

О. М. Терех, к.т.н., с. н. с., ORCID 0000-0002-1320-8594
В. А. Рогачов, к.т.н., доц., ORCID 0000-0001-5489-874X
О. В. Баранюк, к.т.н., доц., ORCID 0000-0001-6008-6465
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Ю. В. Жукова, к.ф.-м.н., пр.н.с., ORCID 0000-0003-11219-6373
Державна наукова установа «Інститут тепло і
масообміну ім. А.В. Ликова НАН Білорусі», Мінськ, Білорусь
О. І. Руденко, к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-8541-9710
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ТЕПЛОАЕРОДИНАМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОВІДВІДНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИБОРІВ

У статті проведений порівняльний аналіз теплоаеродинамічної ефективності малогабаритних теплообмінних поверхонь (радіаторів) з різним типом ребрення, які працюють в умовах вимушеної конвекції. Розглянуті пластинчасто-ребристі, голчасто-штирьові, сітчасто-дротові та пластинчасто-розрізні поверхні. Зіставлені поверхні мають приблизно однакові габарити, ребра розміщені на плоскій основі розміром 70x70 мм, висота ребер складає 35 мм. Розсіявана теплова потужність та швидкість охолоджуючого потоку змінюються, відповідно, у межах (20 – 80) Вт та (1,5 – 10) м/с, а аеродинамічний опір складає (5– 75) Па. Досліджені поверхні з пластинчасто-розрізним ребренням з кроком між ребрами 6,9; 5,0; 2,5 мм, товщиною ребра 1,4; 0,55 мм, глибиною розрізки від вершини ребра 14; 21; 28 мм і кутами повороту розрізаних ділянок ребер до набігаючого потоку 30° та 45°. В якості критеріїв ефективності вибрані: температура перегріву основи поверхні по відношенню до температури навколишнього середовища та комплексний параметр $\alpha_{np} \cdot \Psi$, що враховує геометричні та теплофізичні характеристики поверхонь. Порівняльний аналіз показав, що неповне розрізання пластинчатих ребер і поворот їх розрізаних частин на певний кут до охолоджуючого потоку призводить до підвищення теплоаеродинамічної ефективності. Найбільшою тепловою ефективністю серед пластинчасто-розрізних поверхонь відзначається поверхня з відносною глибиною розрізки $h_F/h = 0,6$, без повороту ділянок ребер ($\varphi = 0^\circ$), кроком між ребрами $s = 2,5$ мм і товщиною ребра $\delta = 0,55$ мм. Її ефективність на (20 – 35) % вище, ніж у гладко-ребристій поверхні з параметрами $h_F/h = 0$; $\varphi = 0$, $s = 2,5$ мм, $\delta = 0,55$ мм. Порівняно з пластинчасто-розрізними поверхнями, що мають інші параметри ребрення, її ефективність в середньому вище на (50 – 65) %. Голчасто - штирьова поверхня за ефективністю знаходиться трохи вище за пластинчасто-ребристі з $s = 6,9$ мм, $\delta = 1,4$ мм та $s = 5,0$ мм, $\delta = 0,55$ мм, проте, нижче на (15 – 25)% пластинчасто-розрізних поверхонь, які мають міжреберний крок 6,9 та 5,0 мм, товщину ребра 1,4 та 0,55 мм, кути повороту 30°, 45° і глибину розрізки 14; 21; 28мм. Найгірші результати за теплоаеродинамічною ефективністю показали сітчасто-дротові поверхні.

Ключові слова: тепловідвідна поверхня, теплоаеродинамічна ефективність, пластинчасто-розрізні ребра, сітчасто - дротові ребра, голчасто-штирьові ребра, перегрів поверхні, порівняльні залежності.

Вступ

Забезпечення оптимальних режимів охолодження елементів радіоелектронної апаратури (РЕА), персональних комп'ютерів (ПК) та інших теплонавантажених елементів електронного устаткування є актуальним завданням, з вирішенням якого пов'язана важлива проблема надійності їх функціонування [1]. Температурні умови роботи пристроїв електронної техніки визначаються в основному двома чинниками: станом середовища, яке оточує апаратуру або теплонавантажений елемент, і кількістю теплоти, яку розсіює цей елемент в навколишнє середовище. Перегрів такого елемента зазвичай призводить до погіршення робочих характеристик і зменшення часу нормальної його роботи. Щоб уникнути цього, необхідно в процесі експлуатації не допускати високих температур нагрівання, які знаходяться в межах (80 – 90) °С, оскільки, при їх перевищенні, інтенсивність відмов теплонавантажених елементів різко зростає.

© О.М. Терех, В. А. Рогачов, О. В. Баранюк, Ю. В. Жукова, О. І. Руденко, 2020

Для вирішення проблеми тепловідводу використовуються різноманітні пристрої і способи охолодження. Найпростішим і дешевим в експлуатації залишається повітряне охолодження, що відбувається-

ся в умовах природної і вимушеної конвекції. У роботах [1-3] показано, що в порівнянні з рідинним або випарним охолодженням, ефективність повітряного охолодження нижча. Тому, для її збільшення, на практиці широко застосовуються різні ребристі малогабаритні поверхні, так звані радіатори. При використанні такої тепловідвідної поверхні, як правило, прагнуть понизити температуру її основи, яка безпосередньо встановлюється і контактує з поверхнею теплонавантаженого елемента. Крім того, при незмінній температурі повітря, що охолоджує, прагнуть зменшити габарити і масу поверхні, тобто зробити її ефективною і компактною. В даний час в системах охолодження теплонавантажених елементів електронних пристроїв застосовуються такі ребрені поверхні, як пластинчасті, голчато-штирьові, петельно-дротові, які, при сучасному розвитку електронної техніки, не завжди відповідають вимогам ефективного відведення надлишкової теплоти, а також, технологічності і вартості конструкцій.

