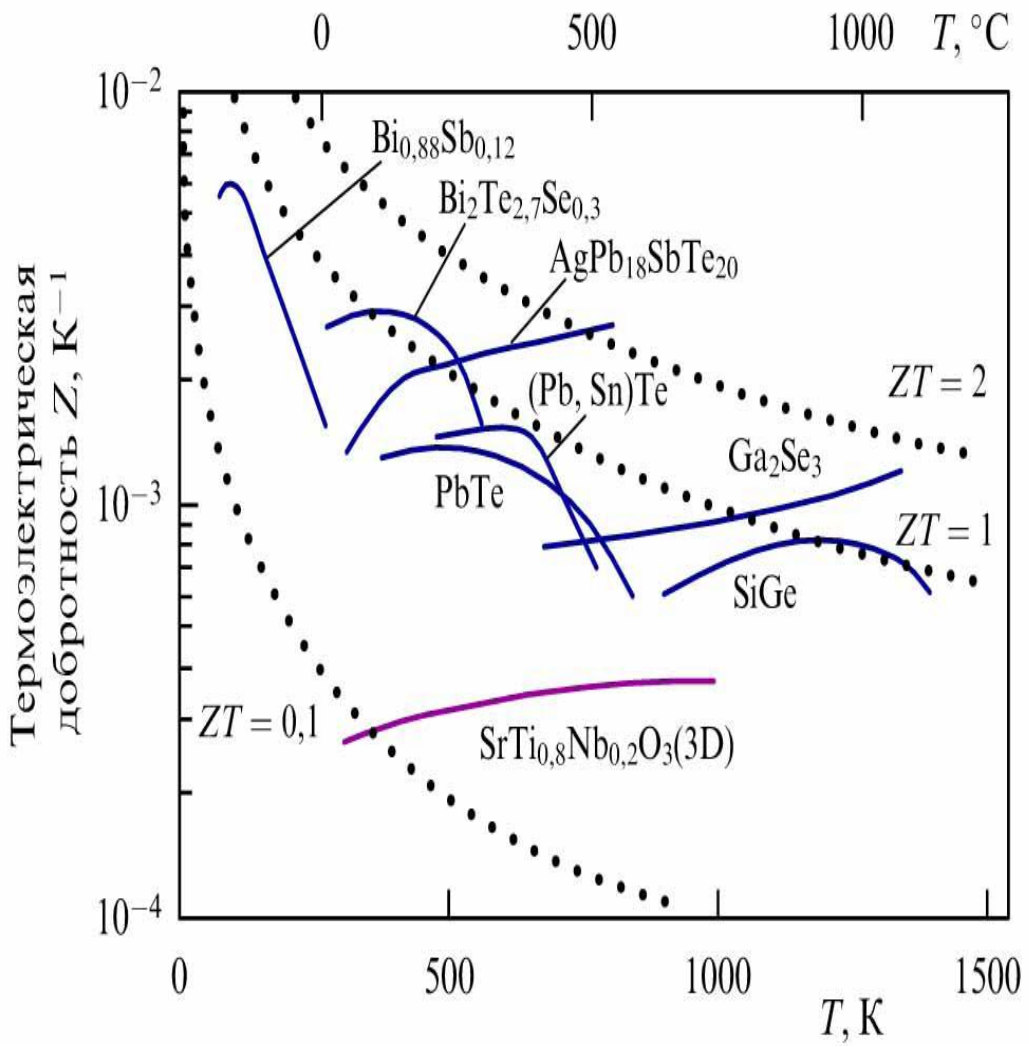


Рисунок 1.11 - Термоелектрична ефективність деяких використовуваних і перспективних матеріалів [7]

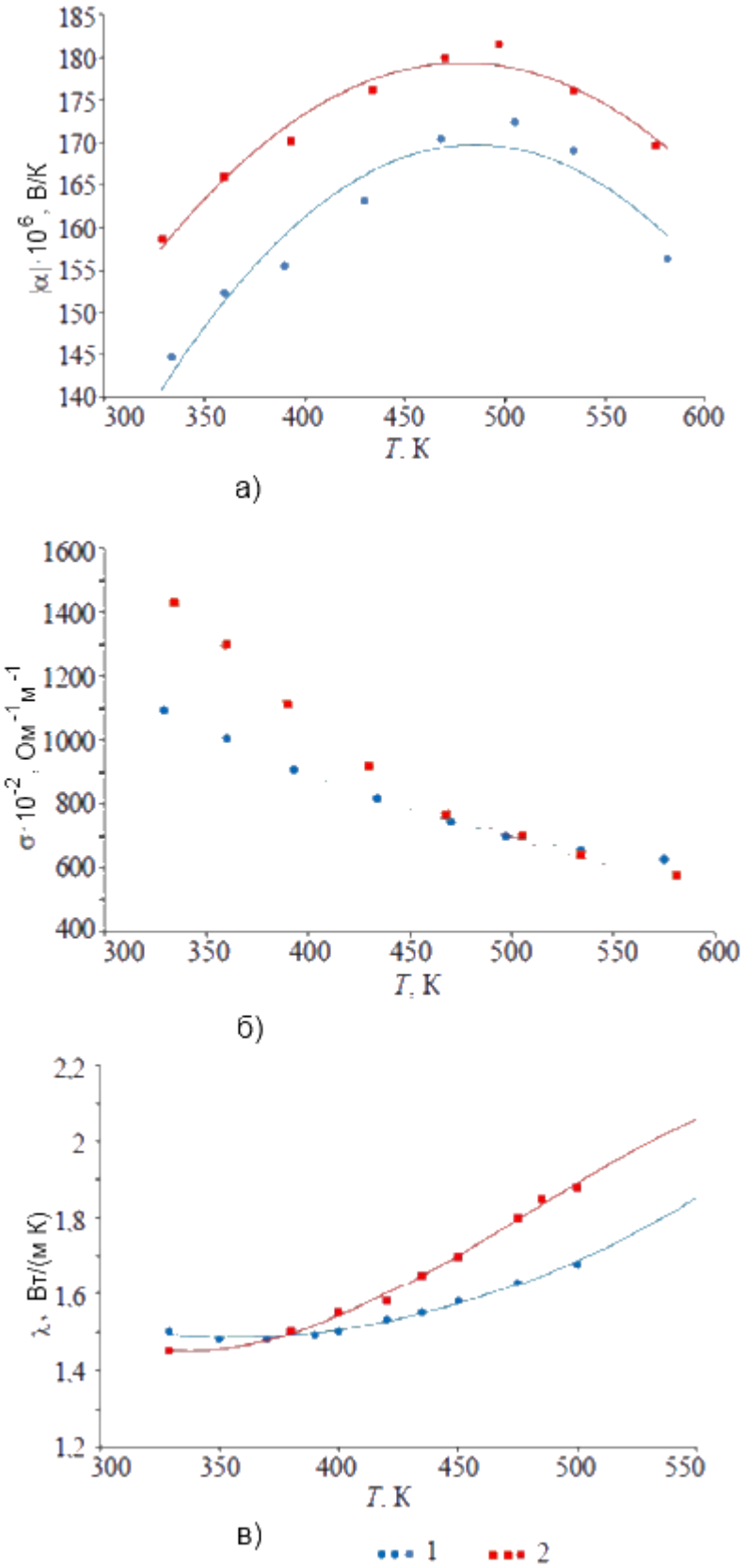


Рисунок 1.12 - Температурні залежності коефіцієнта термоЕДС *α* (а), електропровідності *σ* (б) і теплопровідності (в) термоелектричних матеріалів на основі Bi_2Te_3 *n*- типа (1) и *p*-типа (2) провідності [7]

Для термоелементів застосовують низькотемпературні термоелектричні матеріали, складовими яких є вісмут, сурма, селен і теллур. Ефективність (добротність) для цих матеріалів в області кімнатних температур составляє $2{,}6\cdot10^{-3}$ 1/К для *n*-типа, $2{,}2\cdot10^{-3}$ 1/К - для *p*-типа. Створені тверді розчини Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3 та Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3 мають вищі значення Z [$(2{,}4 - 3{,}4)\cdot10^{-3}$ 1/К] [8].

Низька добротність ($ZT \approx 1$) термоелектричних матеріалів обумовлює низьке значення ККД термоелектричних пристроїв і істотно обмежує їх комерційне застосування.

