

Дмитро КОЗАК¹, Юрій НІКОЛАЄНКО¹, Сергій ХАЙРНАСОВ¹,
Роман МЕЛЬНИК¹, Демид ПЕКУР²

Україна, м. Київ, ¹КПІ імені Ігоря Сікорського;

²Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України

E-mail: dk.kpi.hp@gmail.com; yunikola@ukr.net

ТЕМПЕРАТУРНІ РЕЖИМИ РАДІАТОРА ДЛЯ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОТУЖНОГО СВІТЛОДІОДНОГО ОСВІТЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

Проведено експериментальне дослідження температурних режимів радіатора, виготовленого з серійного алюмінієвого (АД31Т5) радіаторного профілю в умовах природної конвекції повітря в широких діапазонах зміни факторів впливу: теплової потужності, орієнтації в просторі, різного розташування нагрівача відносно висоти радіатора. Отримані результати використано для верифікації розробленої комп'ютерної моделі нової конструкції системи охолодження потужного світлодіодного освітлювального пристрою на основі кількох таких радіаторів, з'єднаних між собою гравітаційними тепловими трубами. Експериментальні випробування підтвердили адекватність розробленої моделі та можливість застосування її при проєктуванні системи охолодження освітлювального пристрою.

Ключові слова: світлодіодний освітлювальний пристрій, система охолодження, природна конвекція, радіатор, теплообмін, температурний режим, експеримент, комп'ютерне моделювання.

Для проведення аварійно-рятувальних робіт в зонах надзвичайних ситуацій в темний час доби використовуються потужні освітлювальні пристрої, найбільш ефективні з яких виконані на основі світлодіодних джерел. Закордонні якісні світлодіодні освітлювальні пристрої мають високу вартість, а дешеві — низьку надійність. Тому більш раціональним є використання якісних освітлювальних пристроїв, розроблених в Україні.

Існує низка вітчизняних світлодіодних освітлювальних пристроїв, призначених для використання під час виконання аварійно-рятувальних робіт. Це, наприклад, побудований на основі 30 світлодіодів прожектор ДО-175-223-АТ [1] із загальною електричною потужністю 175 Вт та світловим потоком 21 525 лм. Його перевагами є пасивна система охолодження, яка забезпечує безшумну роботу, та можливість автономної роботи від джерела живлення з постійною напругою 12 В, недоліками — мала потужність та низький світловий потік, що обмежує його використання. Більш потужний вітчизняний світлодіодний стаціонарний прожектор ПСМЧ-250W [2] побудовано на основі чотирьох світлодіодних матриць із загальною електричною потужністю 250 Вт та світловим потоком не менше 41250 лм. Тепловий режим світлодіодних матриць забезпечується активним повітряним охолодженням за допомогою вбудованого вентилятора, що створює певний додатковий рівень акустичного шуму та зменшує надійність.

Сучасні світлодіодні матриці провідних виробників світу: Citizen (Японія), Cree (США), Samsung

(Південна Корея) вже сьогодні мають електричну потужність 200–500 Вт, що дозволяє побудувати на їх основі нові, більш потужні, надійні освітлювальні пристрої. Разом з тим, гострою тут стає проблема забезпечення нормального теплового режиму світлодіодних матриць, оскільки при збільшенні електричної потужності збільшується кількість виділеної теплоти та температура матриць, що негативно впливає на їхню надійність та світлові характеристики. Одним зі шляхів розв'язання цієї проблеми є використання в системі охолодження освітлювального пристрою високоефективних двофазних теплопередавальних елементів (термосифонів, теплових труб, парових камер тощо) [3]. Авторами [4, 5] запропоновано конструкцію потужного світлодіодного освітлювального пристрою, в системі охолодження якого для відведення теплоти від світлодіодних матриць до кількох бічних ребристих алюмінієвих радіаторів використовуються гравітаційні теплові труби, вбудовані в основу радіаторів. Теплота від теплообмінної поверхні радіаторів розсіюється в навколишнє повітря природною конвекцією, що забезпечує тривалу безшумну автономну роботу освітлювального пристрою. Перевагою запропонованої конструкції є її простота та технологічність виготовлення в умовах дослідного виробництва.

