

Розробка та дослідження засобів тепловідведення від передавальних модулів підвищеної потужності для антенних систем перспективних РЛС.

Разработка и исследование средств теплоотвода от передающих модулей повышенной мощности для антенных систем перспективных РЛС.

Development and research of heat dissipation means from high power transmission modules for antenna systems of perspective radars.

1. Номер державної реєстрації - № 0118U003685,

2. Науковий керівник - д.т.н., старший науковий співробітник Ніколаєнко Ю.Є., Николаенко Ю.Е., Nikolaenko Yurii E.,

3. Суть розробки, основні результати:

(укр.) Близько 70-75 % енергії, що споживається в елементах передавальних модулів (ПМ) активних фазованих антенних решіток (АФАР), виділяється у вигляді теплоти, яка при недостатній ефективності тепловідведення може призвести до перегріву елементної бази та зниження надійності роботи РЛС. Забезпечення нормального теплового режиму ПМ АФАР ускладнюється через високу щільність упаковки електронних компонентів всередині ПМ. Перехід на нову, більш потужну, елементну базу призводить до того, що існуючі повітряні системи охолодження не можуть забезпечити нормальний тепловий режим активних елементів базових конструкцій ПМ з конвективним теплообмінником і потребують застосування нових, більш ефективних, засобів тепловідведення.

В даній роботі розроблено та досліджено нові засоби тепловідведення від активних елементів ПМ АФАР, що працюють за різними видами теплообміну (випарувально-конденсаційного та конвективного), комбінування яких в одному корпусі ПМ дозволило розосередити локальні потужні теплові потоки від активних елементів ПМ на більшу поверхню конвективного теплообмінника без збільшення його габаритних розмірів і знизити температуру в місцях встановлення активних елементів до 20,3 °С при збільшенні потужності елементів вдвічі, порівняно з базовим варіантом ПМ.

В результаті роботи розроблено ескізу конструкторську документацію на запропоновані засоби тепловідведення, виготовлено експериментальні зразки та виконано комп'ютерне і експериментальне моделювання їхніх теплових характеристик в широкому діапазоні зміни потужності елементів, витрати та температури охолоджуючого повітря, кутів нахилу відносно горизонту.

На основі отриманих графічних залежностей теплових характеристик комбінованого конвективного теплообмінника з вбудованими тепловими трубами від потужності імітаторів активних елементів ПМ та витрати охолоджуючого повітряного потоку розроблено інженерну методику розрахунку та рекомендації щодо використання отриманих результатів.

(рос.) Около 70-75% потребляемой в элементах передающих модулей (ПМ) активных фазированных антенных решеток (АФАР) энергии выделяется в виде теплоты, которая при недостаточной эффективности теплоотвода может привести к перегреву элементной базы и снижению надежности работы РЛС. Обеспечение нормального теплового режима ПМ АФАР осложняется высокой плотностью упаковки электронных компонентов внутри ПМ. Переход на новую, более мощную, элементную базу приводит к тому, что существующие воздушные системы охлаждения не могут обеспечить нормальный тепловой режим активных элементов базовых конструкций ПМ с конвективным теплообменником и требуют применения новых, более эффективных, средств теплоотвода.

В данной работе разработаны и исследованы новые средства теплоотвода от активных элементов ПМ АФАР, работающие с различными видами теплообмена (испарительно-

конденсационным и конвективным), комбинирование которых в одном корпусе ПМ позволило рассредоточить локальные мощные тепловые потоки от активных элементов ПМ на большую поверхность конвективного теплообменника без увеличения его габаритных размеров и снизить температуру в местах установки активных элементов до 20,3 °С при увеличении мощности элементов вдвое по сравнению с базовым вариантом ПМ.

В результате работы разработана эскизная конструкторская документация на предложенные средства теплоотвода, изготовлены экспериментальные образцы и выполнено компьютерное и экспериментальное моделирование их тепловых характеристик в широком диапазоне изменения мощности элементов, расхода и температуры охлаждающего воздуха, углов наклона относительно горизонта).

На основе полученных графических зависимостей тепловых характеристик комбинированного конвективного теплообменника со встроенными тепловыми трубами от мощности имитаторов активных элементов ПМ и расхода охлаждающего воздушного потока разработана инженерная методика расчета и рекомендации по использованию полученных результатов.

