

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

Навчально-науковий інститут атомної і теплової енергетики
Кафедра атомної енергетики
Науково-дослідна (експериментальна) лабораторія процесів в
енергетичному обладнанні

**Науково-дослідна робота
2506п**

**Створення теплофізичних засад проектування теплообмінних
пристроїв на двофазних теплопередавальних елементах для
енергозбереження у вентиляційних системах будівель**

**Керівник: д.т.н., проф.
Євген Письменний**

Об'єкт, предмет дослідження та мета НДР

Об'єкт дослідження: теплогідрравлічні процеси в теплообмінних пристроях на двофазних термосифонах для енергозбереження у вентиляційних системах будівель.

Предмет дослідження: вплив фізичних, геометричних та режимних факторів на аеродинамічний опір теплообмінних пристроїв та на теплопередавальні характеристики пристроїв в цілому та на їх основні елементи – термосифони.

Мета: вивчення процесів тепломасообміну та гідродинаміки в термосифонах плоско-овального профілю із зовнішнім орєбренням та теплообмінних пристроях, виконаних із таких термосифонів.

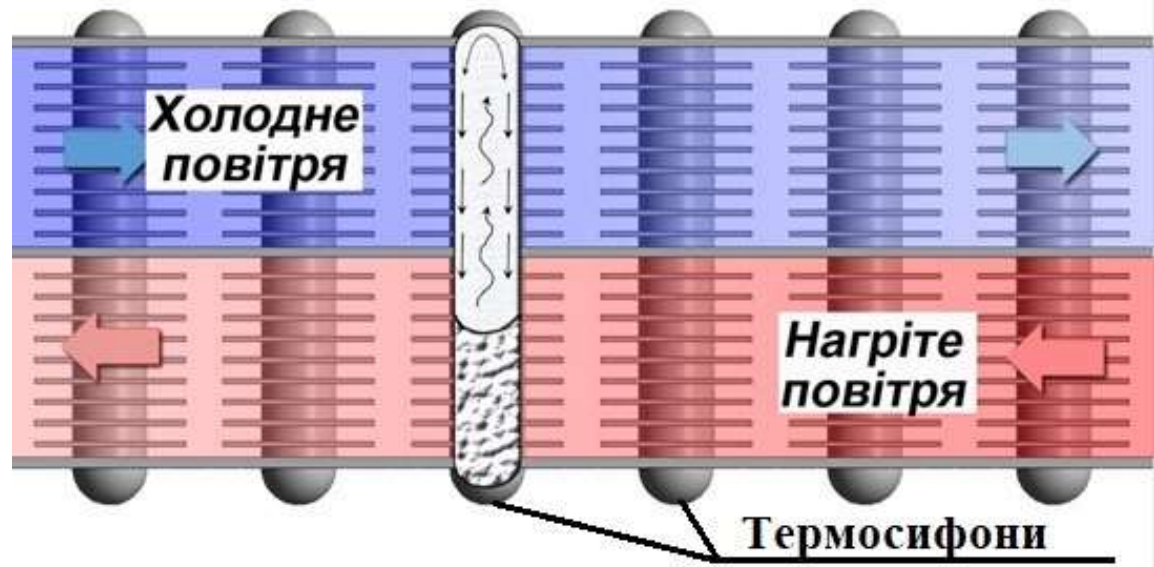
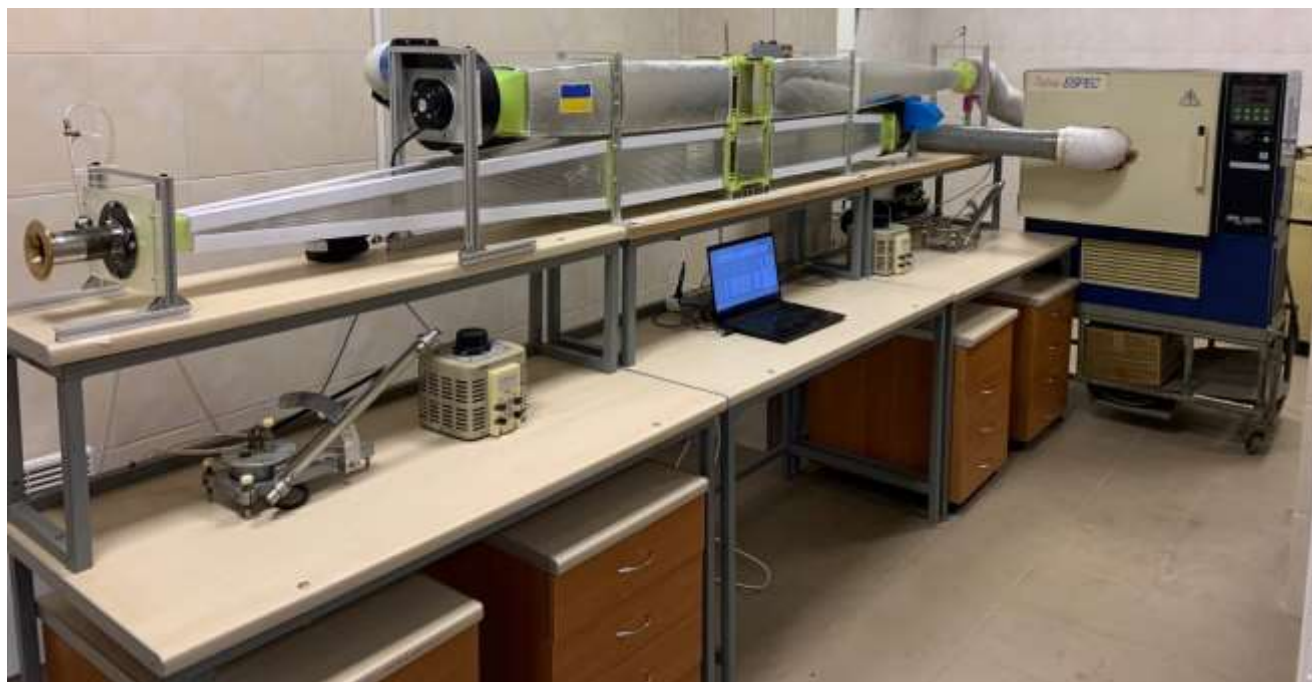


