

УДК 536.248.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/27>**Ніколаєнко Ю.Є.**

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

Хайрнасов С.М.

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

Хоперський С.В.

НГО «Асоціація фахівців цивільного захисту»

Сорокін В.М.

Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова
Національної академії наук України

Пекур Д.В.

Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова
Національної академії наук України

Козак Д.В.

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

Ковальов О.С.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту
Державної служби України з надзвичайних ситуацій

РОЗРОБКА НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОТУЖНОГО СВІТЛОДІОДНОГО ОСВІТЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ НА ОСНОВІ ДВОФАЗНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Освітлення зон виникнення надзвичайних ситуацій або режимних територій в темний час є актуальним завданням, оскільки від нього залежить збереження людського життя та безпека суспільства. Дана стаття присвячена вирішенню проблеми створення потужного світлодіодного освітлювального пристрою, призначеного для застосування в зонах виникнення надзвичайних ситуацій та для можливого оснащення ним спеціальної техніки, що використовується для охорони державного кордону, з метою підвищення ефективності освітлення територій та виявлення об'єктів на великій відстані. Враховуючи високі вимоги по надійності та технологічності до освітлювальної техніки спеціального призначення, розроблення вітчизняних потужних світлодіодних освітлювальних пристроїв, що відповідають цим вимогам, є важливою та актуальною задачею. У статті розкрито особливості нової конструкції та принцип роботи такої системи охолодження. Відзначено, що більше 60 % електричної енергії, яку споживають сучасні потужні світлодіодні матриці, перетворюється у теплоту, що підвищує їх температуру та знижує надійність роботи і відповідно вимагає застосування високоефективних систем охолодження на основі двофазних технологій. У статті наведено результати розробки системи охолодження світлодіодного освітлювального пристрою з електричною потужністю не менше 500 Вт, побудованої на основі алюмінієвих радіаторів з вмонтованими під кутом гравітаційними тепловими трубами з різьбовим випарником. Визначено, що використання запропонованої конструкції може забезпечити розсіювання до 360 Вт теплоти за рахунок природної конвекції у навколишнє середовище при забезпеченні максимальної температури на корпусі світлодіодної матриці не більше 100 °С. Така конструкція системи охолодження має високу надійність, забезпечує тривалу безумну автономну роботу освітлювального пристрою з живленням від акумуляторної батареї і дозволяє проводити періоди тиші для прослуховування звуків з під завалів. Встановлено, що перевагою запропонованої конструкції є її простота та технологічність виготовлення в умовах досвідного виробництва.

Ключові слова: освітлювальний пристрій, світлодіодна матриця, система охолодження, тепла труба, теплообмін, моделювання.

Постановка проблеми. Освітлювальні пристрої є критичними засобами для проведення в темний час доби аварійно-рятувальних робіт та інших невідкладних дій в зоні виникнення надзвичайних ситуацій, оскільки потрібно забезпечити достатньо високий рівень освітленості в продовж всього часу виконання робіт. Іншою важливою сферою застосування освітлювальних пристроїв є оснащення ними спеціальної техніки, призначеної для охорони кордону, що дозволить освітлювати прикордонну територію з необхідним рівнем освітленості та виявляти об'єкти на великій відстані. Тому, створення нового вітчизняного більш потужного освітлювального пристрою на основі енергоефективних світлодіодних джерел світла провідних компаній світу є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання енергоефективних світлодіодних джерел світла на основі GaN [1, с. 2217, с. 2218] дозволяє підвищити рівень освітленості та створювати потужні освітлювальні пристрої широкого призначення [2, с. 1]. В той же час, біля 60 % електричної енергії, яку споживають сучасні світлодіодні COB (Chip-on-board) матриці, перетворюється у теплоту, що підвищує їх температуру та знижує надійність [3, с. 777, с. 778] та світлову ефективність [4, с. 2]. Тому створення нового вітчизняного потужного світлодіодного освітлювального пристрою, що характеризується значним тепловиділенням та високим значенням густини теплового потоку, потребує вирішення задачі забезпечення заданих температурних режимів. Одним з шляхів вирішення цієї задачі є використання в системі охолодження двофазних теплопередавальних пристроїв (термосифонів [5], теплових труб [6], парових камер [7], тощо), ефективна теплопровідність яких на порядки перевищує теплопровідність металів [8, с. 2], що дозволить відвести та розосередити на більшу поверхню теплообміну значні локальні теплові потоки.