Виявлено поліпшення термоелектричних властивостей матеріалів під впливом високих тисків і магнітних полів, а також за допомогою "геометричних" чинників, що включають конфігурацію і концентрацію дискретних елементів мультифазного термоелектричного матеріалу [5,7]. Високий тиск може поліпшити термоелектричні параметри за допомогою зміни ширини забороненої зони E_g. Підвищення термоелектричної ефективності ZT може складати не менше, ніж (50 – 70)% в області тисків (2 – 4) ГПа в порівнянні з нормальними умовами [7].

Тверді розчини Bi–Se застосовуються в ділянці температур нижче 250 К. Максимального значення $Z=6\cdot10^{-3}$ 1/К досягає при $T \approx (80\text{-}90)$ К. Цікаво відмітити, що вказаний сплав істотно підвищує свою ефективність в магнітному полі. Так, наприклад, при H=1000 Э и T=100 К ефективність зростає до $Z=8{,}5\cdot10^{-3}$ 1/К [8].

Великий інтерес для значного збільшення добротності ZT, представляють наноструктуровані термоелектричні матеріали на основі теллурида вісмуту. Дослідження в цьому напрямі широко проводяться, але для промислового виробництва вони поки дуже дорогі.

Механічна міцність гілок термоелементів незначна. Так, наприклад, у зразків сплаву Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3, виготовлених за технологією гарячого або холодного пресування, межа міцності при стискуванні складає (44,6-49,8) МПа. Нижня межа відноситься до зразків, отриманих методом гарячого пресування. Для підвищення міцності термоелемента між комутаційною пластиною і напівпровідниковою гілкою ставиться демпфуюча свинцева пластина, крім того, застосовуються легкоплавкі припої SiSb.

2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Конструкція охолоджувача рідини

Конструкція охолоджувача/ нагрівача рідини термоелементами Пельтьє представлена на рисунку 2.1.

У каналах корпусу охолоджувача (1) протікає потік охолоджуваної рідини. Канали можуть бути виконані двома способами: а) сверлінням, з подальшим встановленням заглушок (пробок) в технологічні отвори; б) фрезеруванням каналів в корпусі, який в подальшому герметично закривається зверху кришкою. Кількість каналів в одному пристрої залежить від способа виконання та вимог до геометричних характеристик охолоджувача.

На поверхні корпусу з двох сторін розташовуються термоелементи Пельтьє (3). Їх холодна сторона повинна мати хороший тепловий контакт з корпусом. Термоелемент є послідовною сборкою термоелементів, кожний з яких вносить вклад до переносу тепла з холодної поверхні до гарячої. Для удобства встановлення, комутації та обслуговування елементів на кожний елемент приходиться площа на поверхні охолоджувача, яка вдвічі більше його площі поверхні.

Коефіцієнт теплообміну повітря на гарячій стороні термоелементів, навіть при примусовій конвекції з вентиляторами, істотно (в декілька разів) менше коефіцієнта теплообміна рідини в каналах охолоджувача. З метою інтенсифікації теплопередачі ця поверхня повинна мати оребрення. Тому на гарячій поверхні встановлені радіатори (оребрена поверхня) та вентилятори примусового обдува.

Для зниження термічного опору контактів між термоелементами, корпусом охолоджувача та радіаторами їх поверхні повинні оброблені до високої степіні чистоти, а самі контакти заповнені термопастою, або для здешевлення охолоджувача пластичною змазкою з температурою каплепадіння не нижче робочої температури гарячого спая. В змазку для поліпшення її теплопровідної властивості можливо додати мелкодисперсний алюмінієвий або мідний порошок.

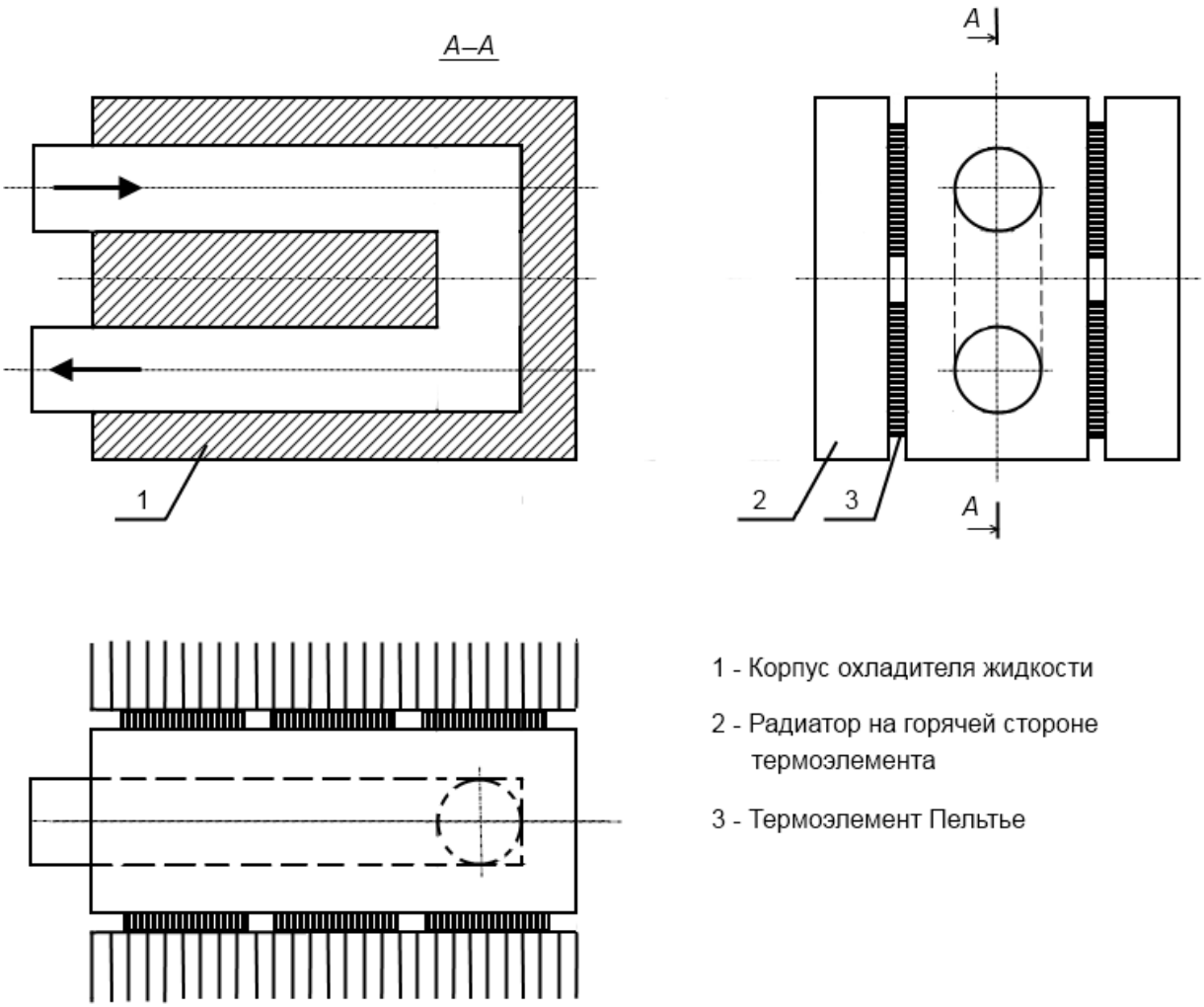


Рисунок 2.1 - Схема конструкції охолоджувача рідин термоелементами Пельтьє

2.2 Математична модель охолоджувача рідини

Математична модель охолоджувача рідини з зосередженими параметрами є система алгебраїчних рівнянь. Для її спрощення приймемо допущення, що термічний опір між поверхнями елементу Пельтьє та сопрягаємими поверхнями корпуса охолоджувача і радіаторами відсутній. Тоді співпадають температури холодної сторони елемента Пельтьє і корпуса охолоджувача, гарячої сторони елементів Пельтьє і основи радіатора. З урахуванням цих допущень математична модель представленої конструкції для зосереджених (середніх) параметрів в стаціонарному режимі містить наступні рівняння:

– тепловий потік від охолоджуваної рідини до корпусу пристрою

$$Q_0 = \alpha_1 \cdot \ T_{g1} - T_{\text{х}} \ \cdot F_1; \tag{2.1}$$

– тепловий потік на холодній стороні елементів Пельтьє

$$Q_0 = \bar{\alpha} \cdot T_{\text{х}} \cdot I - 0,5I^2 \cdot R - \frac{\lambda}{\delta} \cdot \ T_{\text{г}} - T_{\text{х}} \ \cdot F_2; \tag{2.2}$$

– тепловий потік на гарячій стороні елементів Пельтьє

$$Q_{\text{г}} = \bar{\alpha} \cdot T_{\text{г}} \cdot I + 0,5I^2 \cdot R - \frac{\lambda}{\delta} \cdot \ T_{\text{г}} - T_{\text{х}} \ \cdot F_2; \tag{2.3}$$

– тепловий потік від радіаторів повітряного охолодження (оребреній поверхні) до повітряного довкілля

$$Q_{\text{г}} = \alpha_2 \cdot \ T_{\text{г}} - T_{\text{g2}} \ \cdot F_3 \cdot E_{\text{рп}}, \tag{2.4}$$

де: F_1, F_2, F_3 – відповідно, площі поверхні рідинних каналів, перерізи термоелементів (через цю площу передається тепловий потік теплопровідністю від гарячої до холодної сторони термоелемента) і загальна зовнішня площа радіатора (оребреній поверхні);

α_1, α_2 – коефіцієнти теплообміну рідини на поверхні стінок каналу, повітря з поверхнею радіатора;

$E_{\text{рп}}$ - коефіцієнт ефективності оребреної поверхні.

