

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

### **Creation of thermophysical bases of design of heat exchange devices on two-phase heat transfer elements for energy saving in ventilation systems of buildings**

1. **Номер державної реєстрації:** 0122U001557.
2. **Науковий керівник :** д.т.н., проф., Письменний Євген Миколайович  
doctor of technical sciences, prof. Pysmennyi Yevhen Mykolaiovych
3. **Суть розробки, основні результати.**

Розроблено та створено дослідні зразки плоско-овальних термосифонів (ТС) з неповним поперечним прямокутним та гофрованим оребренням, а також зразки круглих ТС з внутрішніми інтенсифікаторами теплообміну в зоні нагріву (ЗН). Вони призначені для роботи в теплообмінних пристроях (ТОП) утилізаторах теплоти вентиляційного повітря. Було показано, що найбільш оптимальним теплоносієм для ТС, що працюють в умовах, характерних для вентиляційних систем, з точки зору температури кипіння та безпечності використання є фреон R134a. При цьому найбільш оптимальними параметрами зовнішнього оребрення з точки зору поєднання високих теплоаеродинамічних характеристик та мінімальної маси поверхні теплообміну є: довжина ребра – 50 мм, висота ребра – 20 мм, товщина ребра – 0,3 мм, крок ребер – 3 мм. Експериментальні дослідження показали, що створені ТС здатні передавати до 200...220 Вт теплової енергії та мають термічний опір 0,05...0,07 К/Вт. При цьому термічний опір запропонованих ТС на 35...92% нижче, а переданий тепловий потік на 29...46% вищий, ніж у описаних в літературі аналогів. Ці ТС можуть використовуватись в діапазоні швидкостей потоків набігаючого повітря від 1,8 м/с до 20 м/с при перепаді температур між припливним та витяжним повітрям 10...28°C, а також при від'ємних температурах припливного повітря. Отримані характеристики роблять запропоновані ТС привабливими для використання в якості основним теплопередавальних елементів ТОП-утилізаторів. Було експериментально показано, що збільшення довжини ЗН в 3 рази із одночасним зменшення коефіцієнта заправки (КЗ) теж в 3 рази призводить до зниження його термічного опору в 1,3...2 рази. Тому для використання в ТОП-утилізаторах рекомендується застосовувати ТС із довжиною ЗН 150 мм (співвідношення довжин ЗН та зони конденсації 1:1) та КЗ 58%. Також було з'ясовано, що застосування внутрішніх інтенсифікаторів теплообміну в ЗН у вигляді різьби призводить до збільшення переданого теплового потоку в 2 рази в порівнянні із гладкою поверхнею. Це відкриває можливість до збільшення теплової потужності ТОП-утилізаторів без збільшення кількості ТС. Було отримано емпіричні залежності для розрахунку інтенсивності тепловіддачі в ЗН плоско-овальних ТС з фреоном R134a в якості теплоносія. Також було модифіковано існуючу методику розрахунку термічного опору ТС з метою її пристосування до визначення термічного опору запропонованих ТС, призначених для застосування в ТОП-утилізаторах теплоти вентиляційного повітря. Було розроблено та створено експериментальний макет ТОП-утилізатора, який 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 аеродинамічний опір, ніж у зразків з круглих оребрених труб; практично ідеальний термічний контакт між оребренням та несучою трубою; високу корозійну стійкість; відрізняється простотою технології виготовлення та може використовуватись в широкому діапазоні теплових потужностей. На основі результатів експериментальних досліджень теплоаеродинамічних характеристик макета було запропоновано емпіричні залежності в безрозмірному вигляді, що дозволяють розрахувати інтенсивність його зовнішньої тепловіддачі та аеродинамічний опір. За результатами досліджень було розроблено та запропоновано рекомендації щодо

проектування ТОП-утилізаторів на плоско-овальних ТС з неповним поперечним оребренням.