На даний час відомо використання під час виконання аварійно-рятувальних робіт світлодіодних освітлювальних пристроїв у вигляді світлодіодних стаціонарних прожекторів [2, с. 1; 9, с. 1]. Прожектор пошуковий мобільний ДО-175-223-АТ [9, с. 1] вітчизняного виробництва має невелику потужність 175 Вт, світловий потік 21525 лм. Він розрахований на підключення до джерела постійного струму номінальної напруги 12 В. Прожектор складається з безпосередньо прожектора зі світлодіодними джерелами світла компанії Cree в кількості 30 одиниць та триноги – металевого штатива для встановлення на горизонтальній пло-

щині. Значення корельованої колірної температури знаходиться в межах від 3750 К до 4250 К. Значення індексу кольоропередачі не менше 70. Перевагами є пасивна система охолодження, що забезпечує можливість безшумної роботи, та можливість автономної роботи від джерела живлення з напругою 12 В.

Більш потужний світлодіодний стаціонарний прожектор далекого світла ПСМЧ-250 побудовано на основі 4 світлодіодних матриць загальною потужністю 250 Вт з світловим потоком 27500 лм [2, с. 1]. Прожектор спеціального призначення ПСМЧ-250 виконано у вигляді циліндра діаметром 170 мм довжиною 270 мм, закріпленого на каркасі з можливістю зміни кута нахилу. Чотири потужні матриці у парі з лінзою 120 градусів дають широкий засвіт прилеглої території. Значення індексу кольоропередачі – більше 80, колірної температури – від 3000 К до 6000 К. Конструкція прожектора передбачає встановлення його на спеціальні транспортні засоби, типу пожежних машин та ін. Для підвищення освітленості території відомо встановлення на одній пожежній машині поряд двох таких прожекторів. Живлення прожектора здійснюється від джерела з номінальною напругою 220 В. Тепловий режим COB матриць забезпечується активним повітряним охолодженням за допомогою вбудованого вентилятора, що створює певний додатковий рівень акустичного шуму та зменшує надійність.

Сучасні світлодіодні COB матриці провідних виробників світу: Citizen (Японія), Samsung (Південна Корея), Cree (США) на сьогодні вже мають загальну потужність 200–500 Вт, що дозволяє побудувати нові, більш потужні, вітчизняні світлодіодні освітлювальні пристрої. Однак, при цьому першочерговим завданням є створення нових, більш ефективних, систем охолодження потужних світлодіодних COB матриць.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення конструкції системи охолодження для вітчизняного світлодіодного освітлювального пристрою з більшою щонайменше вдвічі електричною потужністю (більше 500 Вт) та світловим потоком більше 55000 лм, здатного автономно та надійно працювати протягом не менше 5 годин при температурі навколишнього середовища від -30 °С до +40 °С без застосування активних систем охолодження.

Виклад основного матеріалу. Для забезпечення надійної роботи освітлювального пристрою з підвищеною тепловою потужністю перспективним є використання систем охолодження

COB матриць на основі двофазних теплопередавальних пристроїв (теплових труб, термосифонів та парових камер), передача теплоти в яких здійснюється за рахунок замкнутого випарувально-конденсаційного циклу теплоносія. Завдяки цьому, їхня ефективна теплопровідність перевищує теплопровідність міді більше, ніж на порядок. Принцип роботи теплової труби (ТТ) показано на рис. 1, на якому стрілками показано підведення та відведення теплоти. Використання ТТ з підвищеною ефективною теплопровідністю для передачі теплоти з мінімальним тепловим опором від потужних COB матриць до розвинених теплообмінних поверхонь, розташованих в конструктивно зручному місці, дозволяє підвищити ефективність системи охолодження. Даний принцип було покладено в основу нової конструкції системи охолодження світлодіодного освітлювального пристрою спеціального призначення.

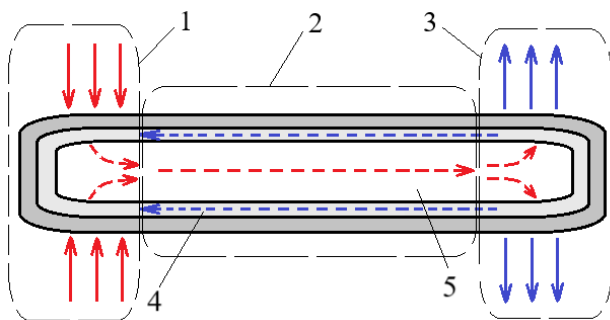


Рис. 1. Схема передачі теплоти за допомогою теплової труби: 1 – зона нагріву (випаровування); 2 – зона транспорту; 3 – зона охолодження (конденсації); 4 – капілярно-пориста структура; 5 – паровий простір