(eng.) About 70 to 75% of the energy consumed by the elements of transmit modules (TM) for active phased antenna arrays (APAA) is converted into heat. This heat, if dissipated inefficiently, can cause the element base to overheat, thus reducing the reliability of the radar. The task of ensuring the normal thermal regime of TMs for APAAs is complicated by the large-scale integration of electronic components inside the TMs. The transition toward a new, more high-power, element base leads to the fact that currently available air cooling systems cannot provide a normal thermal regime of the active elements of basic TM designs with convective heat exchangers and require new and more efficient heat dissipation methods to be developed.

In this work, we develop and study new devices for dissipation of heat from the active elements of TMs for APAAs. These new designs combine different types of heat transfer (evaporation-condensation and convective) in one TM casing. This allows local powerful heat fluxes to be dispersed from the active elements of the TM to a larger convective heat transfer surface without increasing the overall dimensions of the device. The proposed design also makes it possible to reduce the temperature in the places of installation of active elements to 20.3°C for the elements twice as powerful as those of basic TM designs.

The study allowed developing design documentation for the proposed heat transfer devices, manufacturing prototypes and performing computer and experimental simulation of their thermal characteristics in a wide range of element power, flow rate, cooling air temperature, and tilt angles to the horizon.

The obtained curves for the dependence of thermal characteristics of the combined convective heat exchanger with built-in heat pipes on the power of simulators of active TM elements and the flow rate of cooling air allowed developing an engineering calculation method and recommendations for using the obtained results.

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

- Патент України на корисну модель № 130237, МПК (2006.01) F28D 15/02. Гравітаційна теплова труба // Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" / Ю.Є. Ніколаєнко, М.М. Котов. – Опубл. 26.11.2018 р. Бюл. № 22.

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=253250&chapter=description>

- Патент України на корисну модель № 133241, МПК (2006.01) F28D 15/02, B23P 15/22. Спосіб виготовлення гравітаційної теплової труби // Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" / Ю.Є. Ніколаєнко, В.А. Рогачов. – Опубл. 25.03.2019. Бюл. № 6.

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=257036&chapter=description>

- Патент України на корисну модель № 139015, МПК (2019.01) H01Q 21/00, H05K 7/20 (2006.01), F28D 15/02 (2006.01). Корпус модуля активної фазованої антенної решітки // Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” / Ю.Є. Ніколаєнко, Є.М. Письменний, Ф.Ф. Дубровка, С.А. Рева, О.В. Баранюк, В.А. Рогачов, В.Ю. Кравець, О.Я. Паламарчук. – Опубл. 10.12.2019. Бюл. № 23. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=264354&chapter=description>

- Патент України на корисну модель № 140438, МПК F28D 15/02 (2006.01). Двофазний теплопередавальний пристрій // Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” / Ю.Є. Ніколаєнко. – Опубл. 25.02.2020. Бюл. № 4.

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=266191&chapter=description>

- Патент України на корисну модель № 145511, МПК (2020.01) H01Q 21/00, F28D 15/02 (2006.01), H05K 7/20 (2006.01). Корпус модуля антенної решітки // Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” / Ю.Є. Ніколаєнко, Д.В. Козак, О.В. Авдєєва, С.А. Рева, Б.М. Рассамакін, Р.С. Мельник, Я.В. Некрашевич. – Опубл. 10.12.2020. Бюл. № 23.

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=273013&chapter=description>

5. Порівняння зі світовими аналогами.

В світовій практиці найбільш ефективними, але й найбільш дорогими, засобами тепловідведення від активних елементів ПМ АФАР вважаються рідинні системи охолодження з вбудованими в конструкцію ПМ рідинними каналами [див., наприклад, Murat Parlak, Murat Yaban. Thermal solution of high flux phased radar antenna for military application // Proceedings of the ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems InterPACK2015. – 2015. – 7 p, doi: 10.1115/IPACK2015-48055 та Harald Iwe, Ottar Opland, Jan Rune Nilssen, Fredrik Gulbrandsen, Asgeir Nysæter. Packaging and Cooling of an X-band Digital Array Radar T/R Module // 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf). – 2017. – P. 1651-1656, doi: 10.1109/RADAR.2017.7944472]. Але таке рішення призводить до збільшення гідравлічного опору рідинної магістралі та збільшення енергетичних витрат на прокачування теплоносія. Крім того, створюються значні складності з підключенням ПМ до рідинної магістралі при щільній компоновці ПМ на полотні антенної решітки та існують ризики протікання теплоносія.