Одним з шляхів підвищення інтенсивності теплообміну поверхні є забезпечення на її ребрах відривних течій, зменшення товщини прилеглої шару і турбулізації охолоджуючого потоку. Режим обтікання з вказаними властивостями, наприклад, можна створити в міжреберних каналах поверхні за допомогою повного або часткового розрізання прямокутних ребер на короткі ділянки в напрямку перпендикулярному до основи поверхні [4-10]. Подібні методи інтенсифікації застосовуються в поверхнях з труб із спіралью-стрічковим розрізним ребренням [11-14], в плоских трубах з бічними розрізними ребрами [15], в поверхнях з розрізними ребрами, встановленими на плоскій основі [16].

Мета роботи:

– оцінити теплоаеродинамічну ефективність тепловідвідної поверхні з пластинчато-розрізним ребренням шляхом порівняння її з теплоаеродинамічними ефективностями тепловідвідних поверхонь з сітчасто-дротовим [17–21], пластинчастим і голчато-штирьовим ребреннями [22, 23].

Завдання дослідження

Провести порівняльний аналіз і визначити кращу конструкцію за отриманими даними тепловідвідних поверхонь: з пластинчато-розрізним, сітчасто-дротовим, пластинчато-гладким і голкоштирьовим ребреннями при фіксованих значеннях швидкості обдування повітряним потоком W_n , температури омиваючого середовища t_c , розсіяного теплового потоку Q , температури основи $t_{осн}$ за наступними критеріями:

- перегрів основи поверхонь залежно від теплового потоку, що відводиться $\Delta t = f(Q)$;
- за графічними залежностями приведених коефіцієнтів теплообміну і коефіцієнтів ребрення від швидкості обдування $\alpha_{пр} \cdot \Psi = f(W_n)$;
- за залежностями приведених коефіцієнтів теплообміну і коефіцієнтів ребрення від аеродинамічного опору $\alpha_{пр} \cdot \Psi = f(\Delta P)$.

Конструкція і геометричні характеристики тепловідвідних поверхонь: з пластинчастим ребренням

На рисунках (1–3) наведено конструкції тепловідвідних поверхонь з пластинчато гладким і пластинчато розрізним ребреннями, які розроблені і виготовлені в НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». Геометричні характеристики досліджуваних пластинчато-ребристих поверхонь представлені в табл.1. Діапазони зміни геометричних розмірів поверхонь прийняті, виходячи з існуючих рекомендацій та вимог до конструювання і використання в радіоелектронній промисловості тепловідвідних поверхонь [22, 23].

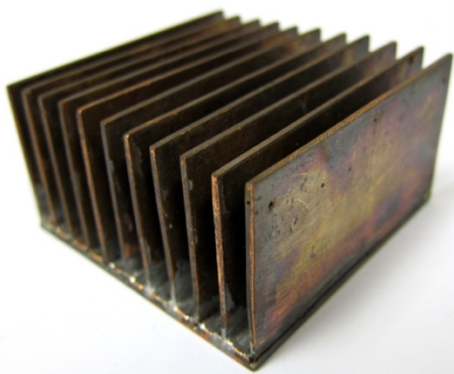


Рисунок 1 – Мідна тепловідвідна поверхня № 9 тип 1 (табл. 1) з пластинчастим гладким ребренням

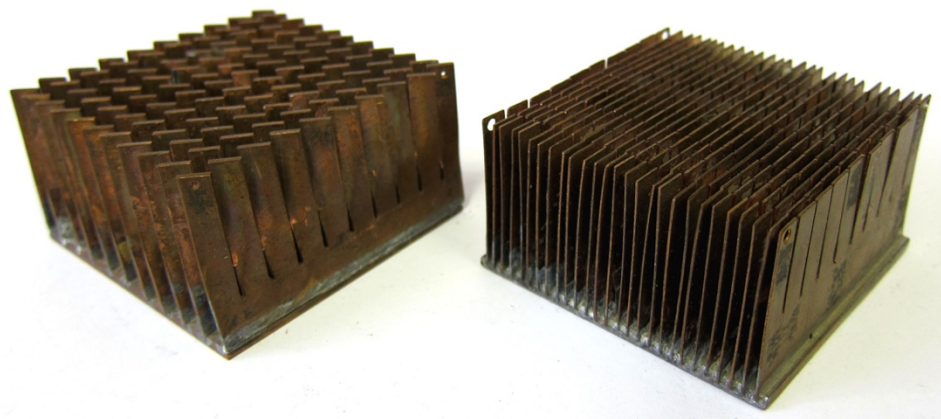


Рисунок 2 – Мідні тепловідвідні поверхні № 8 тип 1 (зліва), № 11 тип 2 (справа) з пластинчато-розрізним оребренням [4- 10]

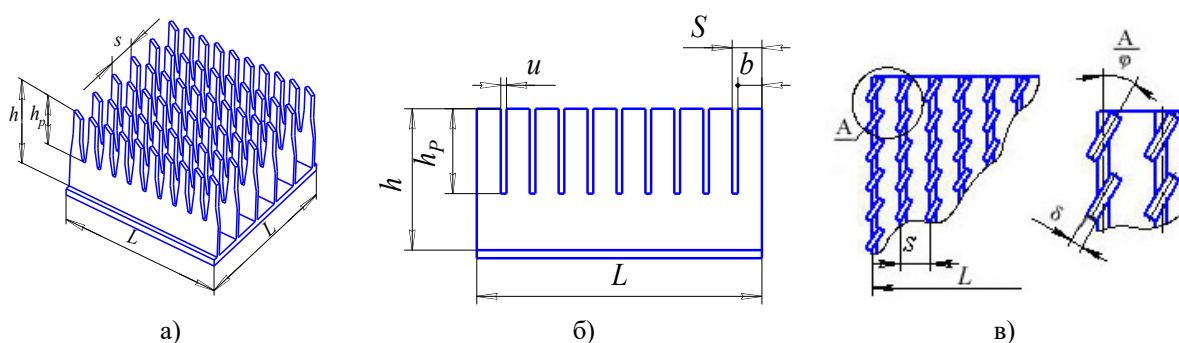


Рисунок 3 – Конструкція і геометрія тепловідвідної поверхні з пластинчато-розрізним оребренням:
а - загальний вигляд, б - вид збоку, в - вид зверху