Для розрахунку коефіцієнта теплообміну рідини в каналі охолоджувача застосовуємо крітеріальні рівняння [16, 17, 18] для ламінарного

$$\text{Nu} = 4,36, \tag{2.5}$$

та турбулентного режимів:

$$\text{Nu} = 0,021\text{Re}^{0,8}\,\text{Pr}^{0,43}. \tag{2.6}$$

Додаткова турбулізація при поворотах потока буде врахована коефіцієнтом

$$\varepsilon_{\mathrm{R}} = 1 + 1{,}77\frac{d}{S}. \tag{2.7}$$

Теплообмін на оребреній поверхні радіатора пропонуємо розраховувати по залежностям для руху рідини у вузьких каналах. Виходячи з можливих швидкостей руху, розмірів канала та властивостей повітря будемо мати ламінарний тип руху та, відповідно, наступні залежності для розрахунку числа Нусельта

$$\begin{gathered}\mathrm{Nu} = \left(1 + 0{,}5\frac{l_{\text{н}}}{l_{\text{р}}}\right)\cdot \mathrm{Nu}_{\infty}, \\ \mathrm{Nu}_{\infty} = 4{,}12\end{gathered} \tag{2.8}$$

де $l_{\text{н}}$ – довжина участка начальної теплової стабілізації, яка розраховується по формулі

$$l_{\text{н}} = 0{,}01\cdot h\cdot \mathrm{Re}, \tag{2.9}$$

де h – ширина канала між ребрами.

Виходячи з можливих швидкостей руху та теплофізичних властивостей повітря, геометричних параметрів канала коефіцієнт теплообміну буде мати значення 10 – 40 Вт/(м^2 К).

Ефективність теплообміну оребреної поверхні враховується коефіцієнтом ефективності ребра [17]

$$E = \frac{th\left(\frac{l_{\text{р}}}{\delta_{\text{р}}}\sqrt{2\cdot \mathrm{Bi}_{\text{р}}}\right)}{\frac{l_{\text{р}}}{\delta_{\text{р}}}\sqrt{2\cdot \mathrm{Bi}_{\text{р}}}}. \tag{2.10}$$

Також математична модель включає рівняння гідравлічного розрахунку. На основі представленої математичної моделі були створені алгоритми та програма

для пакету Mathcad, яка дозволяє провести проектні розрахунки охолоджувача рідини, визначити його раціональні геометричні характеристики та режимні параметри відповідно до технічного завдання.

2.3 Результати розрахунків та їх аналіз

Для представленої математичної моделі були розроблені алгоритми та програми розрахунку, які дозволяють провести аналіз роботи термоелемента при різних режимних параметрах, визначити для заданих умов роботи параметри термоелектричного охолоджувача рідини та їх раціональні значення.

Модель термлелемента, для якої проводилися розрахунки (додаток А) має наступні параметри:

- розміри контакту ($l*w*h$) 1*1*3 мм;
- шаг контактів однаковий в двох напрямках 2 мм;
- кількість контактів в сборкі термоелемента 100 шт.;
- коефіцієнт ТЕДС α=2*10^{-4} В/К;
- проводимість матеріала σ=10^{5} 1/(Ом м);
- теплопровідність матеріала λ= 2 Вт/(м К).

Залежність теплот Пельтьє та Джоуля в залежності від сили тока представлена на рисунку 2.2.

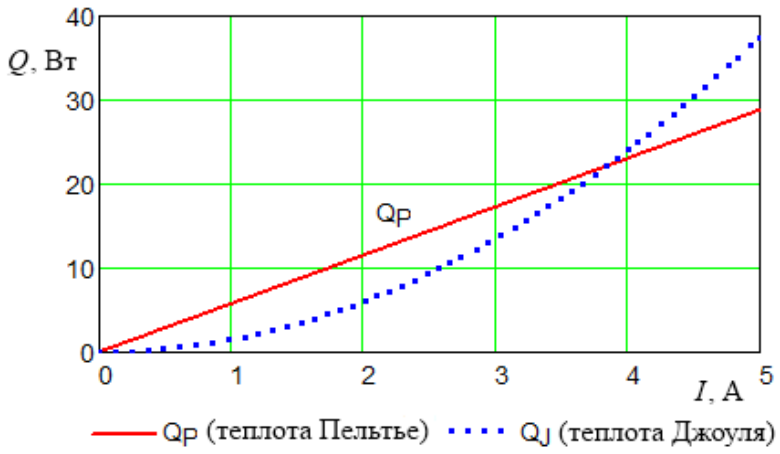


Рисунок 2.2 – Залежність теплот Пельтє та Джоуля від сили току

Залежність холодопродкутивності ідеального (без втрат за рахунок теплопроводності) та реального термоелемента при різних перепадах температури між гарячою та холодною стороною від сили току представлена на рисунку 2.3.

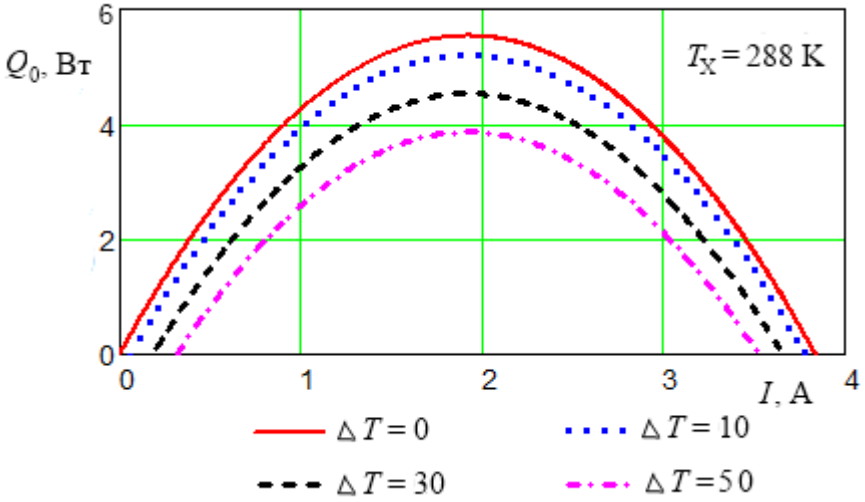


Рисунок 2.3 – Залежність холодопродуктивності термоелемента від сили току при різних перепадах температур на його сторонах (T_X=288 К)

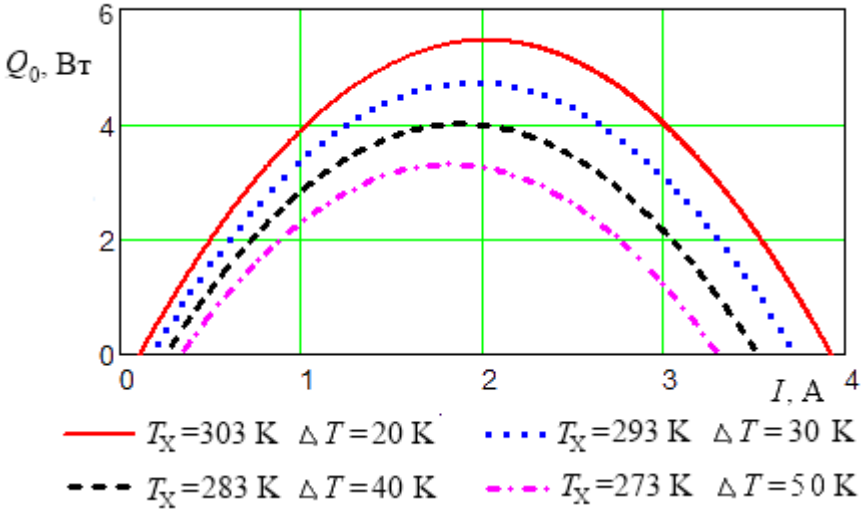


Рисунок 2.4 – Залежність холодопродуктивності термоелемента від сили току при різних температурних режимах роботи

Аналіз результатів показує, що для різних температурних умовах (температура холодної поверхні та температурний напор), але при однаковій температурі гарячої поверхні ($T_Г$=320 К) змінюються мінімальний та

максимальний робочі токи, а також оптимальний ток (при максимальній холодопродуктивності) та сама холодопродуктивність. Відповідні характеристики представлені в таблиці 2.1 та на рисунках 2.5, 2.6

Таблиця 2.1 – Розрахункові характеристики термоелемента при температурі гарячої поверхні 323 К.