Experimental samples of flat-oval thermosyphons (TS) with partial transverse rectangular and corrugated finning and samples of round TS with inner intensifiers of heat transfer in evaporation section (ES) were developed and fabricated. They are intended for functioning in heat exchangers (HE) utilizers of heat wastes in ventilation systems. It was shown, that freon R134a is the most optimal heat carrier for TS functioning in conditions close to these in ventilation systems from the point of boiling temperature and safety of application. The most optimal parameters of outer finning from the point of combination of high heat-aerodynamic characteristics and minimal weight of heat transfer surface are: fin length – 50 mm, fin height – 20 mm, fin thickness – 0,3 mm, fin pitch – 3 mm. Experimental investigations have shown that designed TS are able to transfer up to 200...220 W of heat energy and their thermal resistance is in a range 0,05...0,07 K/W. Thermal resistance of proposed TS is on 35...92% lower and transferred heat power is on 29...46% higher than these of analogues described in literature. These TS can be applied at air velocity from 1,8 m/s to 20 m/s at temperature difference between supply and exhaust air 10...28°C and also at negative temperatures of supply air. Obtained characteristics of TS make them attractive for application as a main heat transfer elements of HE-utilizers. It was experimentally shown, that 3 times increasing of length of ES with simultaneously 3 times decreasing of filling ratio (FR) leads to 1,3...2 times decreasing of TS thermal resistance. That's why it was recommended to apply in HE-utilizers TS with ES length 150 mm (ratio between length of ES and condensation section 1:1) and FR equal to 58%. Also it was found out that application of inner intensifiers of heat transfer in ES in form of thread leads to 2 times increasing of transferred heat power when compare it to smooth surface. This makes it possible increasing of HE-utilizers heat power without increasing of TS quantity. Empirical correlations for heat transfer intensity in ES of flat-oval TS with freon R134a as the heat carrier were obtained. Also, known method of TS thermal resistance evaluation was modified in order to adapt it for calculation of thermal resistance of proposed TS intended for application in HE-utilizers of heat wastes in ventilation systems. Experimental mock-up of HE-utilizer was developed and fabricated. It has: high efficiency in wide range of temperature difference between supply and exhaust air 10...28°C and at negative temperatures of supply air; high grade of outer surface development and high compactness; 2...2,5 times lower aerodynamic drag than that of round finned tubes; close to ideal contact between finning and base tube; high corrosion resistance; simple manufacturing technology and can be applied at wide range of heat power. Empirical correlations in dimensionless form for calculation of outer heat transfer intensity and aerodynamic drag of the mock-up were proposed based on the results of experimental investigations. Recommendations on designing of HE-utilizers based on flat-oval TS with partial transverse finning were developed and proposed based on the results of the study.

#### 4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.

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.

## **5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Вперше в світовій практиці було запропоновано новітню конструкцію термосифонів плоско-овального профілю з неповним поперечним прямокутним та гофрованим оребренням. Основною відмінністю запропонованої конструкції є поєднання: плоско-овальної форми профілю труби, яка за рахунок своєї зручнообтічності забезпечує мінімальний аеродинамічний опір, неповного поперечного оребрення, яке за рахунок видалення частин ребра, що не приймають активної участі в теплообміні, забезпечує зменшення маси та металоємності теплообмінної поверхні і високу інтенсивність зовнішньої тепловіддачі, та замкненого випарно-конденсаційного циклу, який забезпечує ефективну передачу теплових потоків всередині термосифона. Крім того, корпуси запропонованої конструкції є композитними: стінка корпусу виготовлена зі сталі, зовнішня поверхня якої вкрита тонким шаром цинку, що забезпечує надійне приварювання до неї алюмінієвого гофрованого оребрення для створення практично ідеального термічного контакту. Також вперше запропоновано нову конструкцію теплообмінного пристрою-утилізатора теплоти вентиляційного повітря на основі плоско-овальних термосифонів з неповним поперечним гофрованим оребренням.

## **6. Економічна привабливість для просування на ринок**

Було розроблено теплофізичні засади проектування теплообмінних пристроїв на плоско-овальних двофазних термосифонах із зовнішнім оребренням для утилізації теплоти витяжного повітря будівель. Це сприяє пришвидшенню впровадження таких теплообмінних пристроїв на практиці. Зокрема, використання запропонованих теплообмінних пристроїв-утилізаторів у вентиляційних системах житлових будинків дозволяє суттєво знизити їх тепловтрати, як наслідок, знизується споживання теплової енергії, а отже і витрати населення на сплату послуг з теплопостачання. Це призведе до зниження соціальної напруженості, викликаній зростанням комунальних тарифів. Крім того широке впровадження запропонованих теплообмінних пристроїв в побуті, в промисловості та енергетиці дозволить знизити споживання викопного палива, що сприятиме покращенню екологічної ситуації в країні та зміцненню енергетичної незалежності нашої держави.

## **7. Потенційні користувачі.**

Потенційними користувачами можуть бути підприємства та організації, що займаються розробкою, виготовленням та впровадженням енергоефективних технологій та кліматичної техніки, а також підприємства, на яких висуваються підвищені вимоги до параметрів повітряного середовища, зокрема підприємства зі сфери атомної енергетики, наприклад: Інститут промислової екології, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, Чорнобильська АЕС, НАЕК «Енергоатом».

