

Д. В. ПЕКУР¹, д. т. н. Ю. Є. НИКОЛАЄНКО², д. т. н. В. М. СОРОКІН¹

Україна, м. Київ, ¹Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: demid.pekur@gmail.com, yunikola@ukr.net, vsorokin@isp.kiev.ua

НОВА КОНСТРУКЦІЯ СВІТЛОДІОДНОГО СВІТИЛЬНИКА З ТЕПЛОВИМИ ТРУБАМИ

Запропоновано нову систему охолодження з тепловими трубами для забезпечення нормального теплового режиму світлодіодного джерела освітлення, яке можна використовувати у приміщеннях з низькими стелями. Дослідження системи проводились за допомогою комп'ютерного моделювання. Вони показали, що за потужності світильника 300 Вт температура основи в місці приєднання джерела світла не перевищує 67,6°C. За використання в зоні контакту шару теплопровідної пасти з коефіцієнтом теплопровідності 8,7 Вт/(м·°C) товщиною 0,1 мм це відповідає температурі корпусу 70,0°C. Якщо тепловий опір джерела світла становить 0,1°C/Вт, температура його напівпровідникових кристалів становитиме 100°C, що суттєво нижче припустимого значення температури, яке дорівнює 150°C. Загальний тепловий опір системи охолодження становить 0,159°C/Вт.

Ключові слова: світлодіодний світильник, тепла труба, система охолодження, комп'ютерне моделювання.

Проблема зміни клімату ставить перед людством задачу зменшення шкідливих викидів в атмосферу. Основною причиною збільшення шкідливих викидів та парникових газів в атмосфері є спалювання вугілля на теплових електростанціях з метою вироблення електричної енергії. Часткове вирішення цієї проблеми можливе за рахунок впровадження енергозберігаючих пристроїв та обладнання. Так, заміна традиційних джерел світла на більш ефективні світлодіодні може дозволити заощадити значну кількість електроенергії, що виробляється. З цієї метою в останні роки активно розробляються і впроваджуються світильники, які споживають значно менше електроенергії, ніж лампи розжарювання, за умов випромінювання однакового світлового потоку [1]. При цьому, однак, зі збільшенням потужності світлодіода зростає і кількість теплоти, що виділяється в його напівпровідниковому кристалі, що зі свого боку призводить до підвищення температури кристалу і зниження надійності його роботи, зміні світлових і колірних характеристик [2]. Тому при розробці конструкцій світлодіодних освітлювальних пристроїв питанням забезпечення нормального теплового режиму світлодіодних джерел світла приділяється особлива увага [3]. Особливо актуальною стає задача підвищення ефективності системи охолодження, якщо в світильниках використовуються потужні багатокристалні світлодіодні джерела світла, так звані COB-матриці, виготовлені на основі технології COB (chip-on-board — чіп на

платі) [4]. Так, наприклад, COB-матриця типу CITIZEN CLU058, містить 648 кристалів компанії Nichia на платі розмірами 38×38×1,4 мм і має потужність до 526 Вт [4].

З метою охолодження потужних світлодіодних джерел світла застосовуються різні засоби тепловідведення: на основі радіаторів [5, 6], термоелектричних охолоджувачів [7], п'єзоелектричних вентиляторів [8], струменевих охолоджувачів [9], рідинних систем охолодження [10] та теплових труб [11–14]. Використання теплових труб для охолодження потужних світлодіодів в [11] здійснюється в комплексі з плавлячою речовиною, в [12,13] — сумісно з радіатором, що охолоджується вільною конвекцією оточуючого повітря, в [14] — в комплексі з радіатором, що обдувається вентилятором.