T_x, К	ΔT, К	I_{min}, А	I_{max},А	I_{opt},А	Q_{max}, Вт
273	50	0,37	3,30	1,82	3,30
283	40	0,25	3,52	1,89	3,52
293	30	0,18	3,73	1,95	3,73
303	20	0,11	3,93	2,02	3,93

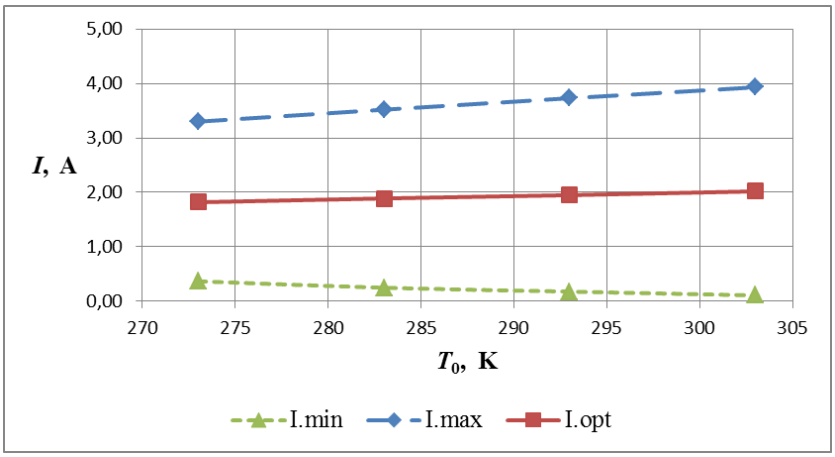


Рисунок 2.5 – Залежність граничних та оптимального токів термоелемента від температури холодної поверхні

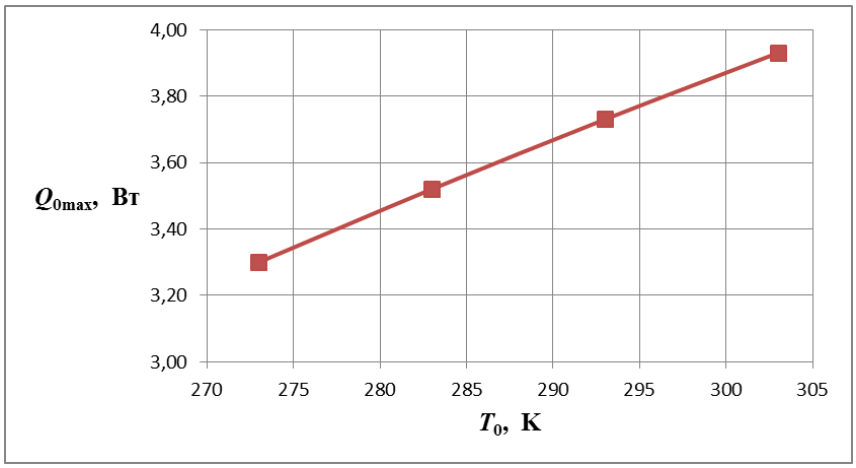


Рисунок 2.6 – Залежність максимальної холодопродуктивності термоелемента від температури холодної поверхні

2.4 Результати проектування термоелектричного охолоджувача рідини

Для вихідних даних (розхід мастила 0,1 кг/с, температури початкова 50°С та кінцева 30°С проведені і розрахунки по створеній програмі (додаток Б).

На основі попередніх досліджень було прийнято, що температура холодної поверхні термоелемента складає 288 К (15°С), а холодопродуктивність (2 – 3) Вт в залежності від сили тока. Результати проектування представлені у вигляді залежностей характеристик термоелектричного охолоджувача рідини від швидкості руху масла в ньому на рисунках 2.7 – 2.10.

Аналіз отриманіх даних показує, що загальна довжина канала охолоджувача не залежить від швидкості рідини із-за постійного значення числа Рейнольдса для ламінарного режиму течії досить в'язкого масла в каналалі охолоджувача.

Більша швидкість руху масла зменшує масу, площу поверхні та ще ряд параметрів охолоджувача, але підвищує втрати тиску та потужність насоса. При швидкості 0,45 м/с вони досягають значення 0,1 МПа.