Таблиця 1 – Геометричні характеристики пластинчато-розрізних поверхонь

Параметр	№ поверхні															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
h , мм	35,0															
s , мм	6,9								2,5				5,0			
δ , мм	1,4								0,55				0,55			
h_p , мм	14	21	28	14	21	28	21	28	0	14	21	0	21		0	
S , мм	7,1								0	7,1	0	7,1		0		
b , мм	5,7								0	6,5	0	6,5		0		
Z , шт.	11								27				14			
F , см ²	603,3								1352,0				736,2			
φ , рад	0			$\pi/6$			$\pi/4$		0	0			0	$\pi/6$	$\pi/4$	0
Ψ	10,6								24,0				13,6			
тип	I								II				III			

Тепловідвідні поверхні з пластинчастими прямокутними ребрами, виготовлені з міді, мали плоску основу розміром $L \times L = 70 \times 70$ мм² товщиною $\delta_{\text{осн}} = 3$ мм, до якої припаяні гладкі пластинчасті ребра. Поверхні за геометричними характеристиками розділені умовно на три типи – тип 1, тип 2, тип 3 (див. табл.1), які відрізняються один від одного кроком між ребрами s , їх товщиною δ , кількістю ребер Z , повною площею зовнішньої поверхні F і коефіцієнтами оребрення Ψ .

Поверхні ребер кожного з типів в поперечному напрямі від вершини послідовно розрізались на глибину $h_p = 14; 21; 28$ мм (рис.2, 3), внаслідок чого на ребрі утворювалися розрізні ділянки однакової ширини b (табл.1). Проміжок між розрізними частинами ребер u вибирався так, щоб площа розрізних

ребер була не менше площі поверхні нерозрізного ребра, тобто, дотримувалася геометрична умова $u \approx \delta$. Окрім цього, з метою турбулізації потоку, частини розрізних ребер поверхонь №№4 - 6, №14 були повернуті до напрямку обдуваючого потоку на кут $\varphi = 30^\circ (\pi/6)$, а для поверхонь №№7, 8, 15 на кут $\varphi = 45^\circ (\pi/4)$ (табл.1).

Пластинчасті гладкі ребра поверхонь №№9, 12, 16 не мали розрізки ребер і використовувалися як базові (рис.1) для порівняння теплоаеродинамічних характеристик з поверхнями, у яких пластинчасті ребра мали тільки розрізку ребер ($h_p = \text{var}$; $\varphi = 0^\circ$), а також поверхні, що мали розрізку ребер ($h_p = \text{var}$) з поворотом ділянок на кути $\varphi = 30^\circ$ і $\varphi = 45^\circ$.

На рис. 4 і рис. 5 представлені відповідно конструкції тепловідвідних поверхонь з сітчасто-дротовим [17- 21] і голчасто-штирьовим оребреннями [23], які використовувалися у порівняльному аналізі теплоаеродинамічних характеристик поверхонь. Всі поверхні мали приблизно однакові габаритні розміри, що дозволило достатньо коректно проводити процедуру зіставлення їх теплоаеродинамічних ефективностей.

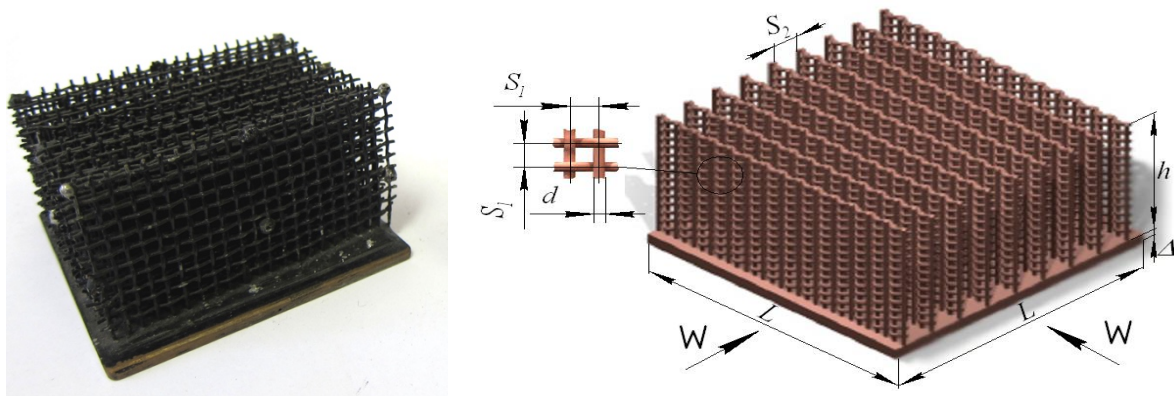


Рисунок 4 – Конструкція мідної тепловідвідної поверхні з сітчасто-дротовим оребренням [17-21].

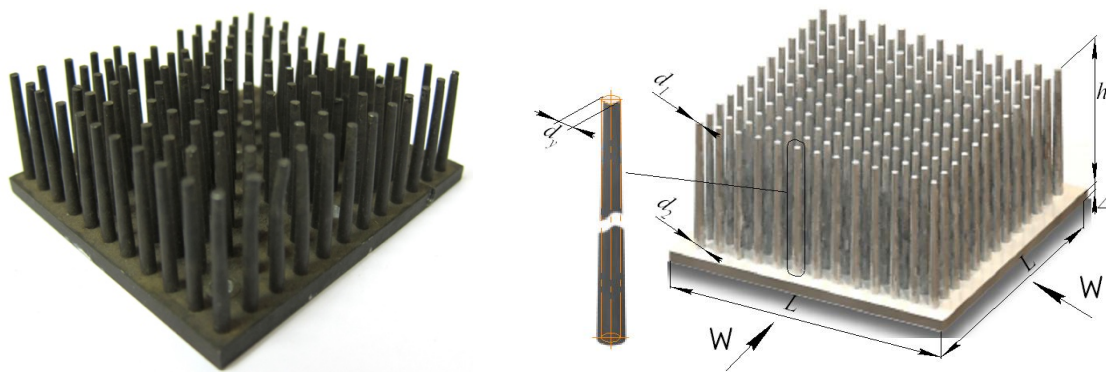


Рисунок 5 – Конструкція дюралюмінієвої тепловідвідної поверхні з голчасто-штирьовим оребренням [23]

Оцінка і порівняння теплоаеродинамічної ефективності тепловідвідних поверхонь з пластинчастим оребренням.