Системи тепловідведення на основі теплових труб (ТТ) і радіаторів з вільною конвекцією повітря — прості у виготовленні, не потребують енерговитрат на переміщення теплоносія і найбільш придатні для застосування в світлодіодних світильниках, призначених для внутрішнього освітлення приміщень, зокрема в багаторіжкових люстрах. Так, наприклад, у відомій конструкції такого освітлювального пристрою [12] каркас складається з п'яти вертикально розташованих вигнутих теплових труб, які одночасно є системою тепловідведення. На ТТ знизу, у зоні випаровування, встановлено світлодіодні джерела світла — модулі на основі COB-матриць, розміщені всередині світлороз-

сіюючих плафонів. У зоні конденсації ТТ закріплено пластинчасті радіатори, що охолоджуються природною конвекцією оточуючого повітря. Теплота, що виділяється світлодіодними модулями, ефективно відводиться тепловими трубами на достатню відстань і розсіюється в навколишнє повітря за допомогою пластинчастих радіаторів. Температура світлодіодних COB-матриць за потужності об'ємного модуля 26,7 Вт не перевищує 56°C, що свідчить про ефективність такої системи охолодження.

Разом з тим, певним недоліком світлодіодного освітлювального пристрою [12] є значні розміри за висотою, що не дозволяє застосовувати його для освітлення приміщень в низьких стелях.

Завданнями даної роботи була розробка потужного світлодіодного світильника з системою охолодження на основі теплових труб, який би мав невеликі розміри за висотою, та оцінка потенційних можливостей запропонованої системи охолодження забезпечувати нормальний тепловий режим світильника.

Конструкція світлодіодного світильника

Нову конструкцію світлодіодного світильника з тепловими трубами наведено на **рис. 1**. Світильник містить корпус 1, в якому розміщено драйвер 2 і до якого приєднано несучу основу 3, виконану з теплопровідного матеріалу, наприклад з міді або з алюмінієвого сплаву. На несучій основі 3 із забезпеченням теплового контакту встановлено принаймні одне потужне світлодіодне джерело світла 4 (наприклад, COB-матриця), закрите розсіювачем світла 5, прикріпленим до несучої основи. Навколо вертикальної осі світильника розташовано концентричні кільця 6, сукупність яких являє собою повітряний теплообмінник, а простір між кільцями утворює канали охолодження 7. Для передачі теплоти від джерела світла до теплообмінника використовуються теплові труби 8. Оскільки необхідну площу поверхні теплообміну можна отримувати за рахунок кількості кілець заданої висоти, на базі такої конструкції можна створювати світлодіодні світильники різної потужності невеликих за висотою розмірів.

Теплові труби з забезпеченням теплового контакту приєднуються до несучої основи зонами випаровування 9 (**рис. 2**), а зонами конденсації 10 встановлюються в отвори кілець 6 (циліндричної або іншої форми, також це можуть бути відкриті зверху пази). На внутрішній поверхні стінки корпусу ТТ виконано шар капілярної структури 11 у вигляді, наприклад, сітки або спеченого порошку, насиченого рідким теплоносієм. Теплові труби розташовуються переважно гори-