## **8. Стан готовності розробки:** лабораторний зразок, технологічний рівень готовності TRL4-TRL6.

## **9. Існуючі результати впровадження.**

Результати було впроваджено Інститутом проблем безпеки атомних електростанцій НАН України та Чорнобильською АЕС, що підтверджується актами впровадження.

## **10. Назва підрозділу, телефон, e-mail.**

Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики, науково-дослідна (експериментальна) лабораторія процесів в енергетичному обладнанні, кафедра атомної енергетики, тел.: 044-204-80-87; e-mail: [aes\\_kpi@ukr.net](mailto:aes_kpi@ukr.net)

## **11. Фото**



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд експериментальних зразків термосифонів

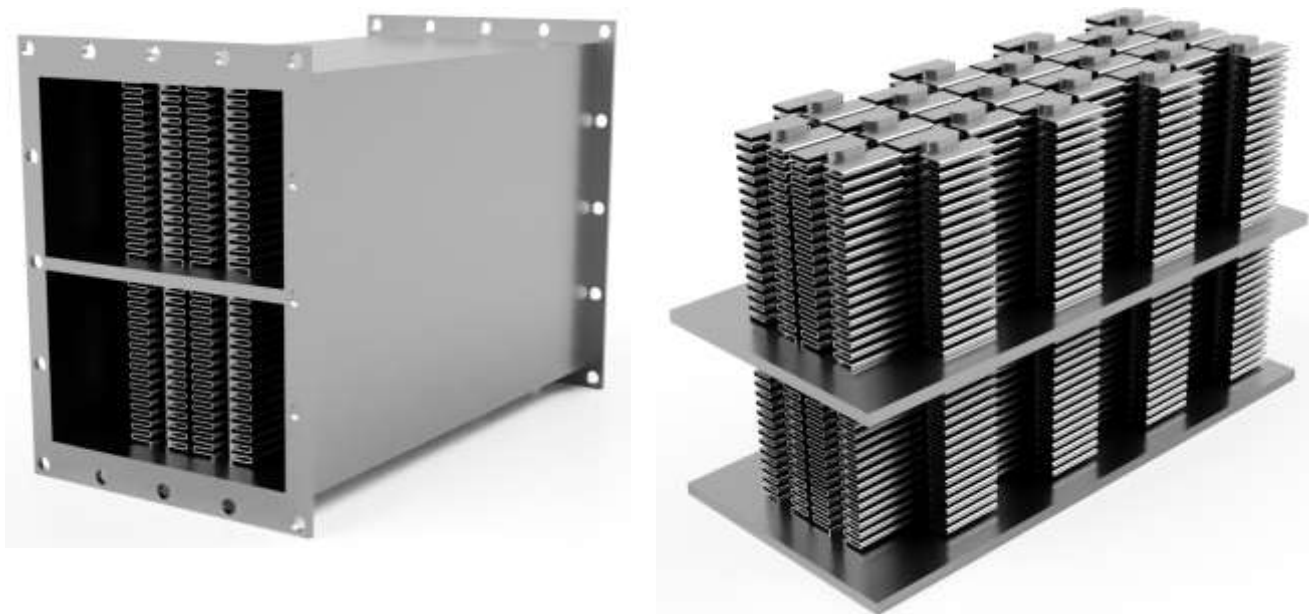


Рисунок 2 – Зовнішній вигляд 3-D моделі теплообмінного пристрою-утилізатора



Рисунок 3 – Зовнішній вигляд експериментального макета теплообмінного пристрою-утилізатора

## 12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання.

Монографії

1.	<u>Kravets V.Yu.</u> Heat transfer processes in miniature evaporation-condensation cooling systems. – K: Interservice, 2023. – 204 p.
2	<u>О.В. Баранюк, М.В. Воробйов, А.Ю. Рачинський</u> CFD-моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки засобами програмного комплексу: монографія. – К.: КПІ