Схема теплообмінного пристрою-утилізатора на термосифонах

Дослідні зразки та експериментальний стенд



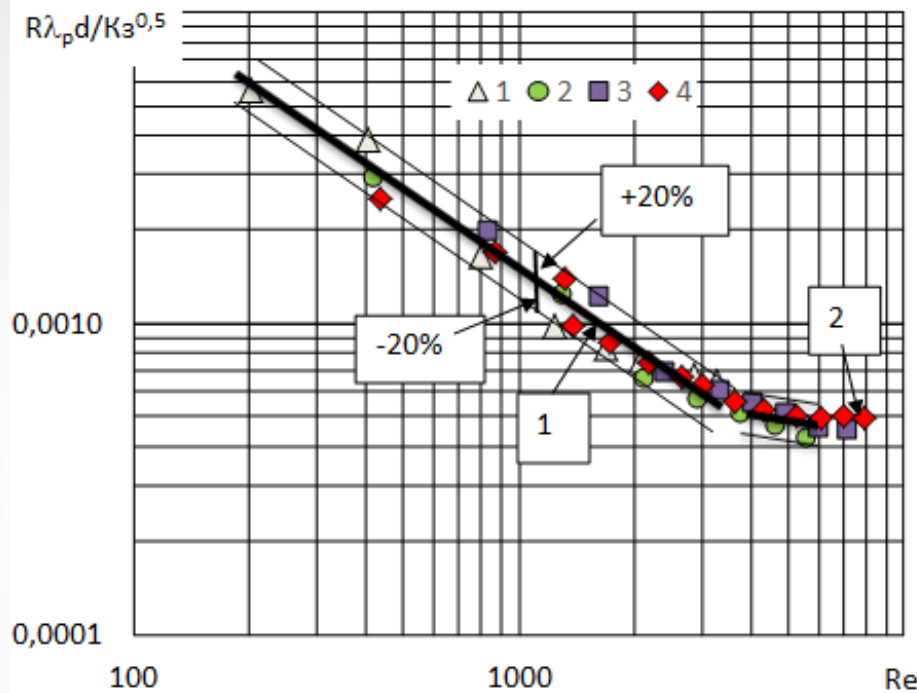
Дослідні зразки



Експериментальний стенд

Основні наукові результати

Результати дослідження круглих ТС з теплоносієм пентаном



Узагальнюючі залежності:

- для $Re < 3000$ (ламінальний режим течії пари)

$$R_{\Sigma} = 0.21 \frac{1}{\lambda_p d_{вн}} K_3^{0,5} Re^{-0,8}$$

- для $Re > 3000$ (турбулентний режим течії пари)

$$R_{\Sigma} = 6.2 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\lambda_p d_{вн}} K_3^{0,5} Re^{-0,3}$$

де $Re = \frac{w \cdot d_{вн}}{\nu''}$ – число Рейнольдса;

λ_p – коефіцієнт теплопровідності рідини, Вт/(м·К);

ν'' – коефіцієнт кінематичної в'язкості пари, м²/с.

коефіцієнт заповнення K_3 : 1 – 98%; 2 – 48%;
3 – 36%; 4 – 28%

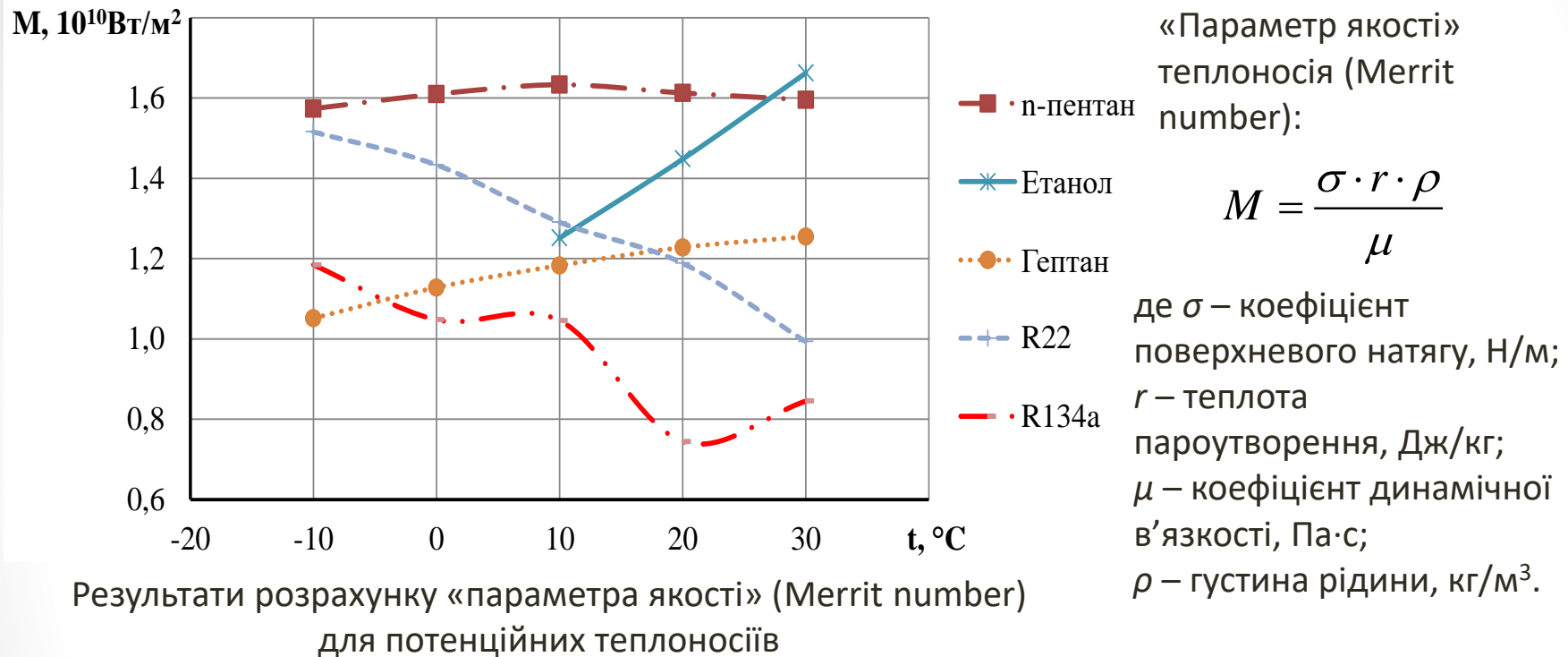
Діапазон застосування: $d_{вн} = 9,0$ мм;

$K_3 = 0,28 \dots 0,98$

Проведені дослідження показали, що ТС з пентаном має високі теплопередавальні характеристики, проте пентан не може бути застосований в умовах вентиляційних систем, оскільки ТС з цим теплоносієм мають занадто високу пускову температуру (60°C), проте його можна потенційно розглядати для утилізації більш високотемпературних викидів.