Враховуючи складність одночасного забезпечення теплових вимог та вимог до компактності системи охолодження з мінімальною масою на основі ребристих радіаторів, актуальним є проведення попередніх робіт з оптимізації її конструкції з використанням комп'ютерного моделювання. А це своєю чергою вимагає наявності верифікованих комп'ютерних моделей, здатних забезпечувати швидкі теплові розра-

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України (проект № 2023.04/0055)

хунки з мінімальною похибкою. Для верифікації цих моделей необхідно мати експериментальні дані щодо температурних режимів радіатора в широкому діапазоні зміни факторів впливу.

Метою цієї роботи є експериментальне дослідження температурних режимів радіатора, виготовленого з серійного алюмінієвого радіаторного профілю, в умовах природної конвекції повітря в широкому діапазоні зміни теплової потужності та за різної орієнтації його у просторі, а також різного розташування нагрівача по висоті радіатора, які необхідні для створення та верифікації комп'ютерної моделі радіатора системи охолодження потужного світлодіодного освітлювального пристрою.

Експериментальний стенд

Для проведення експериментальних досліджень було створено спеціальний експериментальний стенд, загальний вигляд якого представлено на **рис. 1**.

Базовою основою стенда є камера 1 природної конвекції, в робочому просторі якої встановлено робочу ділянку 2. Розмір робочого простору камери $1200 \times 760 \times 400$ мм. Для організації вільного протікання повітря та запобігання впливу протягів чи інших чинників верхня кришка та дно камери виконані перфорованими, в той час як бокові стінки — суцільними (на рис. 1 камера показана зі знятою передньою стінкою). Ззовні камери розташовано блоки живлення та вимірювальне обладнання, під'єднане до персонального комп'ютера (на рис. 1 не показаний). Блоки живлення дозволяли подавати на нагрівач робочої ділянки електричну потужність до 200 Вт.

Зовнішній вигляд робочої ділянки показано на **рис. 2**. Її основою є радіатор, виконаний з серійного радіаторного профілю. Матеріал — АД31Т5. Маса радіатора — 1,9586 кг.

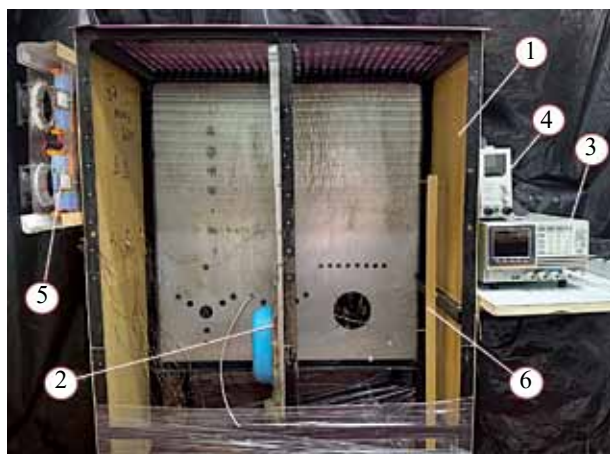


Рис. 1. Загальний вигляд експериментального стенда: 1 — камера природної конвекції; 2 — робоча ділянка; 3 — блок живлення GW Instek PSB-1800M; 4 — блок постійного струму Manson NSP-3630; 5 — система вимірювання температури; 6 — кронштейн з термопарами для вимірювання температури повітря в робочому просторі камери

Геометричні параметри радіатора:

Ширина	188 мм
Висота	38 мм
Довжина	300 мм
Товщина основи	5 мм
Висота ребер	33 мм
Кількість ребер	16 шт.
Крок ребер	12 мм
Товщини ребра біля основи	3,4 мм
Товщини ребра біля вершини	2,1 мм
Товщини двох крайніх ребер	5,0 мм
Кількість міжреберних каналів	15 шт.
Площа теплообмінної ребреної поверхні	0,3468 м ²

Крім радіатора, робоча ділянка містить електричний нагрівач, що складається з двох однакових частин з загальною максимальною електричною потужністю 200 Вт, та засоби теплоізоляції. Електричний нагрівач виконує роль теплового імітатора світлодіодних матриць освітлювального пристрою. В зоні контакту між нагрівачем та основою радіатора використовували теплопровідну пасту з теплопровідністю $4,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ з товщиною шару не більше 0,5 мм. Для зведення теплових втрат до мінімуму основу та поверхню нагрівача вкривали шаром базальтового матеріалу товщиною 10 мм, а область нагрівача додатково була закрита посудиною-термосом з вакуумованими стінками.