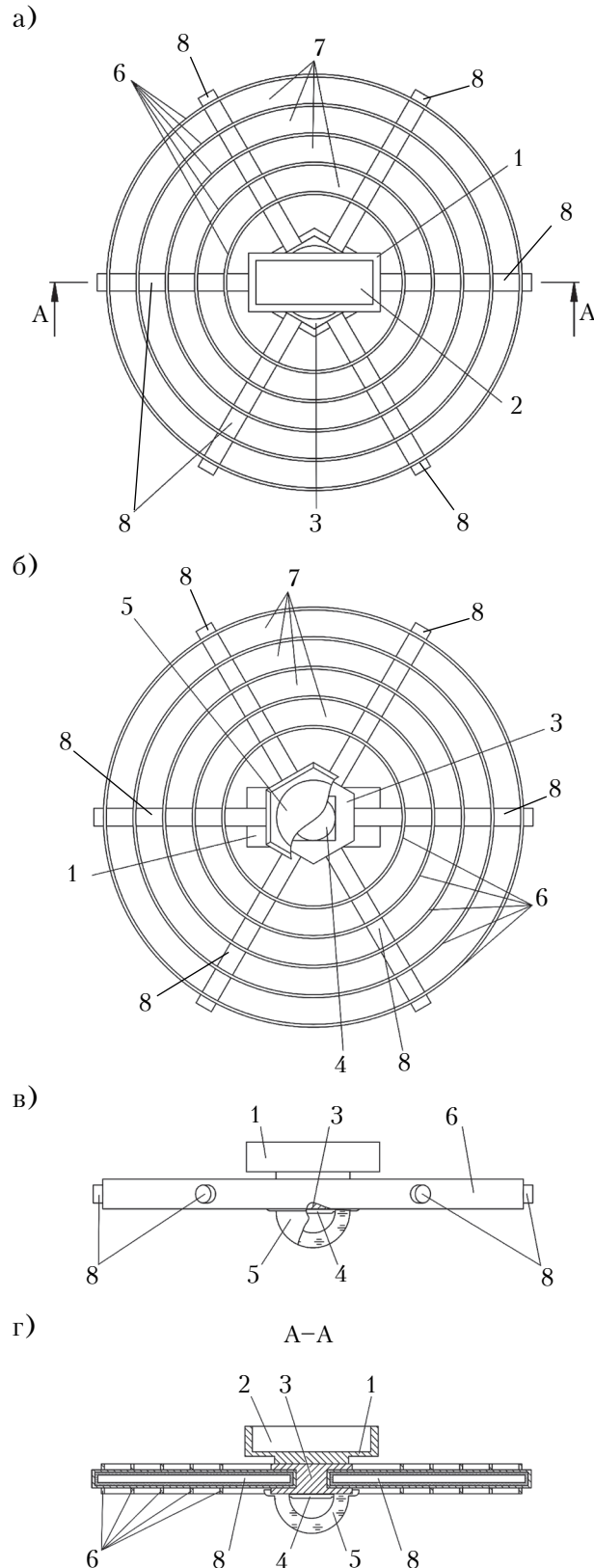


Рис. 1. Вид зверху (а), знизу (б) та спереду (в) світлодіодного світильника з тепловими трубами, а також його вертикальний переріз (г):

1 – корпус; 2 – драйвер; 3 – несуча основа; 4 – світлодіодне джерело світла; 5 – розсіювач світла; 6 – кільця; 7 – канали охолодження; 8 – теплові труби

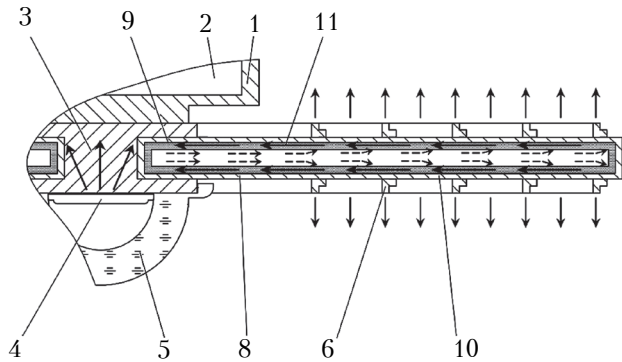


Рис. 2. Переріз фрагменту світлодіодного світильника з тепловою трубою у збільшеному масштабі:
9, 10 – зони випаровування та конденсації відповідно;
11 – шар капілярної структури (решту позицій див. на рис. 1)

зонтально, в площині, перпендикулярній вертикальній вісі світильника.

Зазначимо, що в розглянутій конструкції світильника міститься шість теплових труб, але їхня кількість може бути іншою і залежить від результатів попередніх теплових розрахунків.

Корпус ТТ може бути виконаний з міді, і в такому випадку можна використовувати дистильовану воду як теплоносій, а також з алюмінієвого сплаву, сталі, нікелю, титану тощо, і тоді теплоносієм має бути вибрана корозійно сумісна з матеріалом рідина.