На відміну від відомих технічних рішень, в даній роботі запропоновано та реалізовано інший, більш економічний, шлях – підвищення ефективності тепловідведення в більш простих та дешевих повітряних системах охолодження за рахунок вбудовування в корпус ПМ високоефективних теплопередавальних пристроїв – теплових труб, теплопровідність яких перевищує теплопровідність металів в десятки та сотні разів. В результаті виконання роботи розроблено нову, більш ефективну, комбіновану повітряну систему відведення теплоти від ПМ підвищеної потужності, суть якої полягає в вбудовування в корпус ПМ теплових труб, які розосереджують локальний тепловий потік від потужних охолоджуваних елементів на всю поверхню повітряного конвективного теплообмінника, що дозволяє знизити температуру в місцях встановлення активних елементів до 20,3 °С при підвищенні потужності елементів вдвічі порівняно з базовим варіантом ПМ (без ТТ).

Таким чином, з економічної точки зору, отримані результати перевищують світовий рівень.

6. Економічна привабливість розробки для просування на ринок.

Застосування розроблених засобів тепловідведення від передавальних модулів активних фазованих антенних решіток дозволяє вдвічі підвищити потужність вихідних підсилювачів передавальних модулів та потужність сигналів випромінювання практично без збільшення масо-габаритних характеристик модуля. Зазначені переваги одержаних результатів дозволяють отримати підвищені тактико-технічні характеристики РЛС шляхом модернізації існуючих варіантів антенних систем, що значно дешевше, ніж розробляти нові АФАР. Оскільки сучасні АФАР можуть налічувати в своєму складі, в залежності від призначення та складності, до декількох тисяч ПМ, то вартість однієї АФАР, по літературним даним, може сягати 2 млн. дол. США. Тому модернізація АФАР обійдеться потенційному замовнику значно дешевше, ніж розробляти нову АФАР.

Конкретні витрати, що необхідні для просування розробки на ринок (проведення дослідно-конструкторських робіт, маркетингових досліджень, виготовлення дослідних партій та їх випробувань, підготовки виробництва тощо), оцінити на даний час не представляється можливим, оскільки відсутні відповідні дані щодо реальних потреб замовника.

7. Потенційні користувачі.

Потенційними галузями застосування результатів роботи є – галузі, в яких розробляються радіолокаційні станції (в т.ч. підприємства оборонно-промислового комплексу), спеціальне машинобудування, електроніка, приладобудування, промислова теплотехніка, світлотехніка тощо.

Створена в даній науково-дослідній роботі науково-технічна продукція є основою для подальшого проведення дослідно-конструкторських робіт з розробки відповідної робочої конструкторсько-технологічної документації на передавальні модулі з тепловими трубами та для інших сфер застосування.

Потенційними користувачами результатів роботи можуть бути науково-дослідні, конструкторські і проектні організації України та інших країн, приватні підприємства, які розробляють радіолокаційну техніку з активними фазованими антенними решітками, світлодіодні освітлювальні прилади для освітлення приміщень та потужну електронну апаратуру для інших сфер застосування.

8. Стан готовності розробки.

Розроблено ескізу конструкторську документацію ЕС.2114.01.00, ЕС.2114.02.00, ЕС.2114.03.00, ЕС.2114.04, ЕС.2114.05.00 на розроблені засоби тепловідведення на основі ТТ та на імітатор теплового потоку охолоджуваних елементів, яку може бути передано до спеціалізованих підприємств.

Готові до передачі зацікавленим підприємствам результати комп'ютерного та експериментального моделювання теплових характеристик засобів тепловідведення базового варіанта ПМ (без ТТ) та розробленого (з ТТ).

КПІ ім. Ігоря Сікорського, як власник отриманих патентів, готовий для укладання ліцензійних угод на право використання запатентованих технічних рішень.

Розроблено методику інженерного розрахунку та рекомендацій щодо використання отриманих результатів досліджень.

9. Існуючі результати впровадження.

З метою подальшого розвитку досліджень в зазначеному напрямку та оцінки можливості використання отриманих результатів роботи укладено договір про науково-технічну співпрацю з Казенним підприємством «Науково-виробничий комплекс «Іскра», м. Запоріжжя (від 12.11.2018 р. № 16/35-юр), яке звернулося з проханням до КПІ ім. Ігоря Сікорського передати результати досліджень (лист від 16.11.2020 р. № 860/176/186).