Для вимірювання температурного поля радіатора на ньому було встановлено 52 датчики — мідь-константанові термопари з розміром спаїв $0,4 - 0,5$ мм (**рис. 3**). Термопари під'єднували до аналогово-цифрових перетворювачів типу



Рис. 2. Робоча ділянка з центральним розташуванням нагрівача на основі радіатора: а — вид з боку основи та з боку ребер відповідно; б — вид з боку основи з встановленою теплоізоляцією 1 — радіатор; 2 — нагрівач; 3 — датчики температури; 4 — шар базальтової теплоізоляції; 5 — посудина-термос з вакуумованими стінками

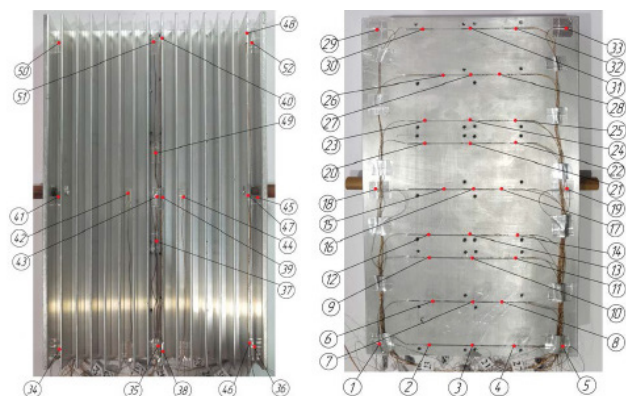


Рис. 3. Схема розташування термопар з боку ребер та з боку основи

ICP Con I-7018, що термостабілізувалися за допомогою вентиляторів. Їх живлення здійснювалось від блока постійного струму Manson NSP-3630. Перетворювач інтерфейсів типу I-7520 системи модулів збору даних з'єднувався з комп'ютером за допомогою інтерфейсу RS232/USB.

Методика експериментальних досліджень

Для проведення експериментів робочу ділянку розміщували в камері з природною конвекцією, а радіатор закріплювали за допомогою двох теплоізоляційних втулок в бічних вертикальних кронштейнах камери, які дозволяли встановлювати радіатор під певним заданим кутом нахилу.

Вплив теплової потужності на температуру в зоні нагріву радіатора $T_{\text{ЗН}}$ та на зовнішній коефіцієнт теплообміну $\alpha_{\text{пр}}$ в умовах природної конвекції вивчали при вертикальній орієнтації радіатора й при центральному розташуванні нагрівача на радіаторі (див. рис. 2, а). Електричну потужність нагрівача змінювали в діапазоні від 50 до 150 Вт з кроком 50 Вт. При цьому густина теплового потоку в зоні нагріву радіатора змінювалась від 0,5 до 1,5 Вт/см² з кроком 0,5 Вт/см².

Для визначення впливу кута нахилу радіатора на його температурні характеристики проводили серію експериментів для різних положень радіатора. Спочатку радіатор встановлювали у вертикальне положення (кут нахилу $\varphi = 90^\circ$, рис. 4, а). На нагрівач подавали певне, наперед визначене, значення теплової потужності, яке становило 50 Вт. Після встановлення стаціонарного теплового режиму радіатора записували значення температур в контрольних точках. Режим вважався стаціонарним, коли зміна температури в місцях встановлення термопар не перевищувала 0,5°C за 10 хв. Під час проведення експериментів середня температура повітря в камері становила $23 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Температура в контрольних точках вимірювалась в реальному часі та відображалася на персональному комп'ютері за допомогою програмного забезпечення EZ Data Logger. Далі встановлюва-