Одним з методів оцінки теплової ефективності розвинених поверхонь є обробка і представлення отриманих експериментальних даних у вигляді графічних залежностей $\Delta t = f(Q)$ при різних швидкостях обдування, де Q – розсіювана поверхнею тепла потужність, $\Delta t = t_{\text{очн}} - t_c$ – перегрів плоскої основи поверхні по відношенню до температури навколишнього середовища. На рис. 6 показано порівняння теплових характеристик мідних пластинчасто-ребристих поверхонь без розрізаних ребер ($h_p/h = 0$ $\varphi = 0$) з пластинчасто-ребристими поверхнями, що мають розрізані ребра на певну відносну глибину ($h_p/h = 0,4$; $0,6$; $0,8$) без поворотів розрізаних частин ребер ($\varphi = 0$) і розрізаних ребер з одночасним поворотом їх розрізаних частин на кути $\varphi = 30^\circ$ і $\varphi = 45^\circ$ (рис. 3). Зіставлення проводилося при фіксованій середній швидкості обдування $W_H = 3,5$ м/с в діапазоні теплових потужностей $Q = (20 - 80)$ Вт. Краща поверхня

вибиралася за результатами аналізу кривих графіку $\Delta t = f(Q)$. Як видно, при однакових перегрівах основи Δt , ефективніше є та поверхня, у якій розсіювана теплова потужність Q найвища, а відповідна крива по відношенню до інших кривих займає саме нижнє положення (рис.6).

Аналіз приведених даних показав, що при однакових температурах перегріву основи Δt , кількість теплоти, яку здатна розсіяти поверхня, в першу чергу визначається її конструкцією, величиною відносної глибини розрізання і кутом повороту розрізних частин пластинчастих ребер. Використання методу неповного розрізання і повороту розрізних частин ребер дозволяє відводити більше надлишкової теплоти в порівнянні з традиційним пластинчастим обрєбренням. Аналіз даних рис. 6 свідчить про те, що найбільшою тепловою ефективністю за критерієм перегріву основи, має поверхня типу II (№11) з $h_p/h = 0,6$, $\varphi = 0^\circ$, $s = 2,5$ мм і $\delta = 0,55$ мм. Наприклад, при $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ теплова ефективність цієї поверхні в середньому в 2 і в 1,25 рази вище, ніж відповідно, у поверхонь з пластинчасто-розрізним обрєбренням типів I і III, які мають різні товщину ребра, крок, глибину розрізання і кут повороту (табл.1).

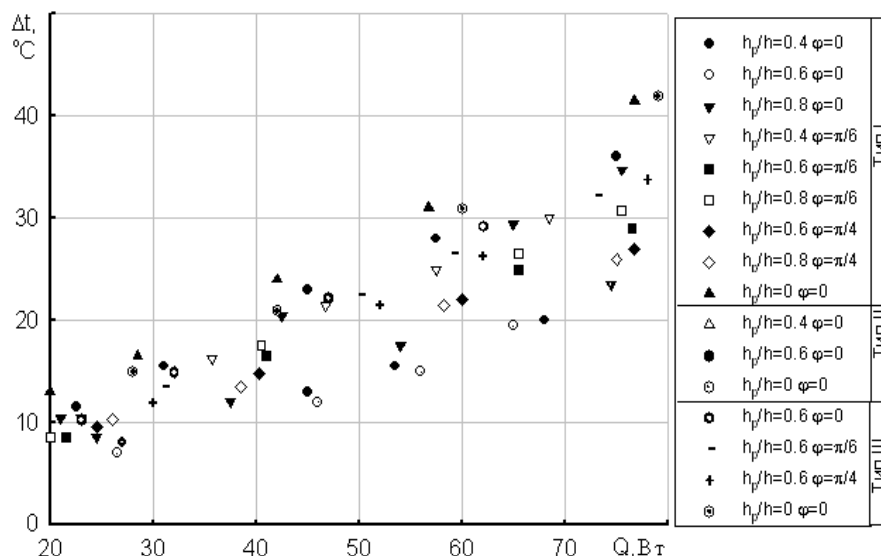


Рисунок 6 – Експериментальні залежності перегріву основи від надлишкової кількості теплоти поверхонь типів I – III

У дослідницькій практиці і інженерних методиках розрахунку радіаторів для умов вимушеної конвекції широко застосовується, так званий, приведений коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{пр}$, який одночасно враховує термічний опір теплопровідності, ефективність ребра і термічний опір конвективної тепловіддачі. Приведений коефіцієнт тепловіддачі визначається або з дослідних даних, або розраховується за залежностями [24, 25], а коефіцієнт ефективності гладкого прямокутного ребра знаходиться за відомими формулами [24 - 27]. При порівнянні ребристих теплообмінних поверхонь, що відрізняються одна від одної співвідношенням площ поверхні ребер і основи або коефіцієнтами обрєбрення Ψ , на практиці, часто використовується узагальнюючий параметр $(\alpha_{пр} \cdot \Psi)$. За інших рівних умов, цей параметр буде найвищим у найбільш ефективної поверхні.

На рис. 7 нанесені дослідні дані у вигляді залежностей $\alpha_{пр} \cdot \Psi = f(Wn)$ для радіаторів з пластинчастими ребрами, які приведені в публікаціях [4 - 10], а також дані, для сітчасто-дротових поверхонь при їх поздовжньому (лінія 1) і поперечному (лінія 2) омиванні повітряним потоком зі швидкістю набігаючого потоку Wn [17 - 21] та для голчасто-штирьових радіаторів [22, 23] (лінія 3).

Аналіз даних рис. 7 свідчить про те, що із збільшенням швидкості обдування поверхонь, параметр $\alpha_{пр} \cdot \Psi$ монотонно зростає. Чим ефективніше працює поверхня (більш інтенсивніше відбувається тепловідвід від ребристої поверхні), тим вище розміщена крива $\alpha_{пр} \cdot \Psi = f(Wn)$. Серед досліджених поверхонь найбільшою тепловою ефективністю володіє поверхня з розрізним обрєбренням типу II (№11); $h_p/h = 0,6$, $\varphi = 0^\circ$ і $s = 2,5$ мм, $\delta = 0,55$ мм, а найменшою - поверхня типу I (№9) з гладкими пластинчастими ребрами з кроком $s = 6,9$ мм і товщиною ребра $\delta = 1,4$ мм. З рис. 7, також слідує, що в результаті розрізання ребер і повороту їх розрізаних частин на кути 30° і 45° (поверхні типів I і II), теплова ефективність в досліджену діапазоні швидкостей зберігається достатньо високою і перевищує в середньому ефективність пластинчасто - ребристих поверхонь №9, 16 у (1,15 - 1,45) рази.