З використанням результатів даної роботи було розроблено запити на конкурси Національного Фонду Досліджень України та Міністерства освіти і науки України та отримано грант Національного Фонду Досліджень України на 2020-2022 рр. (проект № 2020.02/0357) на загальну суму 5 821 тис. грн., в т.ч. на 2020 р. – 707 тис. грн.

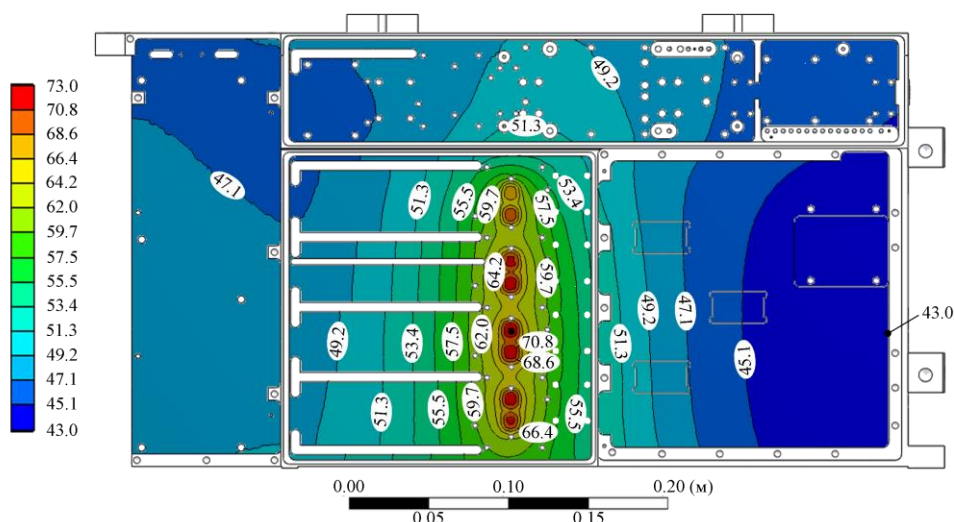
Опубліковано заяву про відкриту ліцензію на використання патенту України № 139015 на корисну модель «Корпус модуля активної фазованої антенної решітки».

Результати досліджень впроваджено в навчальний процес на кафедрі АЕС і ІТФ теплоенергетичного факультету (акт від 10.12.2020 р.).

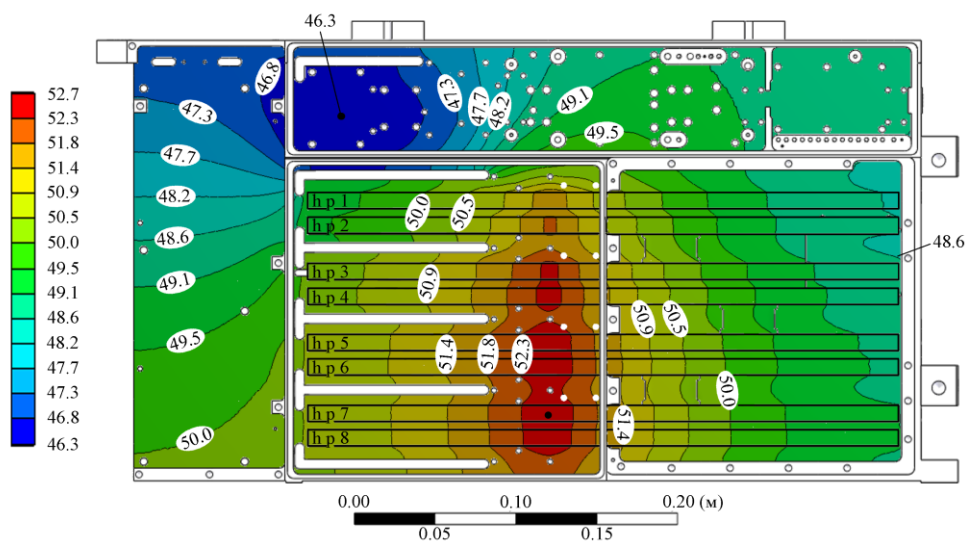
10. Назва підрозділу, телефон, e-mail:

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (КПІ ім. Ігоря Сікорського), теплоенергетичний факультет (ТЕФ), кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики (АЕС і ІТФ), робочий тел./факс: (044) 204-95-26, e-mail: y.nikolaenko@kpi.ua

11. Фото розробки.