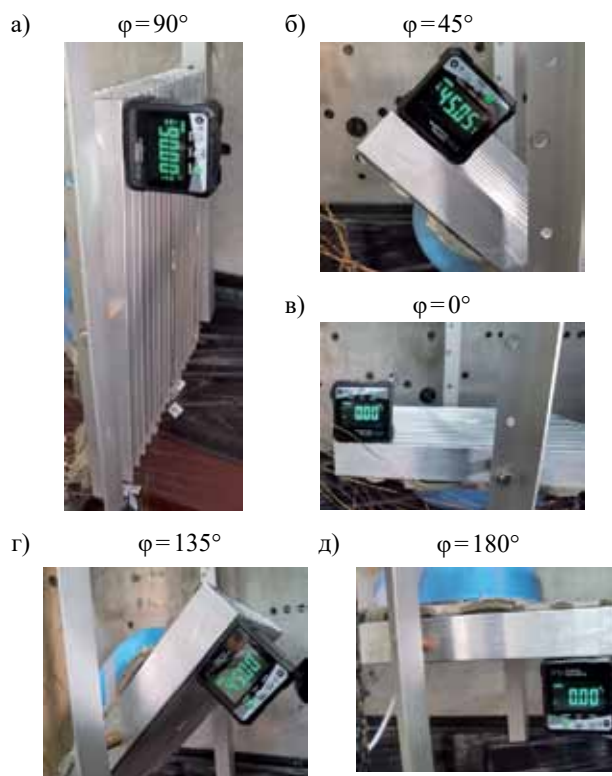


Рис. 4. Орієнтація радіатора при різних кутах нахилу до горизонту

ли нове значення електричної потужності нагрівача 100 Вт, і цикл вимірювань температурного поля радіатора повторювали.

Після завершення першої серії експериментів та охолодження радіатора до температури навколишнього повітря проводили ще чотири аналогічні серії експериментів при різних кутах нахилу радіатора до горизонту (див. рис. 4, б–д), який контролювали за допомогою електронного кутоміра.

Для оцінки впливу розташування нагрівача на температурні характеристики радіатора аналогічні експериментальні дослідження повторювали для його положення зверху та знизу основи (рис. 5).

За отриманими даними будували графічні залежності температури в зоні нагріву $T_{\text{ЗН}}$ та коефі-

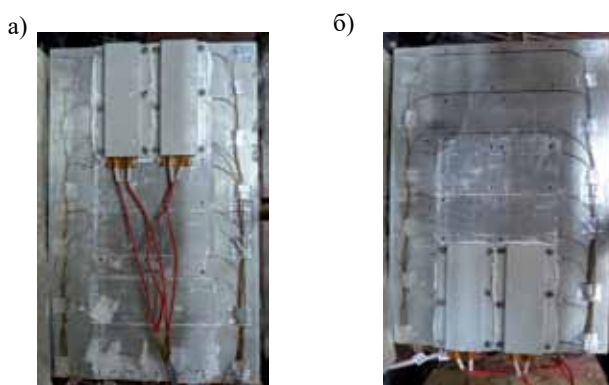


Рис. 5. Розташування нагрівача зверху (а) та знизу (б) радіатора

цієнту теплообміну $\alpha_{\text{пр}}$ від досліджених факторів в умовах природної конвекції з поверхні радіатора. Температуру в зоні нагріву визначали як середнє значення температур в дев'яти контрольних точках на основі радіатора безпосередньо під нагрівачем. При розрахунках коефіцієнта теплообміну з поверхні радіатора тепловою потужністю вважали сумарне значення електричної потужності P нагрівача.

Результати експериментальних досліджень

Вплив потужності нагрівача P на температуру в зоні нагріву радіатора та на зовнішній коефіцієнт теплообміну продемонстровано на **рис. 6**. Як видно з рис. 6, *а*, зі збільшенням P від 50 до 150 Вт температура $T_{\text{ЗН}}$ збільшується від 60 до 108 °С. Темп цього збільшення поступово сповільнюється в міру підвищення потужності. Значення температури в зоні нагріву, прийнятне для надійної роботи світлодіодних матриць, становить 80–83 °С, що досягається в цьому випадку за електричної потужності 90–100 Вт.

Характер залежності коефіцієнта теплообміну $\alpha_{\text{пр}}$ від електричної потужності нагрівача (рис. 6, *б*) аналогічний залежності від неї температури. Збільшення коефіцієнта теплообміну від 4,1 до 5,2 Вт/(м²·°С) обумовлено зміною теплофізичних властивостей повітря в міжреберних каналах при підвищенні температури радіатора.