Основні наукові результати

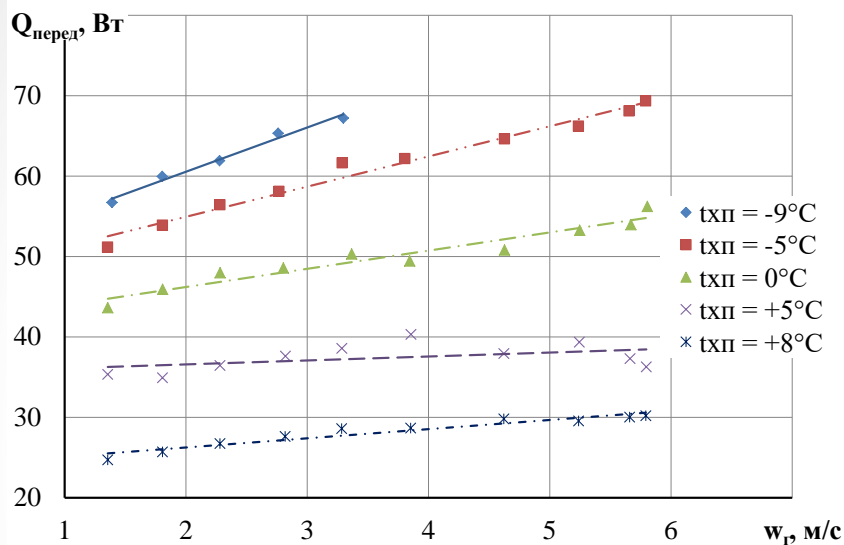
Вибір теплоносія для термосифонів



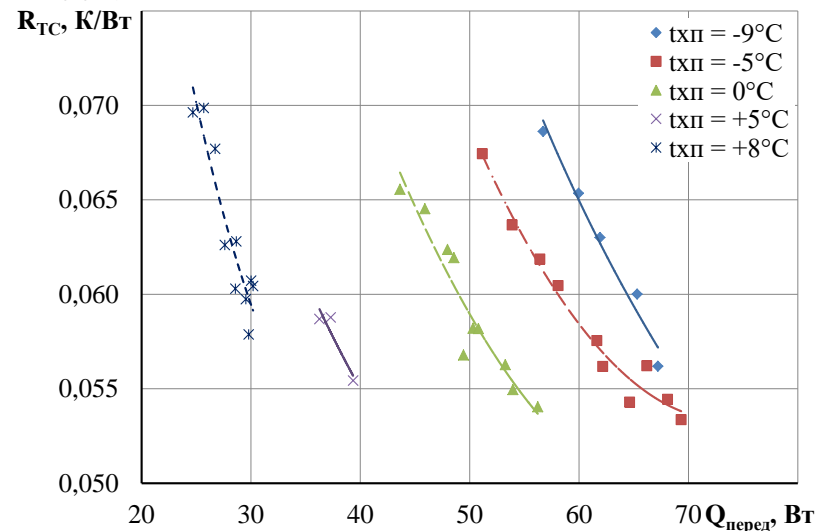
Фреон R134a має одну з найнижчих температури кипіння серед розглянутих теплоносіїв. Він є безпечнішим, ніж інші, повністю відповідає вимогам безпеки міжнародних стандартів ASHRAE, не впливає на озоновий шар (ODP=0), та відносно мало впливає на глобальне потепління (GWP=1300). Оскільки стосовно теплоносія питання токсичності, безпечності для людини та навколишнього середовища є одними з найважливіших при проектуванні теплообмінників для вентиляційних систем, то в даній роботі в якості теплоносія в ТС було використано фреон R134a.

Основні наукові результати

Результати дослідження плоско-овального ТС з неповним поперечним оребренням та фреоном R134a



Залежність переданого теплового потоку від швидкості гарячого повітря та температури холодного повітря

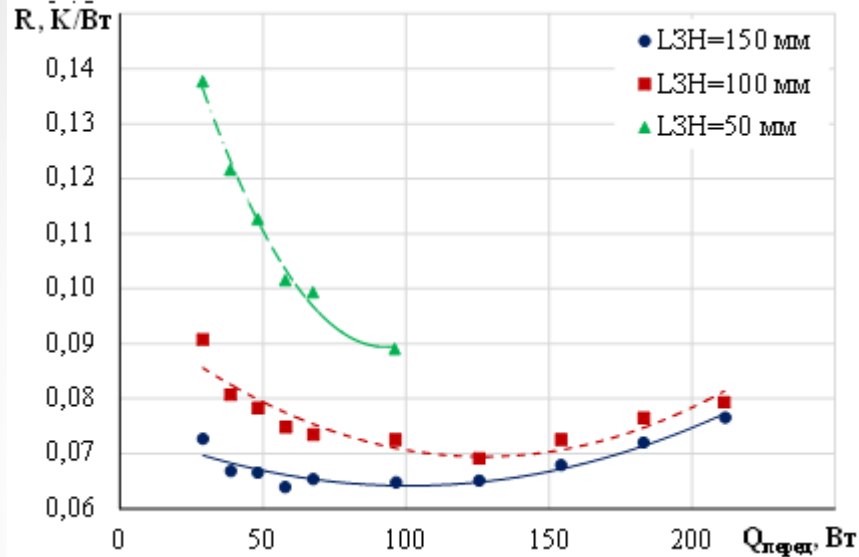


Залежність термічного опору від переданого теплового потоку

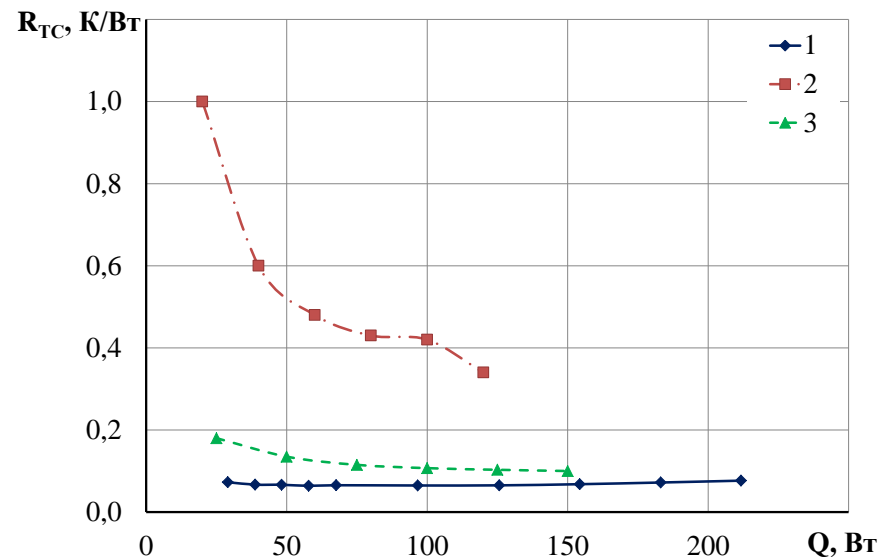
Термічний опір ТС при умовах роботи, наближених до вентиляційних систем, складає 0,05...0,07 К/Вт в діапазоні переданих потужностей 20...70 Вт та температур холодного повітря $-9...+8^\circ\text{C}$. При цьому зміна температури холодного повітря практично не впливає на термічний опір ТС, а її зниження призводить до підвищення переданого теплового потоку. Такі властивості роблять ці ТС перспективними для використання в ТОП-утилізаторах теплоти що працюють при низьких температурах припливного повітря, а також в широкому діапазоні перепадів температур між витяжним та припливним повітрям.