Розподіл температури по монтажній поверхні базового варіанту ПМ (без ТТ) при швидкості повітря $W = 9$ м/с; $t_{\text{макс}} = 73$ °С, $\Delta t = 30$ °С.



Розподіл температури по монтажній поверхні нового варіанту ПМ з ТТ при швидкості повітря $W = 9$ м/с; hr 1 ... hr 8 - номери ТТ, $t_{\text{макс}} = 52,7$ °С (зменшення на 20,3 °С), $\Delta t = 6,4$ °С (зменшення на 23,6 °С).



Експериментальний зразок конвективного теплообмінника з вбудованою тепловою трубою (1/4 частина корпусу ПМ)

12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання:

1. Boris I. Basok, Yurii E. Nikolaenko, Roman S. Melnyk. Thermal Management of Electronic Devices Using Heat Pipes (Capter 3), in: Yuwen Zhang (Ed.), Heat Pipes: Design, Application and Technology, Nova Science Publishers, Inc., NY. USA, 2018, pp. 203–253. ISBN: 978-1-53613-908-2. . (3,8 д.а.). *(Розділ в англomовній монографії)*

2. А.А. Шаповал. Реалии и перспективы применения в промышленности тепловых труб с эффективными капиллярными структурами, в: «Научные исследования в условиях глобализации современного мира», Книга 1. Часть 1. Серия монографий / Л.В. Боровик, И.Я. Львович, Л.В. Начева, Н.В. Рыбалкин и др. / Одесса, КУПРИЕНКО СВ, 2020. С. 38-46. DOI 10/30888/978-617-7880-01-0/2020-01

3. А.А. Шаповал. Особенности создания и применения тепловых труб низкотемпературного диапазона, в: «Уровень развития техники и технологий в XXI веке», Книга 2. Серия монографий / А.В. Бобков, Л.Ю. Крестьянполь, М. Писанюк, А.Н. Романюк, С.Н. Гармаш и др. / Одесса, КУПРИЕНКО СВ, 2020. С. 36-48.

DOI 10/30888/27066-8692.2020-02

4. Yu. E. Nikolaenko, E.S. Alekseik, D.V. Kozak, T.Yu. Nikolaienko. Research on two-phase heat removal devices for power electronics, Thermal Science and Engineering Progress, 8 (2018) December, pp. 418-425. *(Scopus)*

<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.09.012>

5. Yu. E. Nikolaenko, A.S. Postol. Experimental Investigation of the Contact Heat Resistance in the Threaded Joint Zone of Contact Surfaces // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2018, Vol. 91, No 4, pp. 1097–1103. *(Scopus)*

<https://doi.org/10.1007/s10891-018-1836-6>

6. Yu.E. Nikolaenko, S.M. Rotner, R.S. Melnyk, T.Yu. Nikolaienko. The Use of Films of Metal-Containing Nanocomposites With a Silicon-Carbon Matrix in Thermal Imitators of the Components of Micro- and Nanoelectronics. 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Conference proceeding, April 24-26, 2018, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine, pp. 36-40. ISBN: 978-1-5386-6382-0.

DOI: 10.1109/ELNANO.2018.8477480 *(Scopus)*

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8477480>

<https://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=8468309>

7. Baranyuk A.V., Nikolaenko Yu.E., Rohachev V.A., Terekh O.M., Krukovsky P.G. Investigation of the flow structure and heat transfer intensity of surfaces with split plate finning, Thermal Science and Engineering Progress, 11 (2019) 28–39. *(Scopus)*

<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.03.018>

8. Nikolaenko Yu.E., Baranyuk A.V., Reva S.A., Pis`mennyi E.N., Dubrovka F.F., Rohachev V.A. Improving air cooling efficiency of transmit/receive modules through using heat pipes, Thermal Science and Engineering Progress, 14 (2019) art.100418. *(Scopus)*

<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100418>

9. Baranyuk A.V., Nikolaenko Yu.E., Rohachev V.A., Terekh O.M. Numerical study of heat transfer and aerodynamic drag of the radiator with lamellar split finning, Archives of Thermodynamics, 2020, vol. 41, No. 1, 67–93. *(Scopus)*