Навчальні посібники

1.	Теплогідравлічні процеси в енергетичних установках. Розрахункова робота [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньо-професійною програмою «Атомні електричні станції», спеціальністю 143 «Атомна енергетика» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: <u>В.Ю. Кравець</u> , <u>Є.С. Алексеїк</u> , <u>О.С. Алексеїк</u> . – Електронні текстові дані (1 файл: 1,13 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 49 с.
2	CFD-моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки в каналах реактору типу ВВЕР. Навчальний посібник до виконання розрахунково-графічної роботи [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 143 «Атомна енергетика» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. <u>О.В. Баранюк</u> , <u>Є.С. Алексеїк</u> . – Електронні текстові дані (1 файл: 9,83 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 53 с.
3	Комп'ютерне моделювання енергетичних процесів і систем. Комп'ютерний практикум з дисципліни «Комп'ютерне моделювання процесів в енергетичному обладнанні» [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньою програмою «Інженерія і комп'ютерні технології теплоенергетичних систем» спеціальності 142 Енергетичне машинобудування / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: <u>О.В. Баранюк</u> , <u>Є.С. Алексеїк</u> . – Електронні текстові дані (1 файл: 41,93 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 101 с.
4	Системи автоматизованого проектування [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування» та 143 «Атомна енергетика» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: <u>О.В. Баранюк</u> , <u>А.Ю. Рачинський</u> . – Електронні текстові дані (1 файл 34,09 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 61 с.

Наукові статті

1	<u>Filonov V., Filonova Y., Dubyk Y., Pis'mennyi E.</u> Transfer matrix method for analysis of flow thermohydraulic characteristics with extremely nonlinear behavior of thermophysical properties using channel approach // International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 187, 2022, art. no. 122531. <a href="https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122531">https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122531</a>	Scopus
2	<u>Pysmennyy Y., Havrylko Y., Krukovskiy P., Starovit I., Diadiushko Y.</u> Development of Mathematical Software for Control of Ventilation Equipment in the New Safe Confinement // Nuclear and Radiation Safety, 2022, (2-94), pp. 36–43. <a href="https://doi.org/10.32918/nrs.2022.2(94).04">https://doi.org/10.32918/nrs.2022.2(94).04</a>	Scopus
3	<u>Rudenko A.I., Nishchik A.P., Otrokh E.A., Terekh A.M.</u> Influence of the Corrosion Process on Thermotechnical Characteristics of Heat Pipes of Low-Temperature Range // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2022, 95(1), pp. 206–212. <a href="https://doi.org/10.1007/s10891-022-02469-z">https://doi.org/10.1007/s10891-022-02469-z</a>	Scopus
4	<u>Kravets V., Konshin V., Hurov D., Vorobiov M., Shevel I.</u> Determining the influence of geometric factors and the type of heat carrier on the thermal resistance of miniature two-phase thermosyphons // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2022, 4(8 (118), pp 51–59. <a href="https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263180">https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263180</a>	Scopus
5	<u>Kravets V., Hurov D., Moraru V.</u> Improving the heat transfer characteristics of miniature two-phase thermosyphons with nanofluids based on Ukrainian natural aluminosilicates. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2023, 4(5 (124), pp. 25–33. <a href="https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286320">https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286320</a>	Scopus
6	<u>Nikolaenko, Y.E., Melnyk, R.S., Lipnitskiy, L.V.</u> et al. Study of the effect of tilt angle on the vaporization processes in a flat gravity heat pipe with a threaded evaporator. // J Therm Anal Calorim, 2023, 148, pp. 9167–9181. <a href="https://doi.org/10.1007/s10973-023-12303-0">https://doi.org/10.1007/s10973-023-12303-0</a>	Scopus