Вплив кута нахилу радіатора на температуру в зоні нагріву та на зовнішній коефіцієнт теплообміну при двох значеннях потужності можна побачити на **рис. 7**. Як видно, найнижча температура $T_{\text{ЗН}}$ та найвище значення $\alpha_{\text{пр}}$ спостерігаються, як і очікува-

лось, при вертикальній орієнтації радіатора ($\varphi = 90^\circ$, рис. 4, *а*). Найвища ж температура $T_{\text{ЗН}}$ та найнижче значення $\alpha_{\text{пр}}$ спостерігаються при горизонтальній орієнтації радіатора з розташуванням ребер донизу ($\varphi = 180^\circ$, рис. 4, *д*), що обумовлено найгіршими умовами для виходу нагрітого повітря з міжреберних каналів і доступу туди охолоджувального повітря. Величини цих параметрів при трьох інших кутах нахилу (0° , 45° , 135°) відрізняються між собою несуттєво і лежать між відповідними значеннями при $\varphi = 90^\circ$ та $\varphi = 180^\circ$.

При цьому з рис. 7, *а* можна побачити, що зі збільшенням потужності нагрівача сильніше проявляється вплив орієнтації радіатора на його температуру в зоні нагріву. Якщо при вертикальному положенні радіатора ($\varphi = 90^\circ$) при збільшенні потужності з 50 до 100 Вт вона зростає на 27,3% (з 55 до 70 °С), то при горизонтальному положенні з орієнтацією ребер донизу ($\varphi = 180^\circ$, рис. 4, *д*) це зростання складає вже 50,7% (з 73 до 110 °С). У таких випадках для покращення відведення нагрітого повітря іноді підрізають ребра таких радіаторів або використовують штирьові чи радіатори з конусною поверхнею основи. Можна також застосовувати конструкції, в яких орієнтація радіатора має незначне відхилення від горизонтальної, що покращує відведення повітря з міжреберного простору.

Щодо впливу потужності нагрівача на характер залежності коефіцієнта теплообміну $\alpha_{\text{пр}}$ від орієнтації радіатора. Як видно з рис. 7, *б*, цей вплив є, але він не такий суттєвий, як у випадку $T_{\text{ЗН}}$: збільшення потужності з 50 до 100 Вт при вертикальному поло-

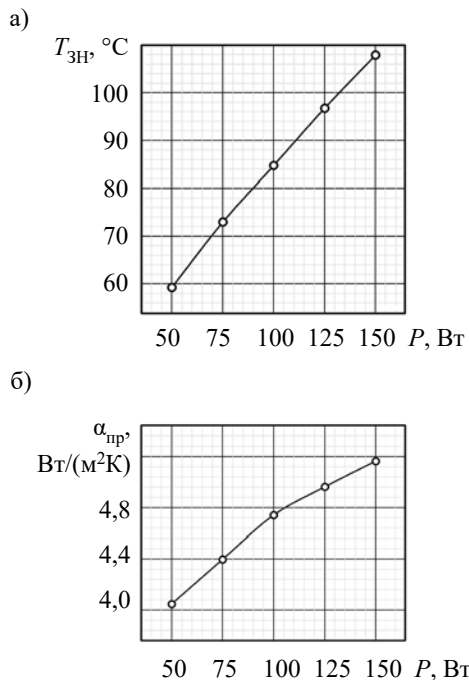


Рис. 6. Залежність температури $T_{\text{ЗН}}$ в зоні нагріву радіатора (*а*) та коефіцієнта теплообміну $\alpha_{\text{пр}}$ (*б*) від потужності нагрівача P