DOI: 10.24425/ather.2020.132950

10. Nikolaenko Yu.E., Baranyuk A.V., Reva S.A., Pis'mennyi E.N., Dubrovka F.F., Numerical simulation of the thermal and hydraulic characteristics of the liquid heat exchanger of the APAA transmitter-receiver module, Thermal Science and Engineering Progress, 17 (2020) Art. No 100499, pp. 1-11. (*Scopus*)

<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100499>

11. Rohachev V.A., Terekh O.M., Baranyuk A.V., Nikolaenko Yu.E., Zhukova Yu.V., Rudenko A.I. Heataerodynamic efficiency of small size heat transfer surfaces for cooling thermally loaded electronic components. Thermal Science and Engineering Progress, 2020, vol. 20, Art. No. 100726. (*Scopus*)

<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100726>

12. Baranyuk A.V., Rogachov V.A., Zhukova Yu. V., Terekh A.M., Rudenko A. I. Experimental Investigation of Heat Transfer of Plane Heat-Removing Surfaces with Plate Finning. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2020. vol. 93, No 4, pp. 962-972. (*Scopus*)

<https://doi.org/10.1007/s10891-020-02196-3>

13. Nikolaenko Yu.E., Baranyuk O.V., Rachynskyi A.Yu., Pekur D.V., Myniailo M.A. Improvement of Effectiveness of Cooling of Electronic Heat-Loaded Modules, Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia, 2020, Iss. 81, pp. 47–55, doi: 10.20535/RADAP.2020.81.47-55. (*Web of Science, фахове видання*)

14. Баранюк А.В. CFD-моделирование теплогидравлических характеристик развитых поверхностей с миниканалами / А.В. Баранюк, Ю.Е. Николаенко // Молодой ученый. – 2018. – № 12(64). – С. 224-228. (*Фахове видання*)

<https://doi.org/10.32839/2304-5809/2018-12-64-56>

<http://molodyycheny.in.ua/files/journal/2018/12/56.pdf>

15. Рева С.А. Оценка теплоаэродинамической эффективности пакетов винтообразных труб / С.А. Рева, А.М. Терех, В.А. Рогачев, А.И. Руденко // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2018. – № 2(52). – С. 51-58, (*Фахове видання, рекомендоване секцією МОН*)

16. Ніколаєнко Ю.Є. Теплові характеристики рідинного теплообмінника приймально-передавального модуля АФАР / Ю.Є. Ніколаєнко, О.В. Баранюк, С.А. Рева // Технологія и конструирование в электронной аппаратуре. – 2020. – № 1-2. – С. 37-44. (*Фахове видання*)

<http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2020.1-2.37>

17. Николаенко Ю.Е. Экспериментальное исследование контактного термического сопротивления в зоне резьбового разъемного соединения соприкасающихся поверхностей / Ю.Е. Николаенко, А.С. Постол // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т.91, № 4. – С. 1157-1163. (*Закордонне видання*)

18. Ніколаєнко Ю.Є. CFD – моделювання температурного поля корпусу-радіатора передавального модуля АФАР з повітряним охолодженням / Ю.Є. Ніколаєнко, О.В. Баранюк, С.А. Рева, В.А. Рогачов // Технологія и конструирование в электронной аппаратуре. – 2019. – № 1-2. – С. 27-33. (*Фахове видання*)

<http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2019.1-2.27>

19. Кравец В. Ю. Исследование проницаемости металловолоконистых капиллярных структур тепловых труб для охлаждения электроники / В.Ю. Кравец, Р.С. Мельник, А.А. Червонюк, Є.В. Шевель // Технологія и конструирование в электронной аппаратуре. – 2020. – № 3–4. – С. 47–52. (*Фахове видання*)

<http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2020.3-4.47>

20. Nikolaenko Yu. E., Baranyuk A.V., Reva S.A. Improving cooling efficiency transmit/receive mod-ules of APAA radar through using heat pipes, Coordination problems of military technical and deensive industrial policy in Ukraine. Weapons and military equipment development perspectives. VII International Scientific and Practical Conference, Abstracts of reports, October 09-10, 2019, Kyiv, Central Research Institute of Arms of the Armed Forces of Ukraine. 2019. – P. 172-173.

<https://mon.gov.ua/ua/nauka/innovacijna-diyalnist-ta-transfer-tehnologij/publikaciyi>

13. Ключові слова до розробки: активна фазована антенна решітка, конвективний теплообмінник, передавальний модуль, теплова труба, теплові характеристики, теплообмін.