Основні наукові результати

Результати дослідження впливу довжини зони нагріву на характеристики плоско-овального ТС з неповним поперечним оребренням та фреоном R134a



Вплив довжини зони нагріву на термічний опір термосифона при швидкості холодного повітря 5,2 м/с



1 – досліджений ТС, КЗ 58%; 2 – мідний круглий ТС, КЗ 60% [1]; 3 – мідний круглий ТС з внутрішнім оребренням, КЗ 50% [2]

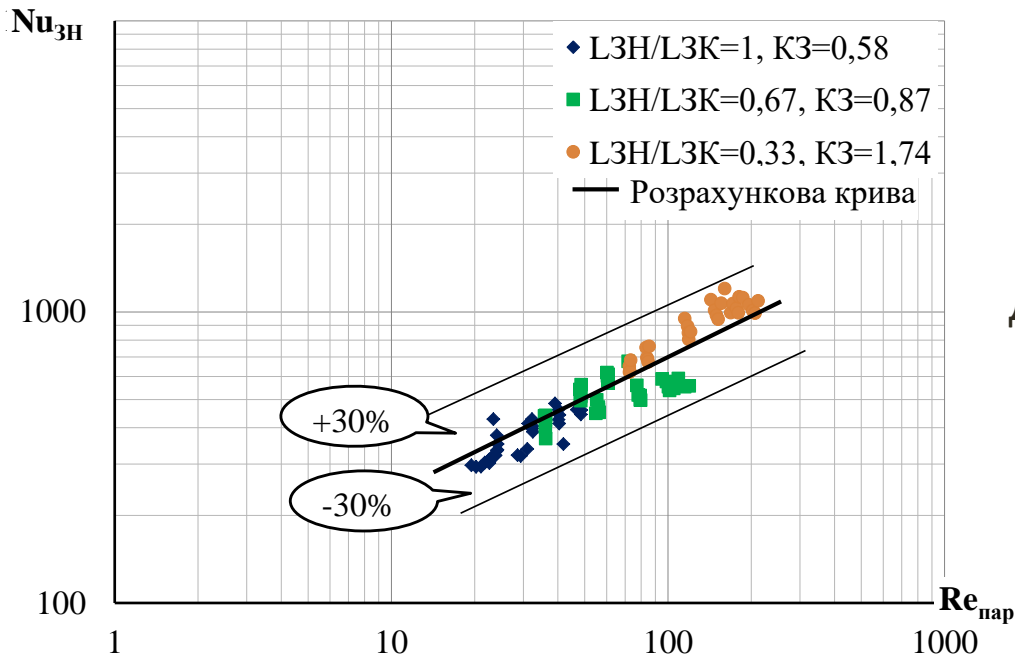
Порівняння отриманих експериментальних даних з літературними даними

Збільшення довжини ЗН в 3 рази (від 50 до 150 мм) призводить до зниження термічного опору в 1,3...2 рази при швидкостях холодного повітря 1,8...6 м/с. При цьому термічний опір дослідженого ТС на 26-92% нижчий, ніж у аналогів. За результатами досліджень можна рекомендувати ТС з довжиною ЗН 150 мм (співвідношення довжин ЗН та ЗК 1:1) та коефіцієнтом заправки (КЗ) 58% до застосування в якості основних теплопередавальних елементів в ТОП-утилізаторах теплоти вентиляційного повітря.

1. Adel A. et al. Eidan Experimental and numerical investigation of thermosyphon performance in HVAC system applications / Heat Mass Transfer. – 2016. – 52. – P. 2879-2893.
2. Y. Naresh et al. Thermal performance of an internally finned two phase closed thermosyphon with refrigerant R134a: A combined experimental and numerical study / International Journal of Thermal Sciences. – 2018. – 126. – P. 281-293.

Основні наукові результати

Узагальнення результатів дослідження плоско-овальних ТС з неповним поперечним оребренням та фреоном R134a



Узагальнююча залежність

$$Nu_{3H} = 90 \cdot Re_{пар}^{0,55} \cdot \left(\frac{L_{3H}}{L_{3K}} \right)^{0,9} \cdot K_3$$

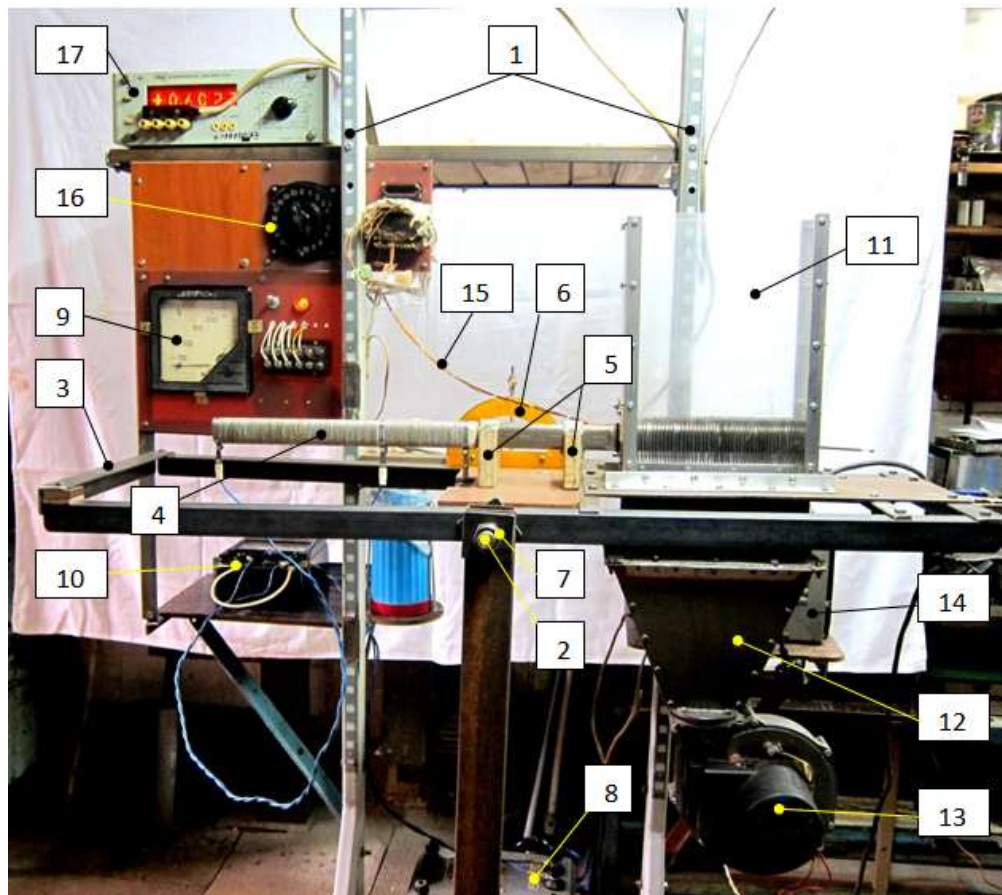
$$\text{де } Re_{пар} = \frac{w_{пу} \cdot d_{екв}}{\nu_{пар}}$$

$w_{пу}$ – швидкість пароутворення, м/с;

$\nu_{пар}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості пари, м²/с.