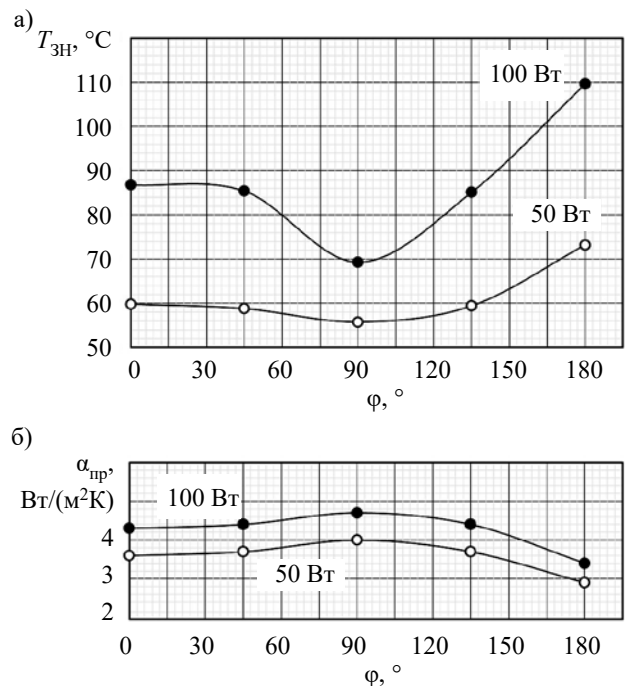


Рис. 7. Залежність температури $T_{\text{ЗН}}$ в зоні нагріву радіатора (*а*) та коефіцієнта теплообміну $\alpha_{\text{пр}}$ (*б*) від кута нахилу радіатора при значеннях потужності 50 та 100 Вт

женні радіатора призводить до збільшення $\alpha_{\text{пр}}$ на 20% (від 4,0 до 4,8 Вт/(м²·°C)), а при $\varphi = 180^\circ$ — на 17,2% (від 2,9 до 3,4 Вт/(м²·°C)).

Вплив розташування нагрівача на радіаторі на температуру в зоні нагріву показано на **рис. 8**. Найнижче значення $T_{\text{ЗН}}$ досягається при вертикальній орієнтації радіатора з розташуванням нагрівача в його центральній зоні: 56°C при 50 Вт та 69°C при 100 Вт. Переміщення нагрівача у нижню зону радіатора призвело до підвищення $T_{\text{ЗН}}$ на 2°C та 4°C, а переміщення у верхню — лише на 0,6°C та 2°C відповідно. З одного боку, розташування нагрівача зверху підвищує ефективність теплообміну завдяки інтенсивнішому нагріву його верхньої частини, а значить і більшій її температурі порівняно з нижньою частиною, що своєю чергою призводить до інтенсифікації природної конвекції. З іншого боку, треба забезпечувати оптимальне розташування нагрівача на радіаторі з урахуванням співвідношення їхніх розмірів. Це обумовлено необхідністю більш рівномірного прогріву всіх ребер радіатора, що характеризується ефективнішим використанням всієї поверхні радіатора.

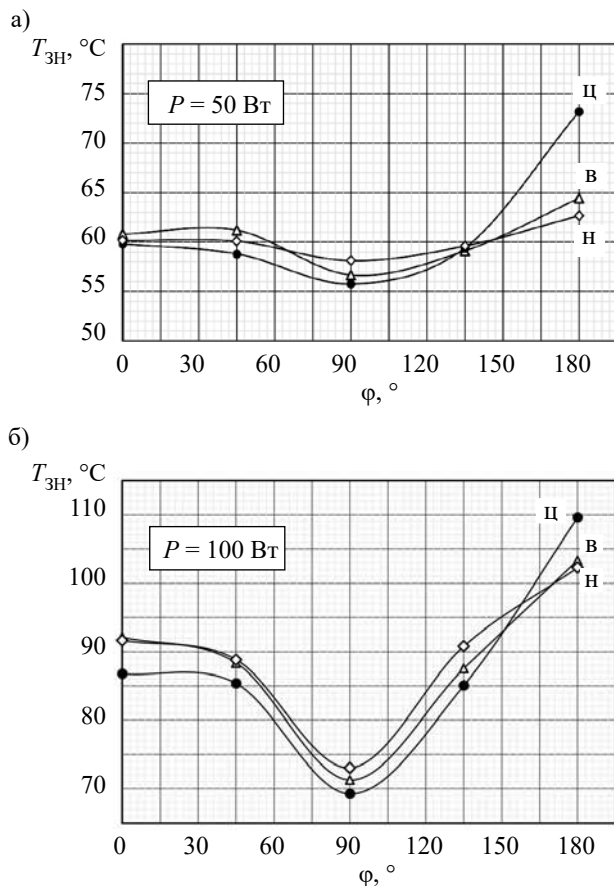


Рис. 8. Залежність температури $T_{\text{ЗН}}$ в зоні нагріву радіатора від кута нахилу радіатора при значеннях потужності 50 Вт (а) та 100 Вт (б) для трьох варіантів розташування нагрівача по висоті радіатора:

ц — у центрі; н — у нижній частині; в — зверху

Крім того, тут привертає увагу відмінність впливу положення нагрівача при розташуванні радіатора під кутом 180° від інших орієнтацій. У цьому випадку при розміщенні нагрівача у центрі радіатора досягається найбільша температура в зоні нагріву, на відміну від решти, де вона мінімальна. Вочевидь, це можна пояснити тим, що в найгірших умовах конвекції при $\varphi = 180^\circ$ (коли ребра радіатора направлені вниз, про що писалося вище) ефективніше розташовувати нагрівач на краю радіатора (зверху чи знизу). Тоді через нерівномірне температурне поле радіатора нагрітий повітряний потік може рухатись у межреберному просторі в напрямку меншої температури. Коли ж нагрівач розташовується у центрі, формуються фактично рівнозначні температурні умови з двох боків, і потік повітря блокується, що погіршує процес теплообміну при природній конвекції.

Звідси очевидно, що інженерні задачі з конструювання систем охолодження мають бути зосереджені не лише на визначенні оптимальної конструкції самого радіатора, а й місць розташування на його основі елементів, що виділяють тепло.

Порівняння результатів експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання

Результати експериментальних досліджень температурних параметрів радіатора були використані для верифікації комп'ютерної моделі, реалізованої в пакеті прикладних програм FloTHERM. Вона дозволяє проводити теплові розрахунки для умов природної конвекції повітря з урахуванням теплообміну випромінюванням у широкому діапазоні температури та при різному розташуванні радіатора.

Порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними проводилось за значеннями температури в контрольних точках. Результати верифікації (див., наприклад, **рис. 9**) показали достатній збіг розрахункових та експериментальних даних при зміні температури на радіаторі у діапазоні від 50 до 100 °C: похибка не перевищувала 3% при розташуванні радіатора під кутами $\varphi = 90^\circ$ та $\varphi = 45^\circ$ та до 5% при $\varphi = 0^\circ$.

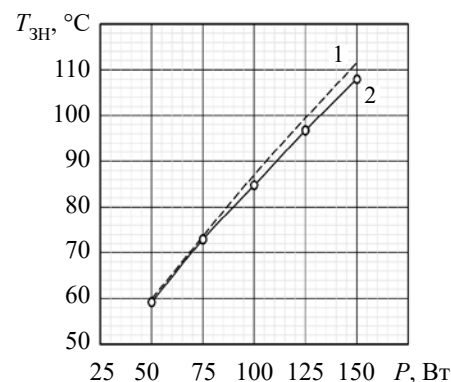


Рис. 9. Залежності температури радіатора в зоні нагріву $T_{\text{ЗН}}$ від потужності нагрівача P , отримані експериментально (1) та шляхом моделювання (2) при куті нахилу $\varphi = 90^\circ$

Висновки

Таким чином, за результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки.

1. Кут нахилу радіатора суттєво впливає на процеси теплообміну в умовах природної конвекції та відображає фізичні особливості тепломасообмінних процесів, що відбуваються над теплообмінною поверхнею радіатора та під нею. Нагріте повітря може вільно підійматися вгору при розташуванні радіатора з орієнтацією ребер вгору (кут нахилу $0^\circ \leq \varphi < 90^\circ$, див. рис. 4), на відміну від орієнтації ребер вниз ($90^\circ < \varphi \leq 180^\circ$), коли нагріте повітря, так би мовити, блокується — не в змозі опуститися вниз, воно рухається вздовж теплообмінної поверхні, а вгору підіймається вже за межами радіатора, що викликає збільшення температури зони нагріву.

2. Найбільш вигідним є розташування нагрівача в центральній зоні радіатора.