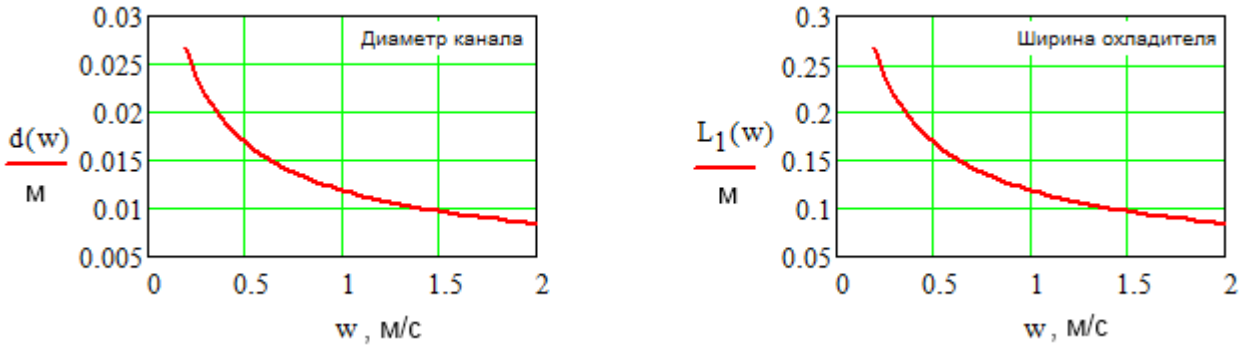


Рисунок 2.7 – Діаметр та ширина канала охолоджувача від швидкості рідини

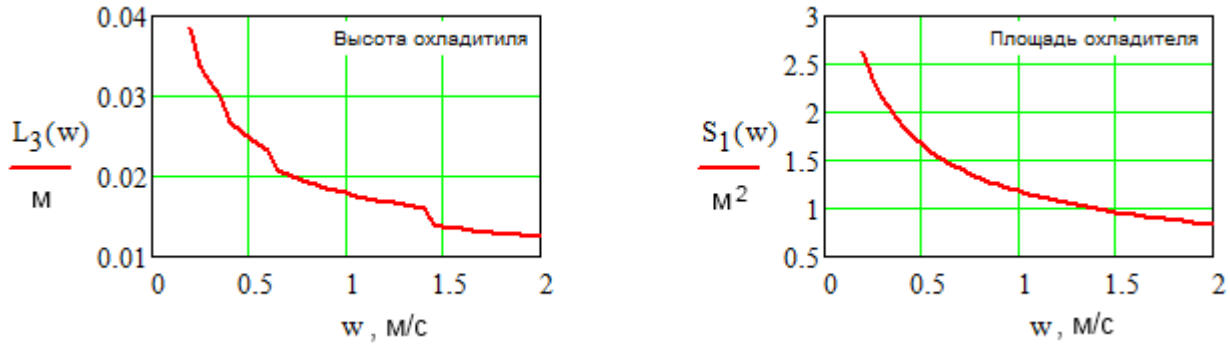


Рисунок 2.8 – Висота та площа поверхні охолоджувача від швидкості рідини

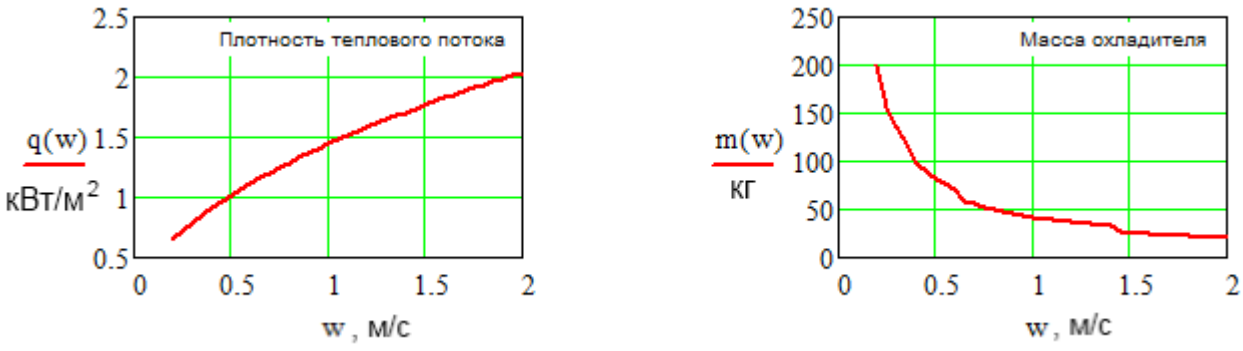


Рисунок 2.9 – Тепловий поток та маса охолоджувача від швидкості рідини

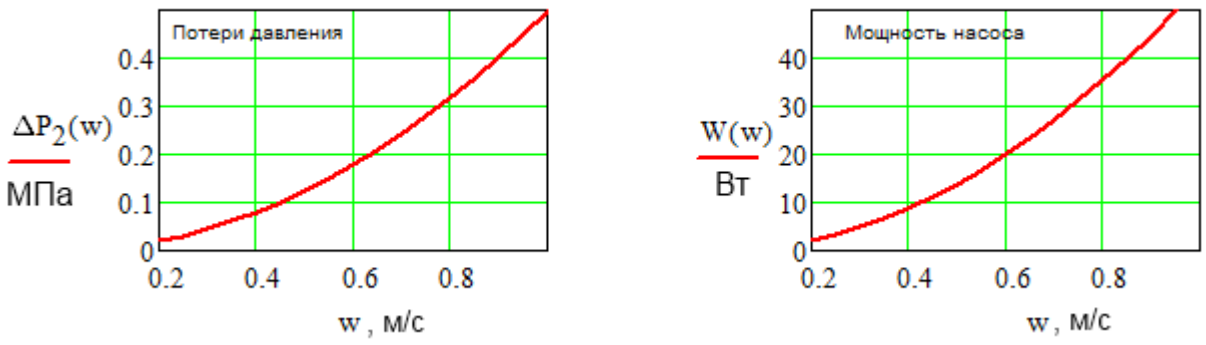


Рисунок 2.10 – Залежність параметрів охолоджувача рідини (втрати тиску та потужність насосів) від швидкості її руху

Виходячи з вище наведеного аналізу, вважаємо раціональну швидкість для проектуємого охолоджувача 0,4 м/с, якій відповідають наступні параметри:

- маса – 98 кг,
- площа поверхні (одностороння) – 1,87 м^2,
- товщина плити – 27 мм,
- густина теплового потоку – 913 Вт/м^2,
- при прийнятій площі, на який встановлюють термоелемент – 4 см^2, номінальна потужність термоелемента – 1,5 Вт,
- втрати тиску – 0,08 МПа,
- потужність насосу – 9 Вт.

ВИСНОВКИ

1) Розглянутий принцип роботи і конструкція термоелемента Пельтьє.
2) За даними літературних джерел визначені властивості напівпровідникових матеріалів термоелементів Пельтьє, вимоги до них для побудови конкурентних термоелектричних холодильників, розрахункові співвідношення.
3) Розроблена конструкція проточного термоелектричного охолоджувача рідини, його стаціонарна математична модель для зосереджених параметрів та розрахункові програми.
4) На основі програмних розрахунків отримані результати моделювання роботи термоелементів, залежність холодопродуктивності від робочого тока.
5) Проведени проектувальні розрахунки термоелектричного охолоджувача рідини. На основі аналіза отриманих результатів визначені його раціональні параметри

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Иоффе А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы. М.- Л.: Изд-во АН СССР, 1960. – 158 с.
2. Термоэлектрическое охлаждение. Текст лекций. // Под ред. Л.П.Булата. – С.-П.: СПбГУНиПТ, 2002. – 147 с.
3. Булат Л.П. Термоэлектрическое охлаждение: состояние и перспективы. – Холодильная техника, 2004, № 8, с.2-7.
4. Анатычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. 1979.– 764 с.
5. Булат Л.П., Бузин Е.В. Термоэлектрические охлаждающие устройства: Метод. указания для студентов спец. 070200 “Техника и физика низких температур”. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2001. – 41 с.
6. Коленко Е.А. Термоэлектрические охлаждающие приборы. Л.: Наука, 1967. – 282 с.
7. Симкин А. В. Термоэлектрическая эффективность низкотемпературных генераторных материалов, возможность ее повышения. / А. В. Симкин, А. В. Бирюков, Н. И. Репников, В. В. Ховайло // Вестник Челябинского государственного университета. 2015. № 7 (362). Физика. Вып. 20. с. 21–29.
8. Старовойтов В.А. Термоэлектрическая холодильная машина. Кемерово: КГТУ, 1996. – 16 с.
9. Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Сакун И.А., Тимофеевский Л.С. Термоэлектрический эффект. Эффективность применения термоэлектрического охлаждения. http://www.holodilshchik.ru/ index_holodilshchik_issue_2_2006_ Thermocooling.htm – 10.11.2019.
10. Дмитриев, А. В. Современные тенденции развития физики термоэлектрических материалов / А. В. Дмитриев, И. П. Звягин // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180, № 8. С. 821–837.
11. Покорный Е.Г., Щербина А.Г. Расчет полупроводниковых охлаждающих устройств. Л.: Наука, 1969. – 206 с.

12. Цветков Ю. Н., Аксенов С. С., Шульман В. М. Судовые термоэлектрические охлаждающие устройства.– Л.: Судостроение, 1972.– 191 с.

13. Термоэлектрический эффект и охлаждение, эффект Пельтье. http://electrik.info/main/fakty/107-termoyelektricheskij-yeffekt-i-oxlazhdenie.html – 10.11.2019.

14. Вайнер А.Л. Каскадные термоэлектрические источники холода. – М.: Сов. радио, 1976.– 136 с.

15. Мартыновский В. С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов.– М.: Энергия, 1979.– 285 с.

16. Дульнев Г.Н. Тнпло- и массобмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высш. шк., 1984. – 247 с.

17. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

18. Справочник по теплообменникам: В 2-х т. Т.2/ Пер. с англ. Под ред. Мартыненко М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.

ДОДАТОК А

РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ ТЕРМОЕЛЕМЕНТА

Коэффициент ТЭДС $\alpha := 2.0 \cdot 10^{-4}$

Коэффициент теплопроводности $\lambda := 2$

Электропроводимость, Ом$^{-1}$ м$^{-1}$ $\sigma := 1.0 \cdot 10^{5}$

Размеры контакта $a := 0.001$ $h := 0.003$

Количество контактов по стороне сборки $n \equiv 10$

Шаг контактов $S_a := 2 \cdot a = 0.002$

Геометрический размер сборки $b := n \cdot S_a = 0.02$

Удельное сопротивление $\rho := \frac{1}{\sigma} = 1 \times 10^{-5}$

Площадь контакта $f_k := a^2 = 1 \times 10^{-6}$

Площадь контактов сборки $f_\lambda := f_k \cdot n^2 = 1 \times 10^{-4}$

Температура холодной поверхности $T_X := 288$

Разность температур на контакте $\Delta T := 15$

Сопротивление 1-го элемента сборки $R := \rho \cdot \frac{h}{f_k} = 0.03$

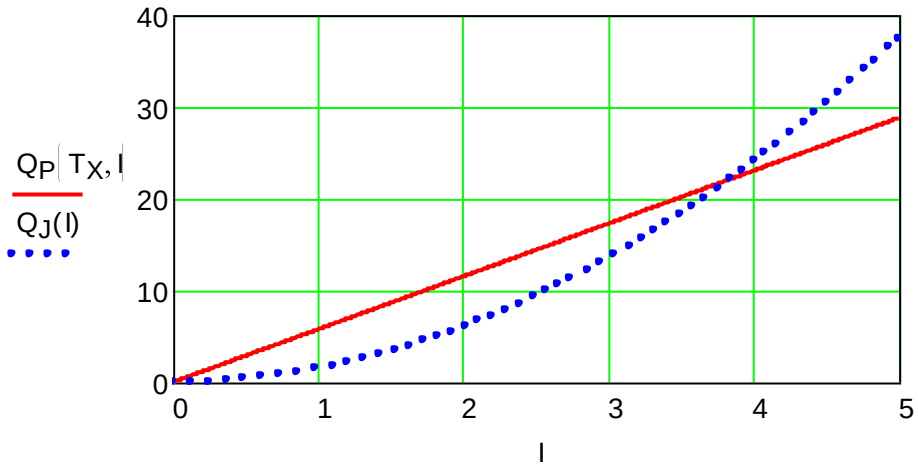
Теплота Пельтье $Q_P(T, I) := \alpha \cdot T \cdot I \cdot n^2$