Запропонована залежність справедлива для ТС з еквівалентним діаметром 0,016 м в діапазоні чисел Re 19,5...236,3; відношень довжин зон L_{3H}/L_{3K} 0,33...1; K_3 0,58...1,74. Вона дає можливість розраховувати коефіцієнти тепловіддачі в ЗН з точністю $\pm 30\%$, що достатньо для інженерних розрахунків.

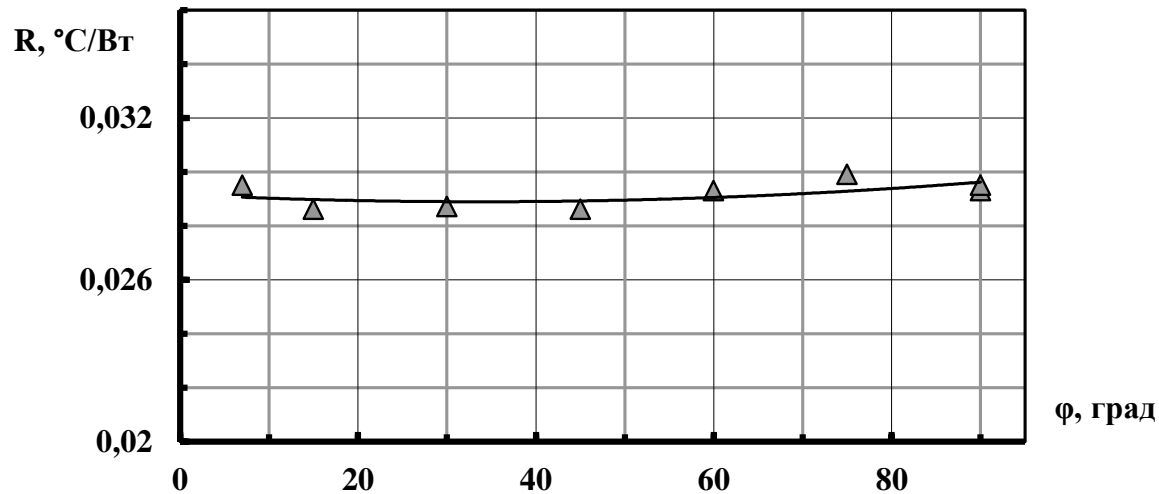
Експериментальний стенд для дослідження впливу кута нахилу на характеристики ТС



1 – пересувна рама; 2 – вісь; 3 – поворотна рама; 4 – досліджуваний термосифон; 5 -кріплення термосифона; 6 – транспортер; 7 – гайка; 8 - регулятор напруги; 9 – вольтметр ; 10 – ваттметр; 11 – канал; 12 – дифузор; 13 – вентилятор; 14 – автотрансформатор; 15 – термопари; 16 – перемикач термопар; 17 – мілівольтметр

Основні наукові результати

Результати дослідження впливу кута нахилу на характеристики плоско-овального ТС з неповним поперечним оребренням

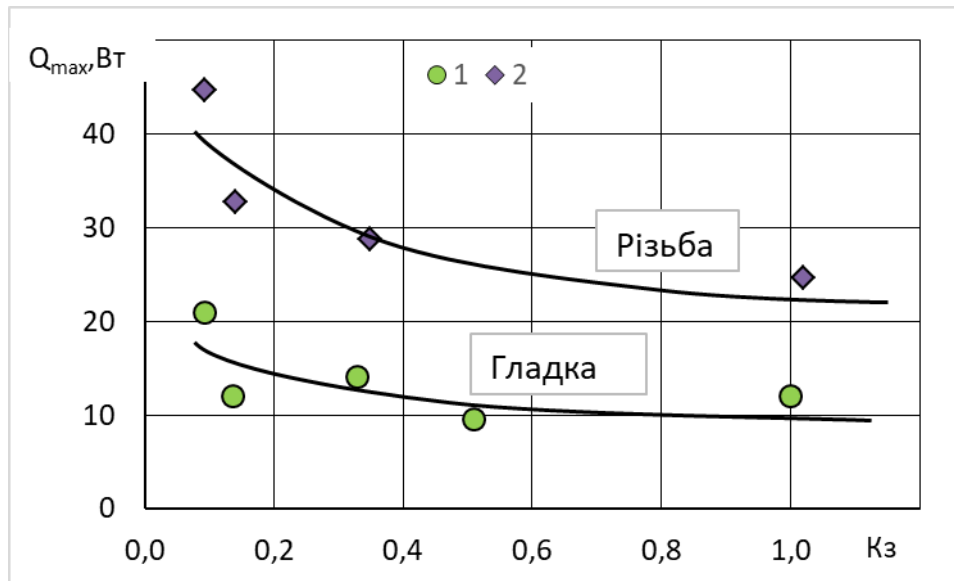


Залежність термічного опору термосифона від кута нахилу для $L_{3H} = 300$ мм та $Q = 1100$ Вт

В діапазоні високих теплових потужностей 700...1100 Вт термічний опір досліджених ТС з водою в якості теплоносія практично не залежить від кута нахилу і знаходиться в діапазоні 0,022...0,048 К/Вт. Такі властивості відкривають перспективи застосування подібних ТС для утилізації теплоти високотемпературних викидів в промисловості та енергетиці, причому навіть в тих випадках, де необхідно розташовувати ТС під певним кутом.