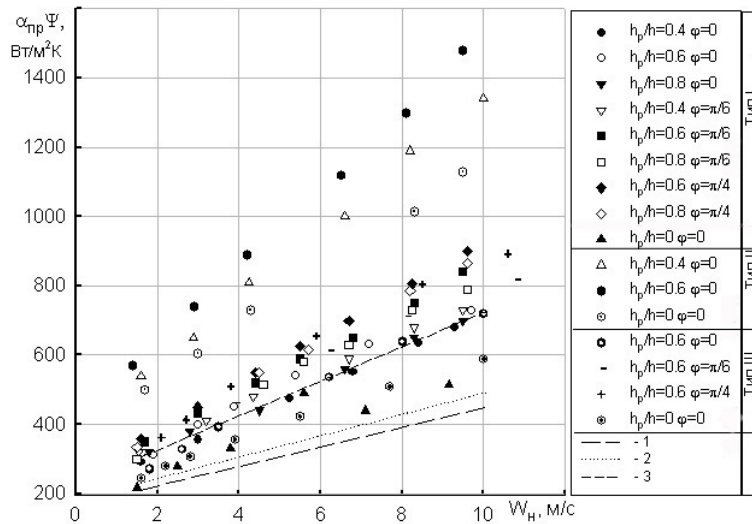


Рисунок 7 – Вплив швидкості набігаючого потоку на теплову ефективність поверхонь
 1, 2 – поверхні з сітчасто-дротовим оребренням, відповідно, при поздовжньому і поперечному їх обтіканні;
 3 – поверхня з голчасто-штирковим оребренням.

Дані рис. 7 свідчать про те, що теплова ефективність сітчасто-дротових тепловідвідних поверхонь при поздовжньому і поперечному омиванні (лінії 1 і 2) в середньому на (50-80) % нижча, ніж для пластинчастих тепловідвідних поверхонь з розрізними ребрами і їх поворотом (типи I і III) за рівних умов швидкостей обдування і в (3,0-3,2) рази нижче, ніж для поверхонь №№10,11 типу II. Найгіршою серед порівнюваних, виявилася сітчасто-дротова поверхня при поздовжньому омиванні ребер (лінія 1). Поверхні з голчасто-штирковим оребренням більш ефективніші і володіють ефективністю практично рівній ефективності тепловідвідних поверхонь типів I і III при низьких швидкостях обдування (1,5-3,5 м/с) і в середньому в (1,8-2) рази нижче, ніж у поверхонь типу II. У той же час, ефективність голчасто-штиркової поверхні вище у (1,5 - 1,7) рази в порівнянні з сітчасто-дротовими.

Приведений на рис. 7 спосіб оцінки ефективності базується лише на теплових і геометричних характеристиках поверхонь, які оцінювалися по інтенсивності теплообміну за рахунок застосування різних форм оребрення і ступеню його розвиненості. Він не враховує втрати потужності на прокачування теплоносія через порівнювані поверхні. Для прийняття остаточного рішення по вибору найбільш ефективної поверхні дослідний і розрахунковий матеріал оброблявся у вигляді залежностей $\alpha_{пр} \cdot \Psi = f(\Delta P)$, які враховують одночасний вплив геометричних, теплових і аеродинамічних показників на ефективну роботу поверхонь (рис. 8).

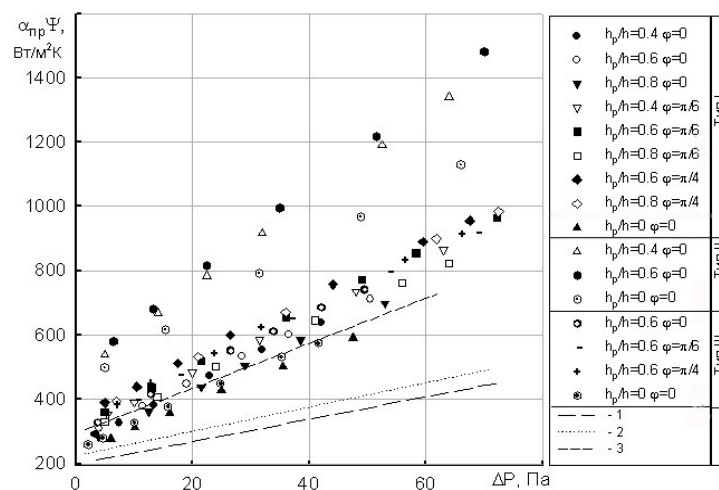


Рисунок 8 – Теплоаеродинамічна ефективність порівнюваних тепловідвідних поверхонь
 1, 2 – сітчасто-дротові поверхні при поздовжньому і поперечному їх омиванні відповідно; 3 – поверхня з голчасто-штирковим оребренням.

Як видно з рис. 8, при однакових витратах потужності на подолання опору ΔP з усіх порівнюваних тепловідвідних поверхонь, найбільш ефективними є поверхні типу II (№№10, 11) з розрізним обрешеченням без повороту частин ребер ($\varphi = 0^\circ$) з „щільним” кроком між ребрами ($s = 2,5$ мм) і достатньо розвинутою площею теплообмінної поверхні ($F = 1350$ см²). Поверхні з пластинчастим нерозрізним обрешеченням типів I (№9), III (№16) і з розрізним обрешеченням типу I при $h_p/h = 0,8$ і $\varphi = 45^\circ$ ($\pi/4$) виявилися найгіршими.