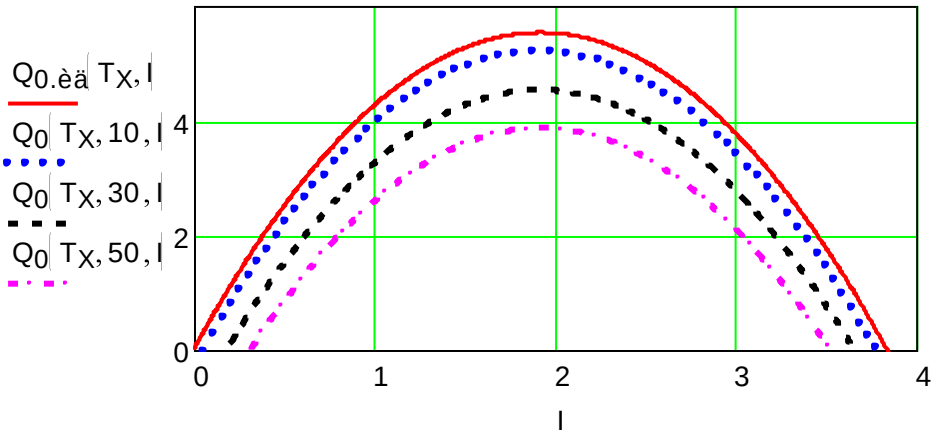
Тепловые потери Джоуля $Q_J(I) := \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \left(R \cdot n^2 \right)$

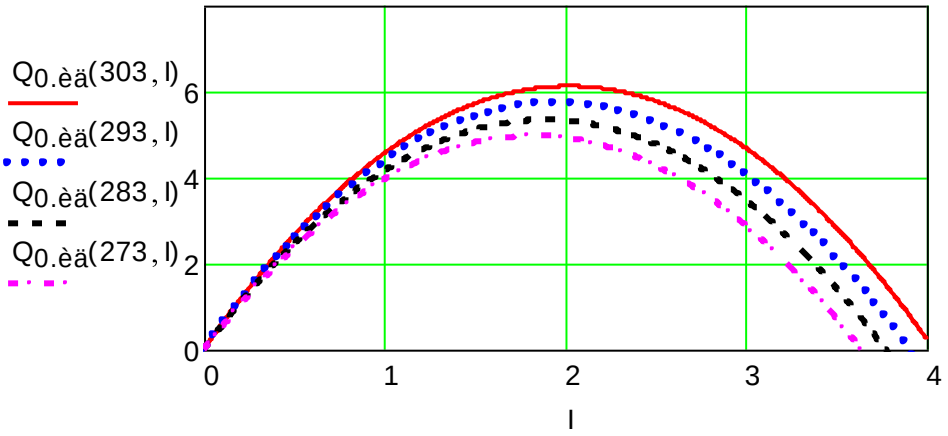
Тепловые потери Теплопроводности $Q_\lambda(\Delta T) := \frac{\lambda}{h} \cdot \Delta T \cdot f_\lambda$

Идеальная холодопроизводительность $Q_{0.\text{èä}}(T, I) := Q_P(T, I) - Q_J(I)$

Холодопроизводительность с учетом теплопотерь теплопроводности $Q_0(T, \Delta T, I) := Q_P(T, I) - Q_J(I) - 0.5 \cdot Q_\lambda(\Delta T)$


40
30
20
10
0
0
1
2
3
4
5
I
QP(TX, I)
QJ(I)


4
2
0
0
1
2
3
4
I
Q0.èä(TX, I)
Q0(TX, 10, I)
Q0(TX, 30, I)
Q0(TX, 50, I)



Максиальный ток через термоэлемент при $Q_{0.èä}=0$ и оптимальный ток для максиальной идеальной холодопроизводительности $Q_{0.èä}$

$i := 3$

$T_X := 273$ $\quad Q_{0T.èä}(I) := Q_{0.èä}(T_X, I)$

$I_0 := \mathrm{root}(Q_{0.èä}(T_X, i), i)$ $\quad I_0 = 3.64$

$I_{0.max} := \mathrm{Maximize}(Q_{0T.èä}, i)$ $\quad I_{0.max} = 1.82$

$Q_{0T.èä}(I_{0.max}) = 4.969$

$T_X := 283$ $\quad Q_{0T.èä}(I) := Q_{0.èä}(T_X, I)$

$I_0 := \mathrm{root}(Q_{0.èä}(T_X, i), i)$ $\quad I_0 = 3.773$

$I_{0.max} := \mathrm{Maximize}(Q_{0T.èä}, i)$ $\quad I_{0.max} = 1.887$

$Q_{0T.èä}(I_{0.max}) = 5.339$

$T_X := 293$ $\quad Q_{0T.èä}(I) := Q_{0.èä}(T_X, I)$

$I_0 := \mathrm{root}(Q_{0.èä}(T_X, i), i)$ $\quad I_0 = 3.907$

$I_{0.max} := \mathrm{Maximize}(Q_{0T.èä}, i)$ $\quad I_{0.max} = 1.953$

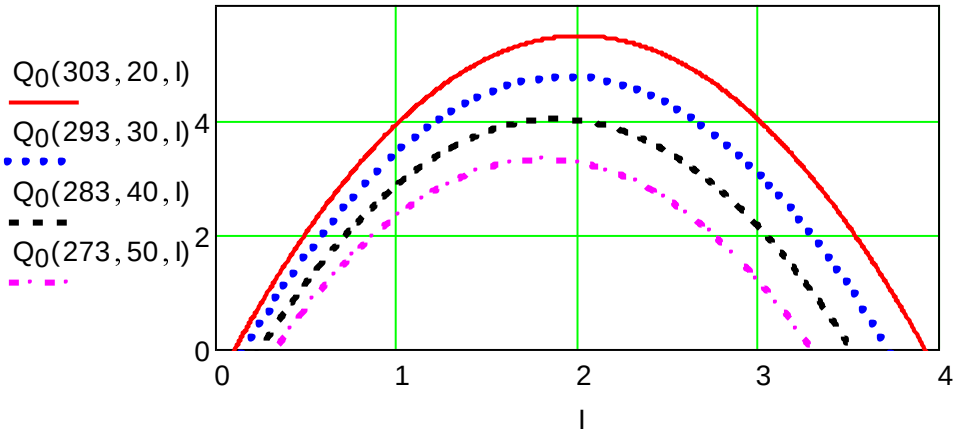
$Q_{0T.èä}(I_{0.max}) = 5.723$

$T_X := 303$ $\quad Q_{0T.èä}(I) := Q_{0.èä}(T_X, I)$

$I_0 := \mathrm{root}(Q_{0.èä}(T_X, i), i)$ $\quad I_0 = 4.04$

$I_{0.max} := \mathrm{Maximize}(Q_{0T.èä}, i)$ $\quad I_{0.max} = 2.02$

$Q_{0T.èä}(I_{0.max}) = 6.121$



Максиальный ток через термоэлемент при $Q_{0.rea}$ =0 и оптимальный ток для максиальной действительной холодопроизводительности $Q_{0.rea}$

$T_X := 273$ $\quad \Delta T := 50$ $\quad Q_{0.real}(I) := Q_0(T_X, \Delta T, I)$

$i := 2.8$ $\quad I_{0.opt} := \text{Maximize}(Q_{0.real}, i)$ $\quad I_{0.opt} = 1.82$

$Q_{0.real}(I_{0.opt}) = 3.302$

$I_{0.min} := \text{root}(Q_{0.real}(i), i, 0, 1)$ $\quad I_{0.min} = 0.336$

$I_{0.max} := \text{root}(Q_{0.real}(i), i, 3, 5)$ $\quad I_{0.max} = 3.304$

$T_X := 283$ $\quad \Delta T := 40$ $\quad Q_{0.real}(I) := Q_0(T_X, \Delta T, I)$

$i := 2.8$ $\quad I_{0.opt} := \text{Maximize}(Q_{0.real}, i)$ $\quad I_{0.opt} = 1.887$