Основні наукові результати

Результати дослідження круглих ТС з внутрішніми інтенсифікаторами теплообміну

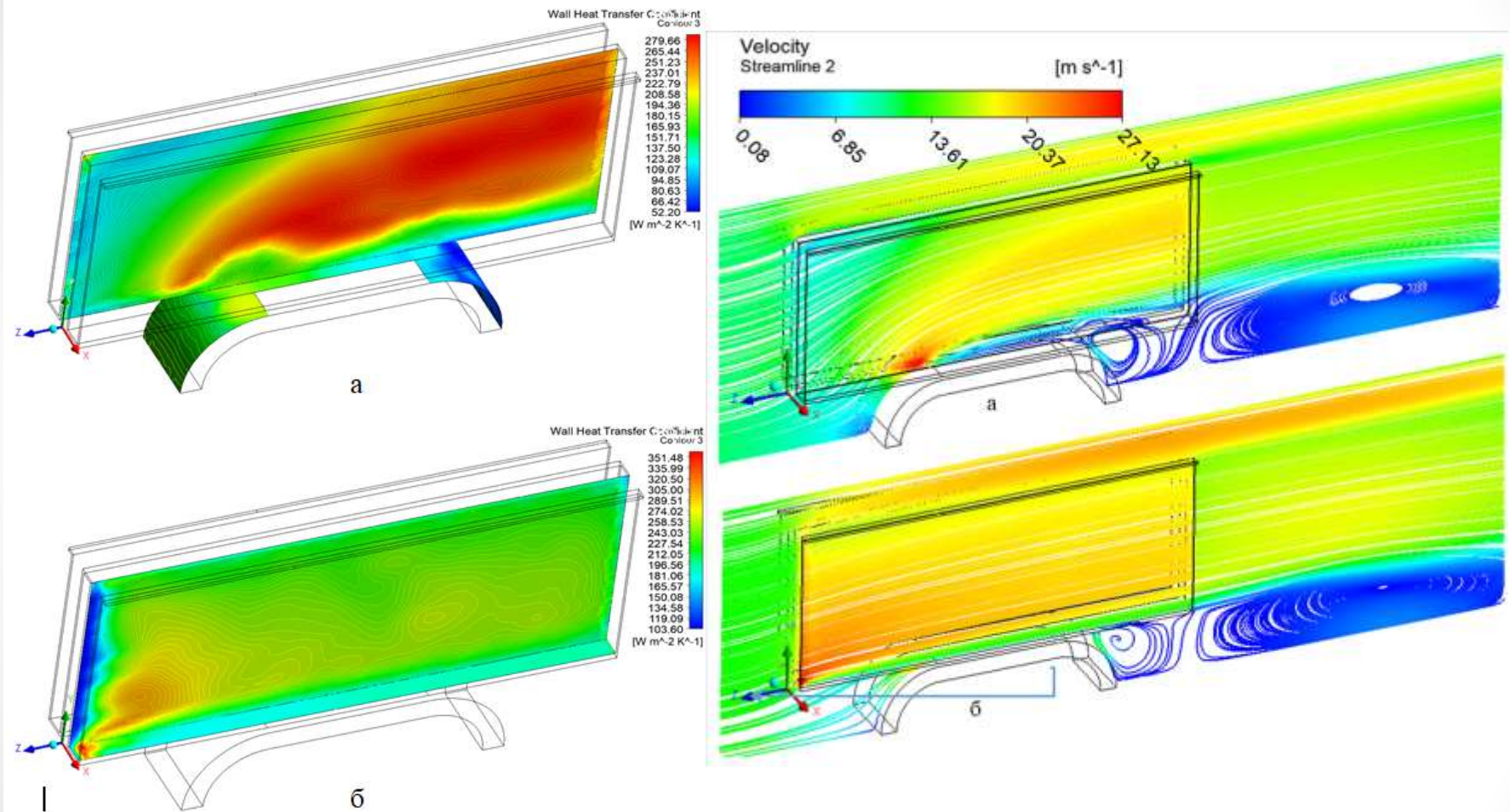


Вплив коефіцієнта заповнення на максимальні теплові потоки в залежності від стану поверхні у зоні нагріву термосифонів

Наявність інтенсифікаторів теплообміну у вигляді різьби у ЗН збільшує максимальні теплові потоки ТС практично у два рази у порівнянні із полірованою поверхнею ЗН. Таким чином, застосування ТС з інтенсифікаторами теплообміну в ЗН відкриває можливість до збільшення теплової потужності ТОП-утилізаторів без збільшення кількості ТС.

Основні наукові результати

Результати CFD-моделювання зовнішнього теплообміну ТС

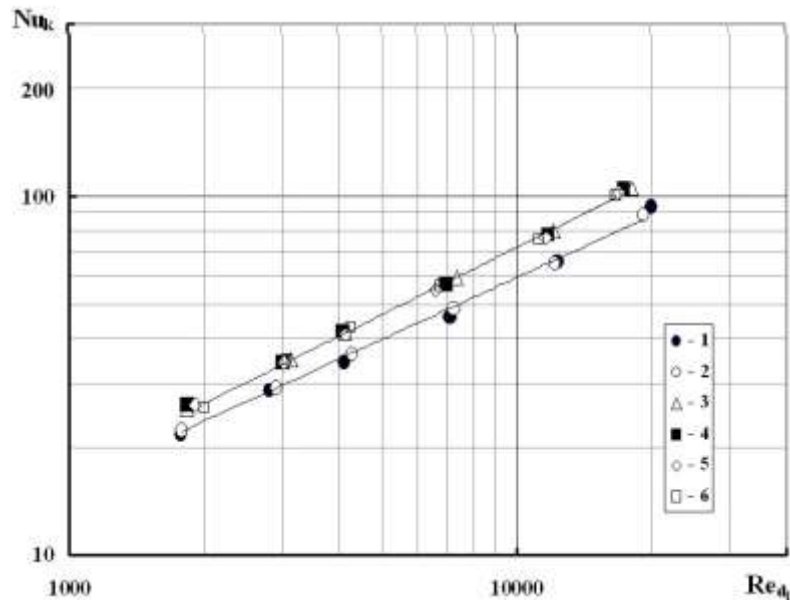


Розподіл локальних коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні стінок «каналу А» (а) та «каналу Б» (б) при тепловому навантаженні 200 Вт для $Re_{d1} = 25 \cdot 10^3$

Траекторії руху частинок потоку в центральному перерізі міжреберного «каналу А» (а) та «каналу Б» (б) при $Re_{d1} = 25 \cdot 10^3$