З представлених на рис. 8 даних видно, що в дослідженому діапазоні аеродинамічних опорів найбільшу теплоаеродинамічну ефективність мають пластинчато-розрізні поверхні типу II (№11, 10), яка на (20 – 35) % вища, ніж у поверхні №12 без розрізання ребер ($h_p/h = 0$; $\varphi = 0$, $s = 2,5$ мм, $\delta = 0,55$ мм). В порівнянні з поверхнями типів I і III їх ефективність вище в середньому на (50 – 65)%. Голчато-штирвова поверхня по ефективності знаходиться декілька вище пластинчато-ребристих поверхонь №№ 9, 16, проте, нижче на (15 – 25) % пластинчато-розрізних поверхонь типів I і III. Гірші результати за теплоаеродинамічною ефективністю показали сітчасто-дротові поверхні (криві 1 і 2).

Висновки і рекомендації

За результатами порівняльного аналізу теплоаеродинамічної ефективності малогабаритних тепловідвідних обрешечених поверхонь з плоскою основою, призначених для вимушеного повітряного охолодження приладів електронної техніки в діапазонах розсіюваних теплових потужностей (20 - 80) Вт і швидкостей обдування (1,5 -10) м/с, слідує:

- неповне розрізання гладких пластинчастих ребер поверхонь призводить до збільшення теплоаеродинамічної ефективності;
- кращою теплоаеродинамічною ефективністю володіють тепловідвідні поверхні з пластинчато – розрізним обрешеченням і поворотом розрізних частин ребер на фіксований кут до омиваючого повітряного потоку;
- найбільше збільшення теплоаеродинамічної ефективності завжди спостерігається у пластинчато-ребристих поверхонь з відносною глибиною розрізання $h_p/h = 0,6$;
- ширина смуги розрізання не повинна перевищувати товщину ребра, що дозволяє зберігати максимальну тепловідвідну площу ребра.

Список використаної літератури

1. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: «Высшая школа», 1984 – 246 с.
2. Дульнев Г.Н., Тарновский Н. Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. Учебное пособие для студентов высших студенческих заведений. Л.: «Энергия», – 1971 – 248 с.
3. Чернышев А.А., Иванов В.И., Аксенов А.И., Глушкова Д.Н. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники. М. Энергия, 1989 – 216 с.
4. Письменный Е.Н., Бурлей В.Д., Терех А.М., Рогачев В.А., Руденко А.И. Влияние разрезки, поворотов и отгибки ребер на теплоаэродинамические характеристики поверхностей теплообмена. Промышленная теплотехника. 2003. Т.25. №1. С. 10-16.
5. Письменный Е.Н., Бурлей В.Д., Терех А.М., Баранюк А.В., Цвященко Е.В. Теплообмен плоских пластинчатых поверхностей с разрезным обрешечением при вынужденной конвекции. Промышленная теплотехника. 2005. Т.27. №4. С. 11-16.
6. Баранюк А.В., Письменный Е.Н., Терех А.М., Рогачев В.А., Бурлей В.Д. Аэродинамическое сопротивление пластинчатых поверхностей с разрезным обрешечением при вынужденной конвекции. Промышленная теплотехника. 2006. Т.28. №4. С. 29-33.
7. Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Терех А.М., Баранюк А.В., Бурлей В.Д. Теплоаэродинамическая эффективность новых теплоотводящих поверхностей с пластинчато-разрезным обрешечением. Энергетика: економіка, технології, екологія. 2007. №1. С. 16-21.
8. Баранюк А.В. Интенсивность теплообмена продольно омываемых поверхностей с пластинчато-разрезным обрешечением. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2007. № 4/3 (28). С. 4-10.
9. Баранюк А.В., Рогачев В.А., Терех А.М., Руденко А.И. Численное моделирование конвективного теплообмена и аэродинамики поверхностей с пластинчато-разрезным обрешечением. Вісник НТУ „ХПІ”. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2017. № 9. С. 64-70.
10. Baranyuk A.V., Nikolaenko Yu.E., Rohachev V.A., Terekh A. M., Krukovski P.G. Investigation of the flow structure and heat transfer intensity of surfaces with split plate finning. Thermal Science and Engineering Progress. 2019. V. 11. P. 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.03.018>.
11. Терех А.М., Шаповал О.Е., Письменный Е.Н. Среднеповерхностный теплообмен поперечно-омываемых коридорных пучков труб с разрезным спирально-ленточным обрешечением. Промышленная теплотехника. 2001. Т.23. №1-2. С. 35-41.
12. Шаповал О.Е., Письменный Е.Н., Терех А.М. Аэродинамическое сопротивление поперечно-омываемых коридорных пучков труб с разрезным обрешечением. Промышленная теплотехника. 2001. Т.23. №4-5. С. 63-68.
13. Письменный Е.Н., Терех А.М., Рогачев В.А., Бурлей В.Д., Ральчук В.В. Аэродинамическое сопротивление в шахматных пучках труб со спирально-ленточным разрезным обрешечением. Промышленная теплотехника. 2007. Т.29. № 5. С. 30-35.