$Q_{0.real}(I_{0.opt}) = 4.006$

$I_{0.min} := \text{root}(Q_{0.real}(i), i, 0, 1)$ $\quad I_{0.min} = 0.252$

$I_{0.max} := \text{root}(Q_{0.real}(i), i, 3, 5)$ $\quad I_{0.max} = 3.521$

$T_X := 293$ $\quad \Delta T := 30$ $\quad Q_{0.real}(I) := Q_0(T_X, \Delta T, I)$

$i := 2.8$ $\quad I_{0.opt} := \text{Maximize}(Q_{0.real}, i)$ $\quad I_{0.opt} = 1.953$

$Q_{0.real}(I_{0.opt}) = 4.723$

$I_{0.min} := \text{root}(Q_{0.real}(i), i, 0, 1)$ $\quad I_{0.min} = 0.179$

$I_{0.max} := \text{root}(Q_{0.real}(i), i, 3, 5)$ $\quad I_{0.max} = 3.728$

$T_X := 303$ $\quad \Delta T := 20$ $\quad Q_{0.real}(I) := Q_0(T_X, \Delta T, I)$

$i := 2.8$ $\quad I_{0.opt} := \text{Maximize}(Q_{0.real}, i)$ $\quad I_{0.opt} = 2.02$

$Q_{0.real}(I_{0.opt}) = 5.454$

$I_{0.min} := \text{root}(Q_{0.real}(i), i, 0, 1)$ $\quad I_{0.min} = 0.113$

$I_{0.max} := \text{root}(Q_{0.real}(i), i, 3, 5)$ $\quad I_{0.max} = 3.927$

ДОДАТОК Б

ПРОГРАМА ПРОЕКТУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Расход жидкости $G := 0.1$

Температура пластины, С : $T_c := 15$

Температура жидкости на входе, С : $T_1 := 50$

Температура жидкости на выходе, С : $T_2 := 30$

Скорость потока охлаждаемой жидкости $w := 0.4$

Плотность конструкционного материала $\rho := 2700$

Физические свойства масла:

Удельная теплоёмкость, Дж/(кг*К) $c_2 := 1700$

Удельная плотность, кг/м^3 $\rho_2 := 900$

Кинематической вязкости, м^2/с $\nu_2 := 45 \cdot 10^{-6}$

Динамической вязкости, Па*с $\mu_2 := \nu_2 \cdot \rho_2 = 0.04$

Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К) $\lambda_2 := 0.115$

Коэффициент температуропроводности, м^2/с $a_2 := \frac{\lambda_2}{c_2 \cdot \rho_2} = 0$

$Pr_2 := \frac{\nu_2}{a_2}$ $Pr_2 = 598.696$

$Q := G \cdot c_2 \cdot \left| T_1 - T_2 \right| = 3400$ $Q = 3400$

$f(w) := \frac{G}{\rho_2 \cdot w}$ $f(w) = 2.778 \times 10^{-4}$

Диаметр трубы, м :

$$d(w) := \left(\frac{4\cdot f(w)}{\pi}\right)^{0.5} \qquad d(w) = 0.019$$

Шаг канала, м

$$s_t(w) := 2\cdot d(w) \qquad s_t(w) = 0.038$$

Толщина стенок охладителя

$$\delta_w(w) := \frac{\mathrm{ceil}(1000\cdot d(w)\cdot 0.2)}{1000} \qquad \delta_w(w) = 0.004$$

Средняя логарифмическая разность температур, К :

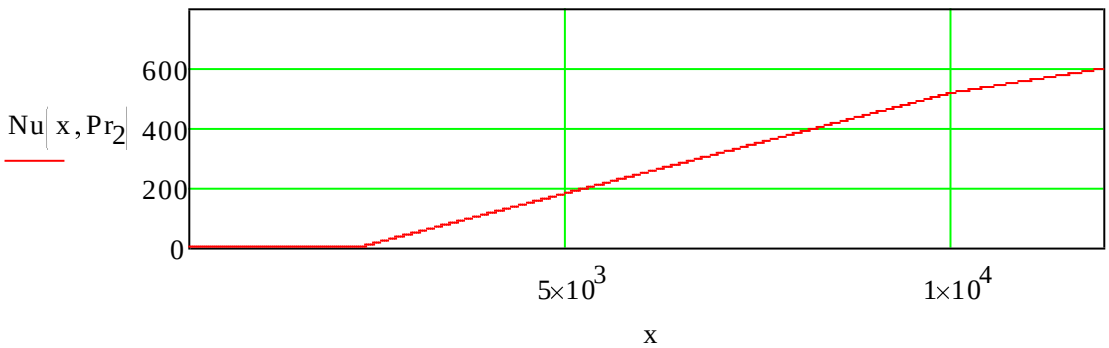
$$\Delta T_n := \frac{|T_1 - T_c| - |T_2 - T_c|}{\ln\left(\frac{T_1 - T_c}{T_2 - T_c}\right)} \qquad \Delta T_n = 23.604$$

Коэффициент теплообмена со стороны масла

$$Re_2(w) := \frac{w\cdot d(w)}{\nu_2} \qquad Re_2(w) = 167.167$$

$$\varepsilon_R(w) := 1 + 1.77\cdot\frac{d(w)}{s_t(w)} \qquad \varepsilon_R(w) = 1.885$$

$$Nu(Re, Pr) := \begin{cases} Nu1 \leftarrow 4.36 \\ Nu2 \leftarrow 0.021\cdot(10000)^{0.8}\cdot Pr^{0.43} \\ Nu1 \ \text{ if } \ Re < 2300 \\ Nu1 + \frac{Nu2 - Nu1}{10000 - 2300}\cdot(Re - 2300) \ \text{ if } \ 2300 \le Re < 10000 \\ 0.021\cdot(Re)^{0.8}\cdot Pr^{0.43} \ \text{ if } \ Re \ge 10000 \end{cases}$$



$Nu_2(w) := Nu(Re_2(w), Pr_2) \cdot \varepsilon_R(w)$ $\qquad Nu_2(w) = 8.219$

$\alpha_2(w) := Nu_2(w) \cdot \frac{\lambda_2}{d(w)}$ $\qquad \alpha_2(w) = 50.256$

Линейная плотность теплового потока участка охлаждения, Вт/м

$q_l(w) := \alpha_2(w) \cdot \pi \cdot d(w) \cdot \Delta T_n$ $\qquad q_l(w) = 70.087$

Длина трубы, м :

$L_n(w) := \frac{Q}{q_l(w)}$ $\qquad L_n(w) = 48.511$

Односторонняя площадь охладителя

$S_1(w) := s_t(w) \cdot (L_n(w) + 1)$ $\qquad S_1(w) = 1.862$

Двусторонняя площадь охладителя

$S_2(w) := 2 \cdot s_t(w) \cdot (L_n(w) + 1)$ $\qquad S_2(w) = 3.724$

Плотность теплового потока на поверхности охладителя

$q(w) := \frac{Q}{S_2(w)}$ $\qquad q(w) = 912.881$

Количество каналов в плите $\qquad N := 5$

Ширина плиты $\qquad L_1(w) := N \cdot s_t(w)$ $\qquad L_1(w) = 0.188$

Длина плиты $\qquad L_2(w) := \frac{S_1(w)}{L_1(w)}$ $\qquad L_2(w) = 9.902$

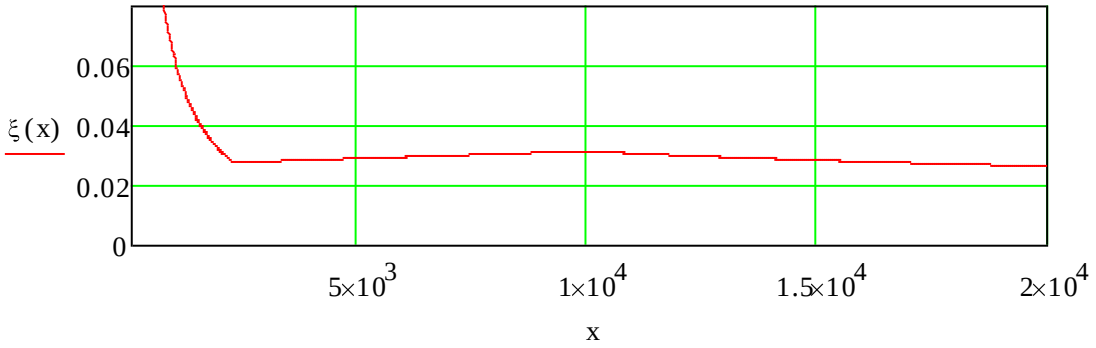
Высота плиты $\qquad L_3(w) := d(w) + 2 \cdot \delta_w(w)$ $\qquad L_3(w) = 0.027$