Основні наукові результати

Результати дослідження теплообміну та аеродинаміки на макеті ТОП



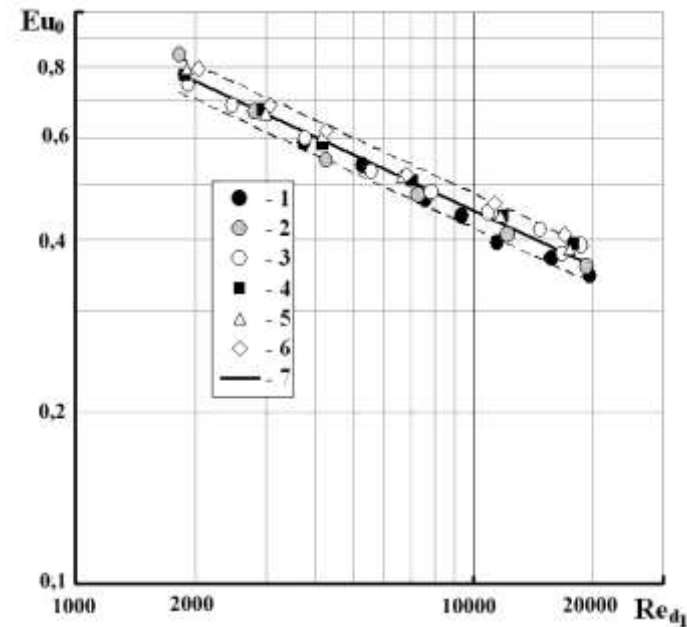
1 – поодинокий ряд; 2 – дворядний пакет ТС-калориметр у 1-му ряді;
 3 – 3-ох рядний, ТС-калориметр у 2-му ряді; 4 – 4-х рядний, ТС-калориметр у 3-му ряді; 5 – 5-ти рядний, ТС-калориметр у 4-му ряді; 6 – 6-ти рядний, ТС-калориметр у 5-му ряді
 Результати дослідження тепловіддачі

Узагальнююча залежність

$$Nu_k = 0,23 \cdot C_z \cdot Re^{0,624},$$

де $C_z = 3,23 z_2^{0,021} - 2,38$

z_2 – кількість поперечних рядів



1-6 – 1-одно рядний пакет; 2 – 2 рядний; 3- 3-х рядний; 4 – 4-х рядний;
 5 – 5-ти рядний; 6 – 6-ти рядний; 7 – розрахункова крива

Результати дослідження тепловіддачі

Узагальнююча залежність

$$Eu_0 = 8,8 \cdot Re_{d1}^{-0,323}$$

Основні практичні результати

- Запропоновано нову ефективну конструкцію ТС плоско-овального профілю з неповним поперечним гофрованим оребренням та теплоносієм R134a, призначених для використання в ТОП-утилізаторах теплоти вентиляційного повітря, які мають на 35...92% нижчий термічний опір і передають на 29...46% більші теплові потоки, ніж ТС з близькими геометричними характеристиками і тим же теплоносієм, досліджені іншими авторами. Запропоновані ТС також можуть бути використані і в інших теплообмінних апаратах типу газ-газ.
- Запропоновано нову ефективну конструкцію ТОП-утилізатора теплоти вентиляційного повітря на основі вищезазначених ТС та створено його експериментальний макет.
- Розроблено рекомендації щодо проектування теплообмінних пристроїв-утилізаторів на плоско-овальних термосифонах з неповним поперечним оребренням, які містять елементи розрахунку таких ТОП.
- Запропонований ТОП-утилізатор має: високу ефективність в широкому діапазоні перепаду температур між витяжним та припливним повітрям 10...28°C та при від'ємних температурах припливного повітря; високий ступінь розвинення зовнішньої поверхні та високу компактність; у 2,0...2,5 рази менший, ніж у зразків з круглих оребрених труб, аеродинамічний опір; практично ідеальний термічний контакт між оребренням та несучою трубою; високу корозійну стійкість; відрізняється простотою технології виготовлення та може використовуватись в широкому діапазоні теплових потужностей.

Порівняльна таблиця показників

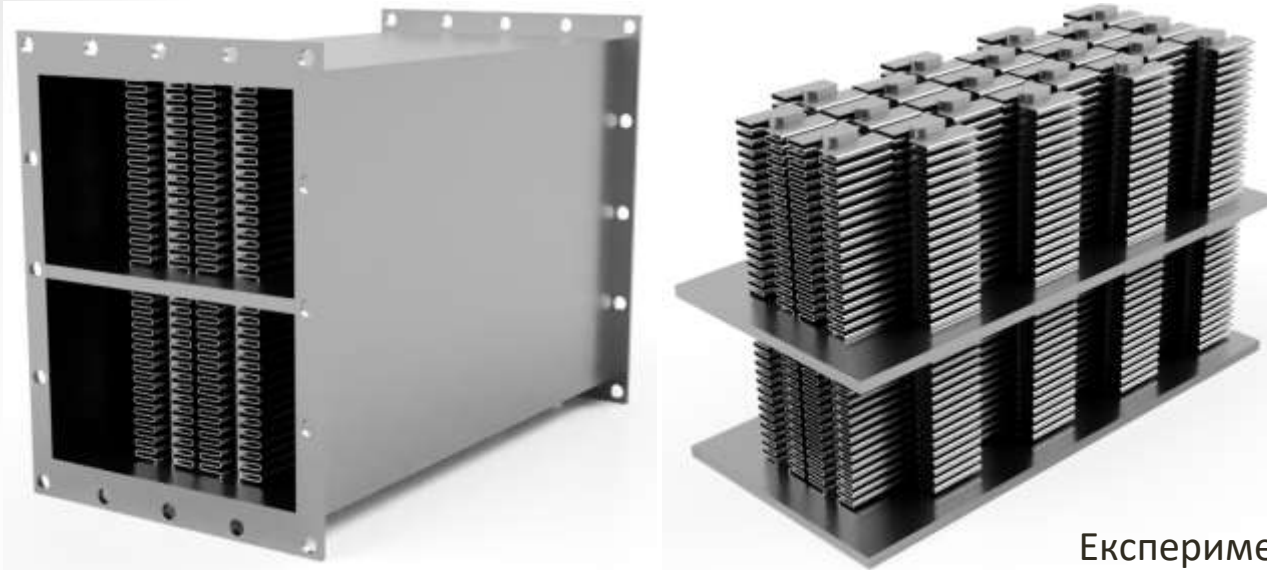
№ з/п	Назва формального показника	Плановане значення	Фактичне значення
1	Опубліковано статті у наукових журналах, що входять до наукометричних баз даних WoS та/або Scopus, або публікації у виданнях, які містять інформацію, що становить державну таємницю для проектів оборонного і подвійного призначення, кількість	9	21
2	Опубліковано за темою проекту статті у фахових виданнях України категорії «Б», статті у періодичних закордонних фахових виданнях, що мають ISSN, а також англomовні тези доповідей у матеріалах міжнародних конференцій, кількість	10	14
3	Отримано охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності (у тому числі свідоцтва на реєстрацію авторського права на твір, патентів на винахід)		
	- патенти на винахід, кількість	1	0
	- патенти на корисну модель, кількість	3	3
	- свідоцтва на авторський твір, патент на промисловий зразок, кількість	-	-
4	Представлено науково-практичні результати проекту на міжнародних комунікативних форумах, всеукраїнських та регіональних науково-технічних/промислових виставкових заходах, в мережі підприємств, що підтверджується відповідним сертифікатом чи посиланням на електронну версію заходу/матеріалів/каталогів, кількість	4	14
5	Укладено господарчі договори, продані ліцензії, отримано грантові угоди як впровадження наукових або науково-практичних результатів проекту, відсоток від загальної суми вартості проекту (Підтвердження довідкою з бухгалтерської служби за формою у Додатку 2)	60%	159%
6	Отримано акти впровадження результатів реалізації проектів у господарську практику органів державної влади, наукоємних підприємств, приватних компаній (на договірній основі) тощо, кількість	3	2
7	Нові знання, призначені для створення нових або вдосконалення існуючих (вказати одне значення, непотрібне викреслити):		
	- матеріалів, продуктів, пристроїв, систем, технологій - як завершене комплексне рішення	ТАК	ТАК
	- матеріалів, продуктів, пристроїв, систем, технологій - як ключовий складовий елемент/-и рішення вищого рівня (надсистеми)	-	-
	- конкретні пропозиції щодо виконання актуальних науково-технічних та суспільних завдань	-	-
8	Захист дисертацій PhD	3	3