Нова конструкція системи охолодження потужного світлодіодного освітлювального пристрою на основі ТТ. Для використання в системі охолодження нового потужного світлодіодного освітлювального пристрою (рис. 2) було обрано найбільш просту та технологічну у виготовленні в умовах дослідного виробництва конструкцію ТТ – гравітаційну ТТ. З метою збільшення кількості центрів пароутворення і інтенсифікації процесу кипіння теплоносія всередині ТТ на внутрішній поверхні корпусу ТТ в зоні випаровування виконано різьбові канавки з дрібним кроком (0,5 мм). Потужний світлодіодний освітлювальний пристрій містить опорну основу 1 з підтримуючим елементом 2, світлодіодне джерело світла 3, встановлене на монтажній пластині 4 з теплопровідного матеріалу (алюмінію або міді), та двофазні теплопередавальні елементи, виконані у вигляді прямих гравітаційних ТТ 5, наприклад,

циліндричної форми, які можуть біти виконані з міді або алюмінію. Гравітаційні ТТ 5 розміщені по обидві бокові сторони від світлодіодного джерела світла 3 та приєднані з забезпеченням теплового контакту одним своїм кінцем до монтажної пластини 4 з світлодіодним джерелом світла 3. Світлодіодне джерело світла 3 складається з чотирьох світлодіодних COB матриць типу CITIZEN CLU05Q з максимальною електричною потужністю кожного до 300 Вт. Іншим кінцем ТТ 5 приєднані з забезпеченням теплового контакту до групи бічних теплообмінників 6. Бічні теплообмінники 6 та підтримуючий елемент 2 виконано у вигляді відрізків серійного алюмінієвого радіаторного профілю з прямими вертикальними ребрами 7 на одній стороні та канавками напівциліндричної форми під гравітаційні ТТ 5 на другій, пласкій, стороні основи 8. Пласка частина підтримуючого елемента 2 покриває частини ТТ в області монтажної пластини з світлодіодним джерелом світла з забезпеченням теплового контакту, завдяки введенню в контактні зони шару теплопровідної пасти та механічного скріплення підтримуючого елемента 2 з монтажною пластинною 4. Нижня і верхня грані груп радіаторних профілів бічних теплообмінників 6, канавки під ТТ та ТТ 5 розташовано під кутом φ нахилу до горизонту з перевищенням зони конденсації над зонами випаровування. При цьому значення кута φ нахилу обрано 20° . Зони конденсації гравітаційних ТТ 5 розташовано в канавках напівциліндричної форми в зустрічно орієнтованих пласких частинах кожних двох серійних радіаторних профілів кожної групи бічних теплообмінників 6 з прямими вертикальними ребрами 7 (див. рис. 2(в)) та механічно закріплено між радіаторними профілями шляхом стягування їх між собою за допомогою гвинтів 9. При цьому забезпечення теплового контакту між ТТ та радіаторними профілями здійснено за допомогою теплопровідної пасти. Навколо світлодіодного джерела світла 3 встановлено рефлектор 10 для формування та спрямування світлового потоку в заданому напрямку.

Робота запропонованої системи охолодження потужного світлодіодного освітлювального пристрою на основі ТТ. При подачі електричного живлення з заданими параметрами на світлодіодне джерело світла 3 значна частина електричної енергії, що споживається, перетворюється в теплоту, що підвищує температуру напівпровідникових кристалів COB матриць та його теплопровідної основи. За рахунок надійного механічного та теплового контакту між теплопровідною осно-