7	D.V. Pekur, <u>Yu.E. Nikolaenko</u> , <u>V.Yu. Kravets</u> , D.V. Kozak, V.M. Sorokin, T.Yu. Nikolaienko Comparison of thermal characteristics of three modifications of gravity heat pipe with threaded evaporator at different inclination angles // Thermal Science and Engineering Progress. – 2023. – 46. – Art. no 102219. <a href="https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102219">https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102219</a>	Scopus
8	T.A. Baranova, Yu.V. Zhukova, A D. Chorny, <u>A.M. Terekh</u> , <u>A.I. Rudenko</u> Convective heat transfer of heat sinks with partially cut plate fins and turning of their cut sections // Heat Transfer Research, 2023, Volume 54, Issue 8, pp. 17-28. <a href="https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2023045407">https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2023045407</a>	Scopus
9	<u>Алексеїк Є.С.</u> , <u>Кравець В.Ю.</u> Вплив витрати холодного теплоносія на теплопередавальні характеристики пульсаційної теплової труби для теплообмінного апарата. Наукові праці (Scientific Works), vol. 86, no. 1, 2022, pp 63-68. <a href="https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2405">https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2405</a>	Фах., кат. Б
10	<u>Є.С. Алексеїк</u> , <u>О.С. Алексеїк</u> , Конструкції теплообмінних апаратів на двофазних теплопередавальних елементах для утилізації теплоти повітря у вентиляційних системах: огляд, Наукові вісті КПП, 2022, № 1–2, с. 11–25. <a href="https://doi.org/10.20535/kpissn.2022.1-2.264595">https://doi.org/10.20535/kpissn.2022.1-2.264595</a>	Фах., кат. Б
11	<u>Баранюк О.В.</u> , <u>Конько Д.В.</u> , <u>Воробйов М.В.</u> Теплообмін та аеродинаміка CFD-моделі композиційної плоско-овальної труби з неповним гофрованим оребренням / Теплоенергетика. № 1, 2023 – С. 111 – 119. <a href="https://doi.org/10.15589/znp2023.1(490).14">https://doi.org/10.15589/znp2023.1(490).14</a>	Фах., кат. Б
12	<u>Баранюк О.В.</u> , <u>Воробйов М.В.</u> , <u>Алексеїк Є.С.</u> , <u>Мазуренко А.С.</u> CFD моделювання теплоаеродинамічних характеристик композиційної плоско-овальної труби з неповним гофрованим оребренням / Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях, № 1 ' 2023. – С. 10 – 117. <a href="https://doi.org/10.20998/2222-0631.2023.01.02">https://doi.org/10.20998/2222-0631.2023.01.02</a>	Фах., кат. Б
13	<u>Кулинич В.С.</u> , <u>Рогачов В.А.</u> , <u>Терех О.М.</u> Дослідження інтенсивності теплообміну та аеродинамічного опору всередині плоскої труби. / Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 2. С.85-94. <a href="https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2023.279675">https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2023.279675</a>	Фах., кат. Б
14	<u>Л.В. Ліпницький</u> , <u>Р.С. Мельник</u> , <u>Ю.Є. Ніколаєнко</u> , <u>В.Ю. Кравець</u> , <u>Д.В. Пекур</u> Вплив зміни форми гравітаційної теплової труби з різьбовим випарником на її теплопередавальні характеристики / Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2023. – № 1-2. – С. 27-33. <a href="http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2023.1-2.27">http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2023.1-2.27</a>	Фах., кат. Б
15	<u>Р.С. Мельник</u> , <u>Л.В. Ліпницький</u> , <u>Ю.Є. Ніколаєнко</u> , <u>В.Ю. Кравець</u> Візуалізація процесів пароутворення та теплові характеристики тонкої плоскої гравітаційної теплової труби з різьбовим випарником / Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2023. – № 3-4. – С. 31-39. <a href="http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2023.3-4.31">http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2023.3-4.31</a>	Фах., кат. Б
16	<u>Кравець В.Ю.</u> , <u>Морару В.Н.</u> , <u>Гуров Д.І.</u> Вплив різних факторів на теплопередавальні характеристики мініатюрних двофазних термосифонів з нанорідинами / Энерготехнології та ресурсозбереження. – 2022. - №4. – с. 50-61. <a href="http://dx.doi.org/10.33070/etars.4.2022.05">http://dx.doi.org/10.33070/etars.4.2022.05</a>	Фах., кат. Б

#### Дисертації

1.	<u>Мельник Роман Сергійович</u> , Вплив параметрів капілярної структури на інтенсивність тепловіддачі при кипінні в умовах капілярного транспорту та субатмосферних тисках, 144 – Теплоенергетика, науковий керівник: <u>Кравець Володимир Юрійович</u> , 2023, Київ, КПП ім. Ігоря Сікорського.
2	<u>Філонов Владислав Віталійович</u> , Прогнозування режимів погіршеного теплообміну в перспективних реакторах IV покоління з надкритичними параметрами теплоносія, 143 – Атомна енергетика, науковий керівник: <u>Письменний Євген Миколайович</u> , 2023, Київ,

	КПІ ім. Ігоря Сікорського.
3	Гуров Дмитро Ігорович, Процеси теплообміну в мініатюрних випарно-конденсаційних системах з нанорідинами, 144 – Теплоенергетика, науковий керівник: <u>Кравець Володимир Юрійович</u> , дисертація подана до захисту, захист планується на 08.01.2024. Наказ про створення разової СВР: <a href="https://rada.kpi.ua/node/1810">https://rada.kpi.ua/node/1810</a>

13. **Ключові слова:** теплообмінний пристрій-утилізатор, вентиляційна система, термосифон, плоско-овальний профіль, неповне поперечне оребрення, термічний опір, коефіцієнт тепловіддачі, аеродинамічний опір