14. Письменный Е.Н., Терех А.М., Рогачев В.А., Бурлей В.Д., Горащенко О.С. Теплообмен в шахматных пучках труб со спирально-ленточным разрезным оребрением. Промышленная теплотехника. 2007. Т.29. № 6. С. 15-22.
15. FENG LiLi, DU XiaoZe, YANG YongPing, YANG LiJun. Study heat transfer enhancement of discontinuous short wave finned flat tube. Science China. Technological Sciences. 2011. No 12. P. 3281-3288. doi.10.1007/s11431-011-4572-0.
16. Sakkarin Chingulpitak, Nares Chimres, Kitti Nilpueng, Somchai Wongwises. Experimental and numerical investigations of heat transfer and flow characteristics of cross-cut heat sinks. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. No 102. P. 142-153. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.098.
17. Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Терех А.М., Бурлей В.Д., Разумовский В.Г. Теплообмен плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением при вынужденной конвекции. Промышленная теплотехника. 2002. Т.24. №4. С. 71-78.
18. Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Терех А.М., Бурлей В.Д., Разумовский В.Г. Обобщение экспериментальных данных по конвективному теплообмену продольно омываемых плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением. Энергетика: економіка, технології, екологія. 2003. №1. С. 52-58.
19. Письменный Е.Н., Терех А.М., Рогачев В.А., Бурлей В.Д., Руденко А.И. Расчет конвективного теплообмена поперечно-омываемых плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением. Промышленная теплотехника. 2003. Т.25. №4. С. 11-15.
20. Письменный Е.Н., Терех А.М., Рогачев В.А., Бурлей В.Д. Обобщение экспериментальных данных по аэродинамическому сопротивлению поперечно-омываемых плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением. Энергетика: економіка, технології, екологія. 2004. №1. С. 28-31.
21. Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Бурлей В.Д., Васильев А.Ф., Ежова В.В. Обобщение экспериментальных данных по аэродинамическому сопротивлению продольно-омываемых плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением. Энергетика: економіка, технології, екологія. 2006. №1. С. 97-101.
22. ОСТ4.012.001 Радиаторы охлаждения полупроводниковых приборов. Методы расчетов. Редакция 1-77. – 68 с.
23. ОСТ4.ГО.012.003. Радиаторы игольчато-штыревые охлаждения полупроводниковых приборов. Методы расчета. Редакция 1-69.
24. Письменный Е. Н., Терех А.М., Семеняко А.В., Багрий П.И. Коэффициент эффективности прямоугольного ребра плоскоооальной трубы. Энергетика: економіка, технології, екологія. 2010. № 2. С. 70-75.
25. Pis'mennyi E.N., Bagrii P.I., Terekh A.M., Semenyako A.V. Optimization of the finning of a new heat exchange surface of flat-oval tubes. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2013. V.86. N 5. P.1066-1071.
26. Краус А.Д. Охлаждение электронного оборудования. – Л.: Энергия, 1971. – 248 с.
27. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. – М.: Энергия, 1977. – 464 с.

Список принятых позначень: b – ширина розрізаних частин ребер; F – площа тепловідвідної поверхні; h – висота ребра; h_p – висота розрізаної частини ребра; L – лінійний розмір основи; Q – відведений тепловий потік; q_m – питомий масовий показник; t – температура; S – крок між розрізними частинами ребер; s – крок між ребрами; u – ширина розрізки; W – швидкість повітряного потоку; Z – кількість ребер; α – коефіцієнт тепловіддачі; ΔP – аеродинамічний опір; Δt – перегрів; δ – товщина ребра чи основи; φ – кут повороту розрізної частини ребра; Ψ – коефіцієнт оребрення.

Індеси: н – налібаючий; осн – основа; пр – приведений; с – середина.

A. Terekh, Ph.D., senior Researcher, **ORCID** 0000-0002-1320-8594
V. Rogachov, Ph.D., associate professor, **ORCID** 0000-0001-5489-874X
A. Baranyuk, Ph.D., associate professor, **ORCID** 0000-0001-6008-6465
National technical university of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
Yu. Zhukova, Ph.D., leading researcher, **ORCID** 0000-0003-11219-6373
A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute
of the Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
A. Rudenko, Ph.D., associate professor, **ORCID** 0000-0002-8541-9710
National technical university of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

HEAT AERODYNAMIC EFFICIENCY OF HEATING SURFACES FOR COOLING OF ELECTRONIC DEVICE ELEMENTS

In the article a comparative analysis of the thermal aerodynamic efficiency of small-sized heat-exchange surfaces (radiators) with different types of fins under conditions of forced convection is carried out. In this article are described surfaces with plate finning, plate-split finning, needle-pin finning and mesh-wire. The compared surfaces have approximately the same overall dimensions, the fins are placed on a flat basis with a size of 70x70 mm, and the height of the fins is 35 mm. The dissipated thermal power and cooling flow velocity vary, respectively,

from 20 to 80 W and from 1,5 to 10 m/s, and the aerodynamic drag change from 5 to 75 Pa. Surfaces with plate and plate-cut fins with step between fins 6,9 mm; 5,0 mm; 2,5 mm, fin thickness 1,4 mm; 0,55mm, cutting depth of the fin 14 mm; 21 mm; 28mm and the angles of rotation of the sections of edges to the incoming stream 30° and 45° were investigated. The following performance criteria are used: surface overheating temperature relative to the ambient temperature and complex parameter $\alpha_{np} \cdot \Psi$, which takes into account the geometric and thermo physical characteristics of the surfaces. Comparative analysis showed that incomplete cutting of the plate fins and rotation of their parts at a certain angle to the cooling flow leads to an increase in thermodynamic efficiency. The highest thermal efficiency among the plate-cut surfaces is the surface with relative cutting depth $h_c/h = 0,6$, without rotation of the sections of edges ($\varphi = 0^\circ$), the step between the edges $s = 2,5$ mm and the thickness of the edges $\delta = 0,55$ mm. Its efficiency is (20 - 35) % higher than that of a smooth-finned surface with parameters $h_c/h = 0$; $\varphi = 0$, $s = 2,5$ mm, $\delta = 0,55$ mm. Compared to plate-cut surfaces having other finning parameters, their efficiency is on average higher by (50 - 65) %. The needle-surface surface is slightly higher than the plate-fined surface with $s = 6,9$ mm, $\delta = 1,4$ mm and $s = 5,0$ mm, $\delta = 0,55$ mm, however, lower by (15 - 25) % plate-cutting surfaces having an intercostal step of 6,9 mm and 5,0 mm, fin thicknesses of 1,4 mm and 0,55 mm, angles of rotation 30°, 45° and depth of cut 14 mm; 21 mm; 28 mm. The worst results in thermodynamic efficiency showed a mesh surface.

Keywords: heat sink surface, plate-split fins, wire-mesh fins, pin fins, surface overheating, thermodynamic efficiency, comparison.