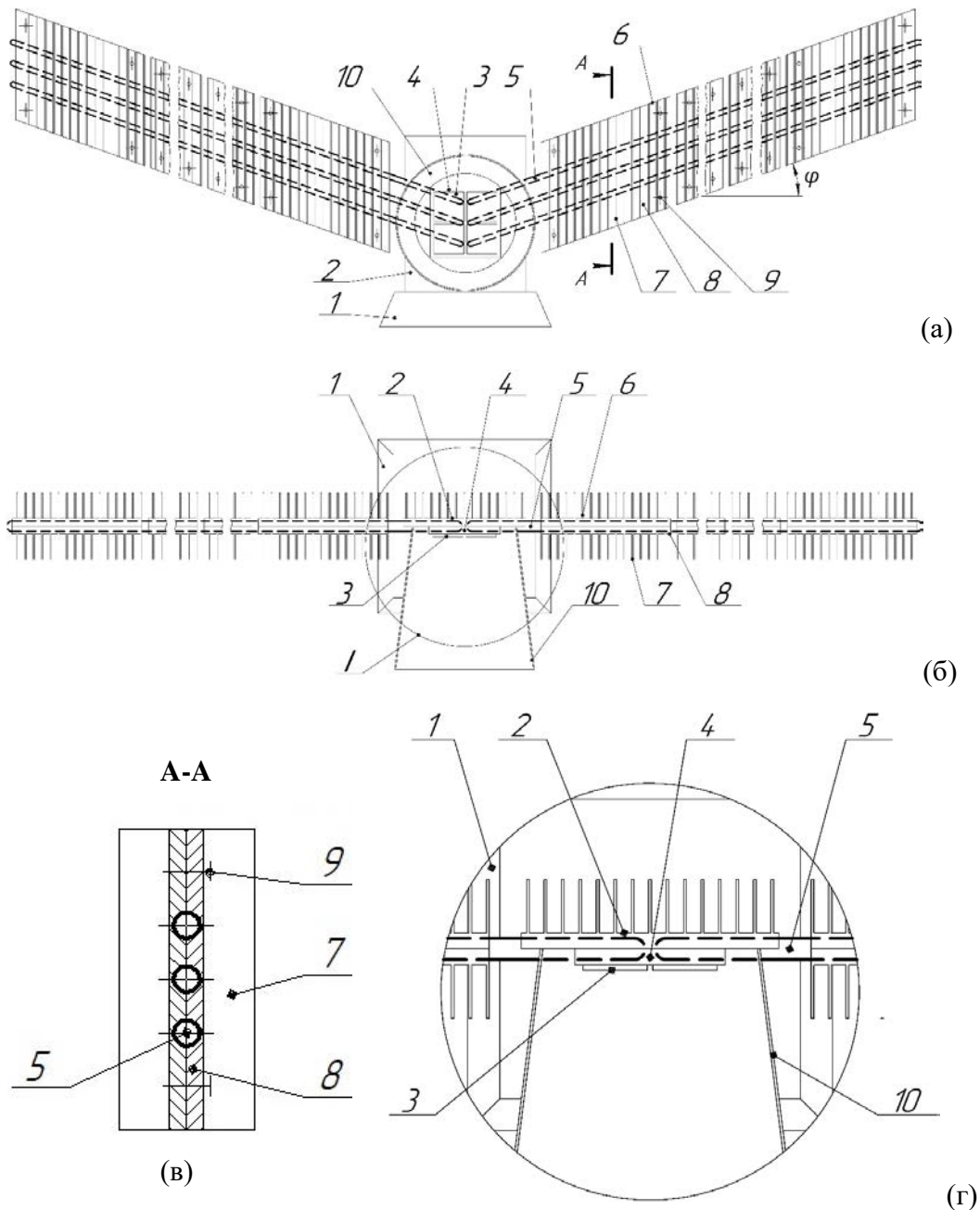


Рис. 2. Конструктивна схема потужного світлодіодного освітлювального пристрою: (а) – вид спереду; (б) – вид зверху; (в) – вид А-А, збільшено, закріплення ТТ в радіаторних профілях; (г) – вид I (збільшено), вузол з’єднання СОВ матриць з монтажною пластиною, тепловими трубами та підтримуючим елементом

вою світлодіодного джерела світла та монтажною пластиною 4 з вбудованими в неї зонами випаровування ТТ 5 та плоскою частиною підтримуючого елемента 2 у вигляді радіаторного профілю тепловий потік від СОВ матриць передається до монтажною пластиною 4, а від неї – до зон випаровування ТТ та теплообмінної поверхні ребер підтримуючого елемента 2. Рідкій теплоносії в зоні випаровування ТТ 5 закипає, поглинаючи підведену теплоту, а пара теплоносія рухається в більш

холодну зону конденсації, де конденсується і виділяє поглинену при пароутворенні теплоту, нагріваючи при цьому стінку ТТ в зоні конденсації. Повернення сконденсованого теплоносія із зони конденсації до зони випаровування при реалізації замкненого випаровувально-конденсаційного циклу здійснюється за рахунок дії сили гравітації. Завдяки високій ефективності передачі теплоти замкненим випаровувально-конденсаційним циклом всередині гравітаційних ТТ 5,

виділена теплота від їхніх зон конденсації передається пласким теплопровідним основам 8 груп радіаторних профілів бічних теплообмінників 6 та їхнім вертикальним ребрам 7 і ефективно відводиться в оточуюче повітря вільною конвекцією, що сприяє зменшенню температури напівпровідникових кристалів СОВ матриць та забезпечує надійну роботи освітлювального пристрою.