Виконання госпдоговірної тематики за час виконання проєкту

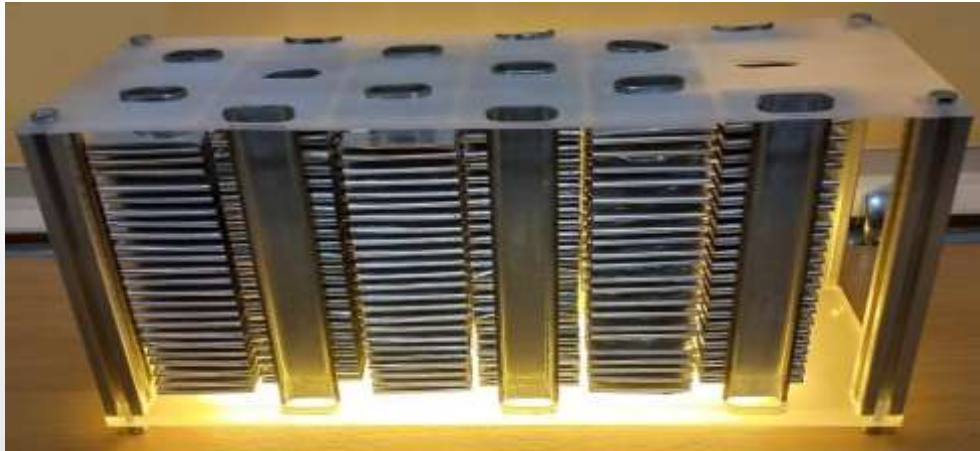
№ з/п	Назва предмету договору/угоди	№ договору	Дата укладання договору	Термін дії договору	Фактичний обсяг фінансування за 2022-2023 рр., тис. грн
1	Розвиток теплофізичних та конструктивно-технологічних основ підвищення ефективності охолодження приймально-передавальних модулів радіолокаційних станцій	Грант Національного фонду досліджень України № 2020.02/0357	11.20	11.23	2144,9
2	«Розкриття трансформаційного потенціалу українських університетів для розбудови кліматично нейтральних міст» (Unlocking the transformative potential of Ukrainian universities towards climate neutral and sustainable cities) за грантової підтримки програми Еразмус+KA2	Partnership Agreement to Grant Agreement 101083099 – UNICITIES ERASMUS-EDU-2022-CBHE	01.01.23.	31.12.23.	800
Всього					2944,9

Інноваційна складова

Створено експериментальний макет теплообмінного пристрою-утилізатора



3-D моделі теплообмінника та пакету термосифонів



Експериментальний макет теплообмінника

Експериментальний макет та зразки теплообмінних поверхонь і ТС було представлено на 12 Міжнародному фестивалі інноваційних проектів «**Sikorsky Challenge-2023**», 24-27 жовтня, 2023, Україна, м. Київ. (Проект №159. Нові вискоефективні розвинуті теплообмінні поверхні багатоцільового призначення), де він здобув **перемогу в номінації «Практична готовність до серійного виробництва»**

Охорона об'єктів права інтелектуальної власності

№ з/п	Повні дані про охоронні документи
1.	Патент України на корисну модель № 151865. Ребриста теплообмінна поверхня // Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” / <u>Є.М. Письменний, О.П. Ніщик, О.М. Терех, О.І. Руденко, Є.С. Алексеїк</u> . – 5 с.; Опубл.: 21.09.2022. Бюл. №38. Заявка № u202201904 від 06.06.2022.
2	Патент України на корисну модель № 152964. Спосіб випробування труби на міцність та щільність // “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” / <u>Є.М. Письменний, О.І. Руденко, О.П. Ніщик, О.М. Терех, , Є.С. Алексеїк</u> ; Опубл.: 03.05.2023. Бюл. №18. Заявка № u202203823 від 13.10.2022.
3	Патент України на корисну модель № 154428. Спосіб закріплення труби в отворі трубної дошки // Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” / <u>Є.М. Письменний, О.І. Руденко, О.П. Ніщик, О.М. Терех, , Є.С. Алексеїк, Л.В. Ліпницький</u> . – 4 с.; Опубл.: 15.11.2023. Бюл. №46. Заявка № u202301116 від 17.03.2023.

Ступінь готовності розробки до виходу на ринок

Розробка	Рівень готовності
Плоско-овальні труби з неповним поперечним оребренням	TRL6
Плоско-овальні термосифони з неповним поперечним оребренням	TRL4
Теплообмінний пристрій на плоско-овальних термосифонах з неповним поперечним оребренням	TRL4

Перспективи розвитку проєкту

- Покращення теплопередавальних характеристик ТС за рахунок використання інтенсифікаторів теплообміну або інших модифікацій внутрішньої поверхні в зонах нагріву та конденсації, що дозволить збільшити потужність ТОП без збільшення кількості ТС
- Пошук нових способів інтенсифікації зовнішнього теплообміну пакетів ТС, що дозволить зменшити масогабаритні показники ТОП без збільшення аеродинамічного опору та зменшення теплової потужності (а можливо, навіть, і з покращенням цих характеристик)
- Розширення діапазону застосування запропонованих ТОП за температурами та потужністю за рахунок застосування інших теплоносіїв в ТС.
- Зменшення маси та термічного опору ТС за рахунок застосування корпусів із матеріалів з меншою масою та вищою теплопровідністю.
- Дослідження впливу відносного розміру плоско-овального профілю корпусу ТС на його теплопередавальні характеристики.