REFERENCES

1. Dul'nev, H.N., Tarnovsky, N.N. (1971). Thermal conditions of in electronic equipment. Textbook for students of higher educational institutions. Leningrad, USSR, Energy Press, 248.
2. Dul'nev, H.N. (1984). Heat and mass transfer in electronic equipment. Moscow, USSR, High school Press, 246.
3. Chernyshev, A.A., Ivanov, V.I., Aksenov, A.I., Glushkova, D.N. (1989). Providing thermal conditions for electronic product. Moscow, USSR, Energy Press, 216.
4. Pismennyi, E.N., Burley, V.D., Terekh, A. M., Rohachev, V.A., Rudenko, A.I. (2003). Influence of cutting, bends and turn of the fins on the heat-aerodynamic parameters of the surfaces of heat transfer. Industrial Heat Engineering, Vol. 25, No 1, 10-16.
5. Pismennyi, E. N., Burley, V. D., Terekh, A. M., Baranyuk, A. V., Tsvyashenko, E. V. (2005). Heat transfer of flat-plating surfaces with cut fins at force convection. Industrial Heat Engineering, Vol. 27, No 4, 11-16.
6. Baranyuk, A.V., Pismennyi, E.N., Terekh, A. M., Rohachev, V.A., Burley, V.D. (2006). Aerodynamic drag of flat-plating surfaces with cut fins at force convection. Industrial Heat Engineering, Vol. 28, No 4, 29-33.
7. Baranyuk, A.V., Pismennyi, E.N., Terekh, A. M., Rohachev, V.A., Burley, V.D. (2007). Thermal-aerodynamic efficiency of new heat-removing surfaces with plate-split fins. Power Engineering: economics, technology, ecology, No. 1, 16-21.
8. Baranyuk, A.V. (2007). The heat exchange rate of longitudinally streamlined surfaces with plate-split fins. Eastern European Journal of Enterprise Technologies, No 4/3 (28), 4-10.
9. Baranyuk, A. V., Rohachov, V.A., Terekh, A.M., Rudenko, A.I. (2017). Numerical simulation of convective heat transfer and drag of surfaces with plate-cut fins. Bulletin of NTU "KhPI". Power and heating engineering processes and equipment, No 9, 64-70.
10. Baranyuk, A.V., Nikolaenko, Yu.E., Rohachev, V.A., Terekh, A. M., Krukovskiy, P.G. (2019). Investigation of the flow structure and heat transfer intensity of surfaces with split plate finning. Thermal Science and Engineering Progress, V. 11, 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.03.018>.
11. Terekh, A. M., Shapoval, O. E., Pismennyi, E.N. (2001). Mid-surface heat transfer of transversely streamlined of in-lined tube bundles with cut spiral fins. Industrial Heat Engineering, Vol. 23, No. 1-2, 35-41.
12. Shapoval, O. E., Pismennyi, E.N., Terekh, A. M. (2001). Aerodynamic drag of transversely streamlined of in-lined tube bundles with cut fins. Industrial Heat Engineering, Vol. 23, No. 4-5, 63-68.
13. Pismennyi, E.N., Terekh, A. M., Rohachev, V.A., Burley, V.D., Ral'chuk, V.V. (2007). Aerodynamic drag in staggered tube bundles with cut spiral fins. Industrial Heat Engineering, Vol. 29, No. 5, 30-35.
14. Pismennyi, E.N., Terekh, A. M., Rohachev, V.A., Burley, V.D., Gorashchenko, O.S. (2007). Heat transfer in staggered tube bundles with spiral cut fins. Industrial Heat Engineering, Vol. 29, No. 6, 15-22.
15. FENG LiLi, DU XiaoZe, YANG YongPing, YANG LiJun. (2011). Study heat transfer enhancement of discontinuous short wave finned flat tube. Science China. Technological Sciences, No12, 3281-3288. [doi.10.1007/s11431-011-4572-0](https://doi.org/10.1007/s11431-011-4572-0).
16. Sakkarin Chingulpitak, Nares Chimres, Kitti Nilpueng, Somchai Wongwises. (2016). Experimental and numerical investigations of heat transfer and flow characteristics of cross-cut heat sinks // International Journal of Heat and Mass Transfer, No 102, 142-153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.098>.

17. Pismennyi, E.N., Rohachev, V.A., Terekh, A. M., Burley, V.D., Razumovskyi V. G. (2002). Heat transfer of flat surfaces with mesh-and-wire finning during forced convection. *Industrial Heat Engineering*, Vol. 24, No. 4, 71-78.
18. Pismennyi, E.N., Rohachev, V.A., Terekh, A. M., Burley, V.D., Razumovskyi V. G. (2003). Generalization of experimental data of convective heat transfer of longitudinally streamlined flat surfaces with mesh-and-wire finning *Power Engineering: economics, technology, ecology*, No. 1, 52-58.
19. Pismennyi, E.N., Rohachev, V.A., Terekh, A. M., Rudenko, A.I. (2003). Calculation of heat transfer of transversely streamlined flat surfaces with mesh-and-wire finning. *Industrial Heat Engineering*, Vol. 25, No. 4, 11-15.
20. Pismennyi, E.N., Terekh, A. M., Rohachev, V.A., Burley, V.D. (2004). Generalization of experimental data of aerodynamic drag of cross-flow flat surfaces with mesh-and-wire finning. *Power engineering: economics, technique, ecology*, No 1, 28-31.
21. Pismennyi, E.N., Rohachev, V.A., Burlei, V.D., Vasil'ev, A.F., Ezhova, V. V. (2006). Generalization of experimental data of aerodynamic drag of in-line-flow flat surfaces with mesh-and-wire finning. *Power engineering: economics, technique, ecology*, No 1, 97-101.
22. Industry standard 4.012.001. Radiators for cooling semiconductor devices. Calculation methods. USSR. Revision 1-77, 68.
23. Industry standard 4.GO.012.003. Radiators and pin-often cooling semiconductor devices. Calculation method. USSR. Editors 1-69.
24. Pismennyi, E. N., Terekh, A. M., Semenyako, A.V., Bagrii, P.I. (2010). Efficiency factor of rectangular fin of flat-oval tube. *Power engineering: economics, technique, ecology*, No 2, 70-75.
25. Pis'mennyi, E.N., Bagrii, P.I., Terekh, A.M., Semenyako, A.V. (2013). Optimization of the finbing of a new heat exchange surface of flat-oval tubes // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, V.86, No 5, 1066-1071.
26. Kraus, A. D. (1971). *Cooling Elctronic Equipment*. Leningrad, USSR: Energy, 248..
27. Kern, D. Q., Kraus, A. D. (1977). *Extended Surface Heat Transfer*. Moscow, USSR: Energy, 464.

Надійшла 27.12.2020
Received 27.12.2020