Ефективність запропонованої системи охолодження. На етапі розробки конструкції ефективність запропонованої системи охолодження оцінювалась методом комп'ютерного моделювання в програмному пакеті Flotherm.

При оцінці враховувались наступні основні вхідні дані:

1. Максимально-допустима температура на поверхні корпусу СОВ матриці 100 °С.

2. Сумарний тепловий потік: 1) 360 Вт (72% від максимальної електричної потужності, яка дорівнює 500 Вт, що відповідає рекомендаціям більшості виробників СОВ матриць (від 70% до 75%)); 2) 300 Вт (60% від максимальної електричної потужності, яка дорівнює 500 Вт, що відповідає результатам додаткових проведених досліджень визначення оптичної ефективності).

3. Габарити однієї СОВ матриці: 38 мм × 38 мм. До складу конструкції системи охолодження входить 4 таких СОВ матриць.

В ході моделювання було проведено: верифікацію комп'ютерної моделі алюмінієвого радіатора при природній конвекції на основі даних додаткових експериментальних досліджень; аналіз існуючих алюмінієвих радіаторних профілів на ринку України і вибрано найбільш оптимальний з точки зору ефективності, маси та технологічності конструкції системи охолодження; оцінку впливу геометричних розмірів радіатора (співвідношення довжини та висоти); перевірку використання додаткових конструктивних підходів щодо підвищення ефективності природньої конвекції (наприклад, закритих каналів); оцінку впливу локальності теплопідводу та його розташування на основі радіатора; аналіз впливу коефіцієнту теплопровідності теплопровідного матеріалу в зонах контакту і його товщини, а також теплового опору теплових труб. На основі проведеного аналізу була запропонована базова конструкція системи охолодження у відповідності до рис. 2 з основними конструктивними характеристиками, що наведені у таблиці 1.

За результатами комп'ютерного моделювання було встановлено, що запропонована система охолодження дозволяє забезпечити температуру СОВ

матриць не вище +100°С при температурі навколишнього повітря +40°С, забезпечуючи відвід теплового потоку:

– 360 Вт при використанні 6 груп радіаторних профілів (по 3 групи в кожному бічному теплообміннику) при їх сумарній масі 12,3 кг;

– 300 Вт при використанні 4 груп радіаторних профілів (по 2 групи в кожному бічному теплообміннику) при їх сумарній масі 8,5 кг.

Висновки. Перевагами запропонованої конструкції вітчизняного потужного (500 Вт) світлодіодного освітлювального пристрою з системою охолодження на основі гравітаційних теплових труб з різьбовим випарником є спрощення та здешевлення конструкції при виготовленні його в сучасному дослідному виробництві при одночасному забезпеченні ефективного безшумного пасивного повітряного охолодження СОВ матриць з світловим потоком більше 55000 лм. Виготовлення ТТ і в цілому запропонованого потужного світлодіодного освітлювального пристрою може бути реалізовано в дослідному виробництві на існуючих промислових підприємствах з використанням існуючого технологічного обладнання без додаткових витрат на придбання спеціалізованого технологічного обладнання.

Таблиця 1

Основні конструктивні характеристики системи охолодження

Характеристики	Значення
Матеріал радіатора	алюміній
Ширина профілю радіатора (для однієї групи), мм	122
Висота радіатора, мм	200
Висота ребер радіатора, мм	31,5
Крок між ребрами, мм	8
Теплопровідність теплопровідного матеріалу між світлодіодним джерелом світла та монтажною пластиною, Вт/(м·°С)	15,0
Товщина шару теплопровідного матеріалу між світлодіодним джерелом світла та монтажною пластиною, мм	0,5
Теплопровідність теплопровідного матеріалу між тепловими трубами та монтажною пластиною чи радіатором, Вт/(м·°С)	4,6
Товщина шару теплопровідного матеріалу між тепловими трубами та монтажною пластиною чи радіатором, мм	0,8
Кількість теплових труб	8
Матеріал теплових труб	мідь
Діаметр теплових труб, мм	12
Тепловий опір теплових труб, °С/Вт	0,3

Робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України (проект № 2023.04/0055).