Масса плиты охладителя

$m(w) := \left(L_3(w) \cdot S_1(w) - \frac{\pi \cdot d(w)^2}{4} \cdot \frac{S_1(w)}{s_t(w)} \right) \cdot \rho$ $\qquad m(w) = 97.65$

Гидравлические потери:

$$\xi(Re) := \begin{cases} \xi1 \leftarrow \dfrac{64}{2300} \\ \xi2 \leftarrow \dfrac{0.316}{10000^{0.25}} \\ \dfrac{64}{Re} \quad \text{if } Re < 2300 \\ \xi1 + \dfrac{\xi2 - \xi1}{10000 - 2300}\cdot(Re - 2300) \quad \text{if } 2300 \le Re < 10000 \\ \dfrac{0.316}{Re^{0.25}} \quad \text{if } Re \ge 10000 \end{cases}$$



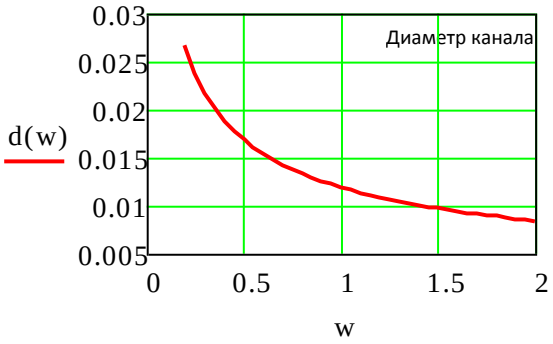
$\xi_2(w) := \xi\left(Re_2(w)\right)$ $\qquad$ $\xi_2(w) = 0.383$

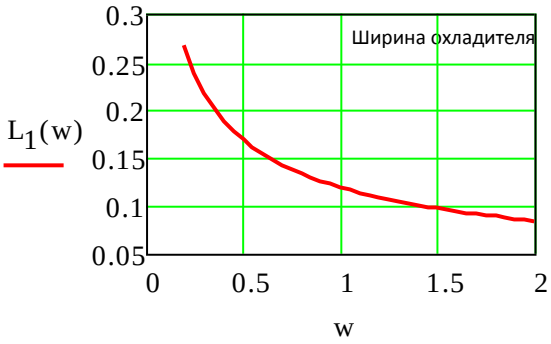
$\xi_m := 1.2\cdot1.0$

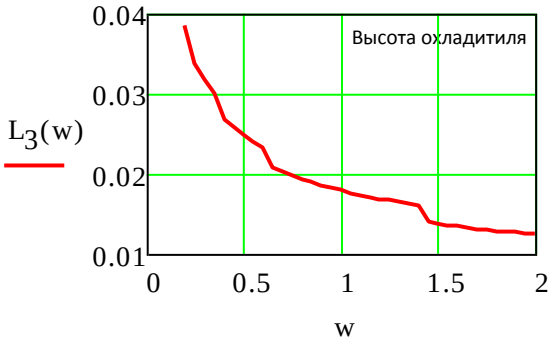
$\Delta P_2(w) := \left(\xi_2(w)\cdot\dfrac{L_n(w)}{d(w)} + \xi_m\cdot\dfrac{2\cdot L_n(w)}{1}\right)\cdot\dfrac{\rho_2\cdot w^2}{2}$ $\qquad$ $\Delta P_2(w) = 79487.147$

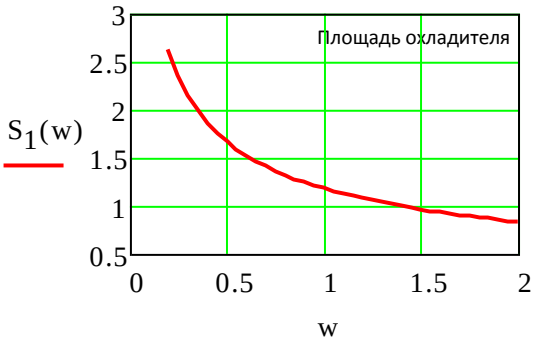
$W(w) := \dfrac{G}{\rho_2}\cdot\Delta P_2(w)$ $\qquad$ $W(w) = 8.832$

$w := 0.2, 0.25 .. 2$

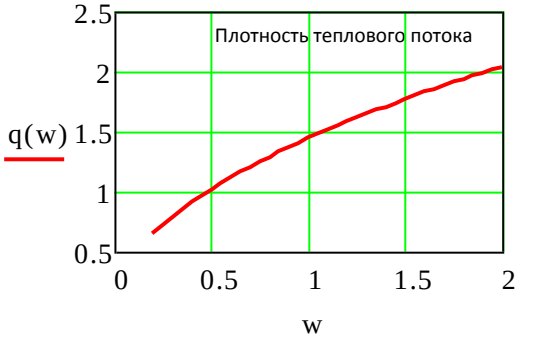


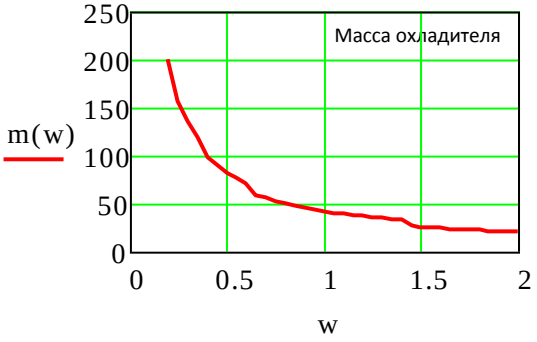
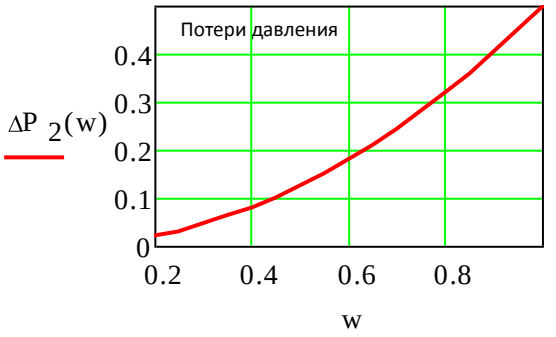
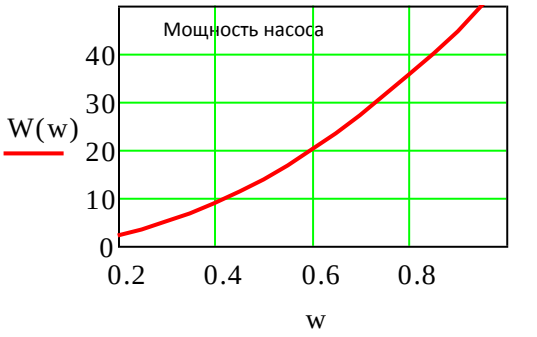
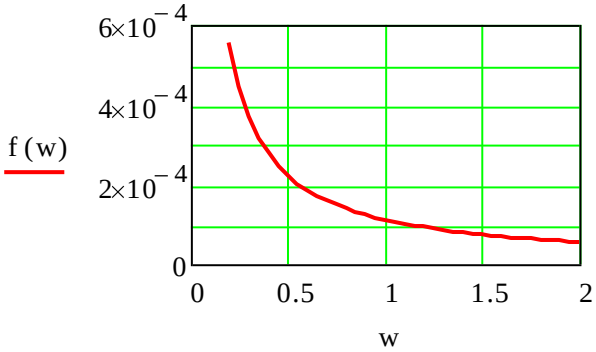
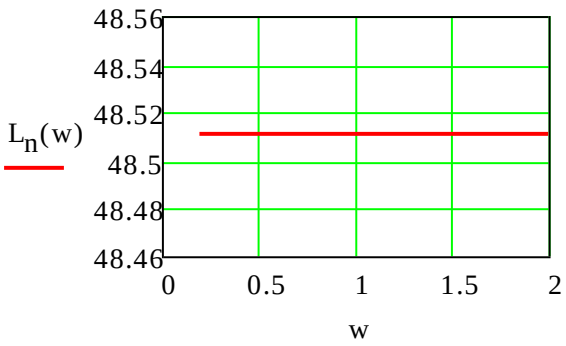






$$q(w) := 10^{-3} \cdot q(w)$$





$$\Delta P_2(w) := 10^{-6} \cdot \Delta P_2(w)$$