3. Результати верифікації підтвердили адекватність розробленої комп'ютерної моделі та можливість подальшого її застосування при проєктуванні системи охолодження потужного світлодіодного освітлювального пристрою.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. *Прожектор пошуковий мобільний ДО-175-223-АТ*. Атілос. <https://surl.li/dfszzm>
2. *Прожектор світлодіодний мобільний ПСМП-250W*. <https://svetiled.com.ua/p/1650638636-prozhektor-svetodiodnyy-mobilniy-psmp-250w/>
3. Li Z., Tan J., Li J. et al. A review on thermal management of light-emitting diodes: From package-level to system-level. *Appl. Therm. Eng.*, 2024, vol. 257, art. 124145. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124145>
4. Письменний Є.М., Ніколаєнко Ю.Є., Хайрмасов С.М. та ін. *Потужний світлодіодний освітлювальний пристрій*. Патент України на корисну модель № 15943. 2025, бюл. № 22.
5. Хайрмасов С.М., Ніколаєнко Ю.Є., Хоперський С.В. та ін. *Потужний світлодіодний освітлювальний пристрій для використання під час виконання аварійно-рятувальних робіт. Збірник наукових праць МНПК «Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері гуманітарного розминування, цивільного захисту, критичної інфраструктури та екологічної безпеки для повноцінного відновлення України»*. Україна, Київ, 2024, с. 37–39.

Дата надходження рукопису
до редакції 30.05 2025 р.

DOI: 10.15222/TKEA2025.1-2.51
UDC 536.248.2

Dmytro KOZAK¹, Yurii NIKOLAENKO¹, Sergii KHAIRNASOV¹,
Roman MELNYK¹, Demyd PEKUR²

Ukraine, Kyiv, ¹Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,
²V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine
E-mail: dk.kpi.hp@gmail.com; yunikola@ukr.net

RADIATOR TEMPERATURE REGIMES FOR THE COOLING SYSTEM OF A POWERFUL LED LIGHTING DEVICE

High-power lighting devices based on LED sources are the most effective solution for the lighting at emergency rescue operations in emergency zones. At the same time the challenges with thermal management of COB LED elements becomes more significant, since an increasing of electric power leads to increase heat flux and LED die temperature which negatively affects their reliability and light characteristics. One of the ways to solve this problem is to use highly efficient two-phase heat transfer devices for the cooling systems — gravity-assisted heat pipes, built into the base of several aluminum heatsinks. The authors carried-out an experimental study of the temperature regimes of the aluminum heatsink at air natural convection taking into account the following factors: thermal power, environment orientation, different locations of the heat source relative to the height of the heatsink. The results of experimental studies of the heatsink temperature parameters were used to verify the computer model. It allows to use the developed computer model for thermal simulation and heat sink design optimization at air convection conditions taking into account radiation heat transfer in a wide temperature range and with different heatsink locations. The comparison of experimental data with simulation results confirmed the adequacy of the computer model and the possibility of its application for the design of a cooling system based on gravity-assisted heat pipes of the lighting device.

Keywords: LED lighting device, cooling system, natural convection, radiator, heat transfer, temperature regime, experiment, computer modeling.

REFERENCES

1. *LED Spotlight DO-175-223-AT*. <https://surl.li/dfszzm>
2. *Mobile LED spotlight ПСМП-250W*. <https://svetiled.com.ua/p/1650638636-prozhektor-svetodiodnyy-mobilniy-psmp-250w/>
3. Li Z., Tan J., Li J. et al. A review on thermal management of light-emitting diodes: From package-level to system-level. *Appl. Therm. Eng.*, 2024, vol. 257, art. 124145. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124145>
4. Pysmennyi Ye.M., Nikolaenko Yu. E., Khairnasov S. M. et al. [A powerful LED lighting device]. Pat. of Ukraine for utility model № 15943. 2025, bull. № 22. (Ukr)
5. Khairnasov S. M., Nikolaenko Yu. E., Hoppersky S. V. et al. A powerful LED lighting device for use in rescue operations. *Collection of scientific works International scientific and practical conference "Current Issues and Innovative Technologies in Humanitarian Demining, Civil Protection, Critical Infrastructure and Environmental Security for Post-War Reconstruction of Ukraine"*, Ukraine, Kyiv, 2024, pp. 37–39. (Ukr)



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee: Politekhperiodika, Odesa, Ukraine. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).