Список літератури:

1. S. Nakamura, M. R. Krames History of Gallium–Nitride-Based Light-Emitting Diodes for Illumination. *Proceedings of the IEEE*. 2013. Vol. 101(10). P. 2211–2220. DOI: 10.1109/JPROC.2013.2274929
2. Прожектор світлодіодний стаціонарний дальнього світла на 4 матриці 250 Вт 27500 Лм ПСМЧ-250. https://vash-market.com.ua/p1835654888-prozhektor-svetodiodnyj-statsionarnyj.html?srsltid=AfmBOopt2veIoOhGACc8QFt-5Wu4gzweELbdeXmzx_mY3wjq_DDOB7mY
3. Chang, M.-H., Das D., Varde P. V., Pecht M. Light emitting diodes reliability review. *Microelectron. Reliab.* 2012. Vol. 52(5). P. 762–782. DOI: 10.1016/j.microrel.2011.07.063
4. L. Xiang, Y. Cheng, X. Yu, Y. Fan, X. Yang, X. Zhang, B. Xie, X. Luo. Highperformance thermal management system for high-power LEDs based on double-nozzle spray cooling, *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 231. Art. 121005. P.1–10. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121005>
5. A. Elkholly, R. Kempers. A Compact Integrated Thermosyphon Heat Sink for Power Electronics Cooling. *Proc. of the ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Vol. 8: Heat Transfer and Thermal Engineering. Salt Lake City, Utah, USA. November 11–14, 2019. V008T09A085. ASME. P. 1–9. <https://doi.org/10.1115/IMECE2019-11777>
6. S.U. Khalid, H. Babar, H. Ali, M.M. Janjua, M. Ali. Heat pipes: progress in thermal performance enhancement for microelectronics. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2021, Vol. 143, P. 2227–2243. DOI: 10.1007/s10973-020-09820-7
7. S. Chitnis, R. Dayal, A. Arora. Deployment of vapour chambers for electronic heat dissipation: state-of-the-art. *Proc IMechE Part C: J Mechanical Engineering Science*. 2022, Vol. 236(16). P. 9316–9340. DOI: 10.1177/09544062221091464
8. R. Wrobel, D. Reay. Heat pipe based thermal management of electrical machines – A feasibility study. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 2022. Vol. 33. Art. 101366. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101366>
9. “Прожектор ДО-175-223-АТ” 175 Вт, 21 500 Лм. <https://www.atilos.com.ua/ru/svetodiodnoe-osveshchenie/prozhektory-obshchego-naznacheniya/prozhektor-poiskovyj-mobilnyj.html>

Nikolaenko Yu.E., Khairnasov S.M., Khoperskyi S.V., Sorokin V.M., Pekur D.V., Kozak D.V., Kovalev O.S. DEVELOPMENT OF A NEW DESIGN OF COOLING SYSTEM BASED ON TWO-PHASE TECHNOLOGIES FOR A HIGH-POWER LED LIGHTING DEVICE

Illumination of emergency situations or regime territories in the dark time is an urgent task, since the preservation of human life and the safety of society depend on it. This article is devoted to solving the problem of creating a high-power LED lighting device, which is intended to use in areas of emergency situations and to equip of special equipment used for the protection of state border; with the aim to increase the efficiency of lighting areas and detecting objects at a long distance. Considering the high reliability and manufacturability requirements for special-purpose lighting equipment, the development of domestic high-power LED lighting devices that meet these requirements is an important and urgent task. The article describes the features of the new design and the principle of operation of such a cooling system. It is noted that more than 60% of the electrical energy of modern high-power LED matrices is converted into heat, which increases their temperature and reduces the reliability and, accordingly, requires the use of highly efficient cooling systems based on two-phase technologies. The article presents the design results of an LED lighting device cooling system with an electrical power at least 500 W, built on the basis of aluminum heatsinks with integrated gravity-assisted heat pipes with a threaded evaporator. It was determined that the use of the proposed design can ensure the heat dissipation up to 360 W by the natural convection to the environment while ensuring the maximum temperature on the LED matrix cases not more than 100°C. This design of the cooling system has high reliability, ensures long-term silent autonomous operation of the lighting device powered by a battery and allows for periods of silence to listen to sounds from under rubble. It was established that the advantage of the proposed design is its simplicity and manufacturability in experimental production conditions.

Key words: lighting device, LED matrix, cooling system, heat pipe, heat exchange, modeling.