Функціонування запропонованого світлодіодного світильника в базовому варіанті виконання здійснюється наступним чином. При підключенні драйвера 2 до електричної мережі джерело 4 випромінює світло, і теплота, що виділяється при цьому в $p-n$ -переходах світлодіодів, передається завдяки теплопровідності несучої основи до зони випаровування ТТ і нагріває її корпус та шар капілярної структури. Рідкий теплоносій, яким просочена капілярна структура, починає випаровуватися або кипіти (залежно від густини теплового потоку), інтенсивно поглинаючи при цьому підведену теплоту. Пара теплоносія рухається паровим простором ТТ в зону конденсації (показано пунктирними стрілками на рис. 2), де конденсується на її внутрішній поверхні, віддаючи при цьому теплоту пароутворення корпусу ТТ та з'єднаним з нею тепловим контактом кільцям. На теплообмінній поверхні кільця та поверхні ТТ в зоні конденсації теплота розсіюється природною конвекцією оточуючого повітря. Сконденсований теплоносій завдяки дії капілярних сил повертається шаром капілярної структури до зони випаровування (показано довгими суцільними стрілками на рис. 2), і цикл передачі теплоти шляхом випаровування-конденсації теплоносія повторюється.

Для оцінки можливостей запропонованої системи охолодження забезпечувати нормальний тепловий режим потужного світлодіодного джерела світла скористаємось методом комп'ютерного моделювання. Такі методи широко використовуються для дослідження теплових полів засобів тепловідведення [15, 16] і дозволяють визначити розподіл температури світлодіодного пристрою без виготовлення вартісного експериментального зразка.

Умови для комп'ютерного моделювання

Об'єктом моделювання була система охолодження (несуча основа, шість теплових труб та повітряний теплообмінник) з СОВ-матрицею розмірами $38 \times 38 \times 1,4$ мм і тепловою потужністю 300 Вт. Корпус і драйвер вважались знятими з несучої основи та при моделюванні не враховувалися.

Несуча основа являє собою шестигранну пластину товщиною 8 мм, виготовлену з алюмінієвого сплаву (рис. 3). Відстань між її паралельними гранями становить 80 мм. В торцевих гранях основи виконано глухі циліндричні отвори діаметром 6 мм, глибиною 34 мм, в кожен з яких на всю глибину входить кінець теплової труби (зона випаровування).

Довжина теплових труб – 250 мм, діаметр – 6 мм, матеріал – мідь, капілярна структура – спечена порошкова, теплоносій – дистильована вода. Ефективну теплопровідність теплової труби було визначено за результатами попередніх експериментальних досліджень, вона дорівнює $10000 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

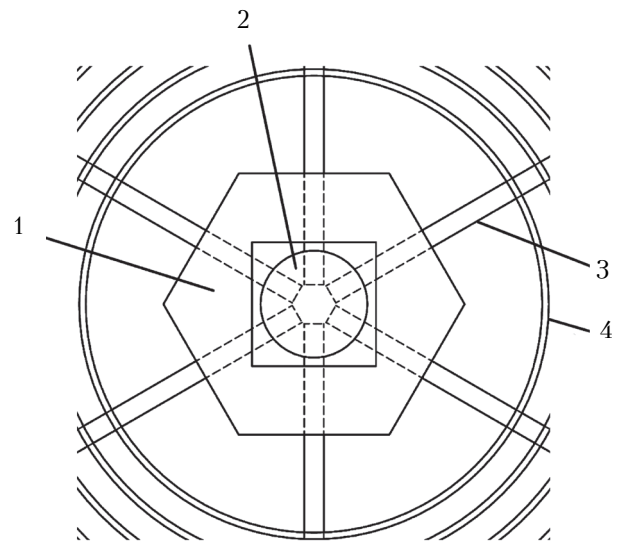


Рис. 3. Схема конструкції ділянки встановлення світлодіодного джерела світла:

1 – несуча основа; 2 – СОВ-матриця; 3 – теплова труба; 4 – перше кільце теплообмінника

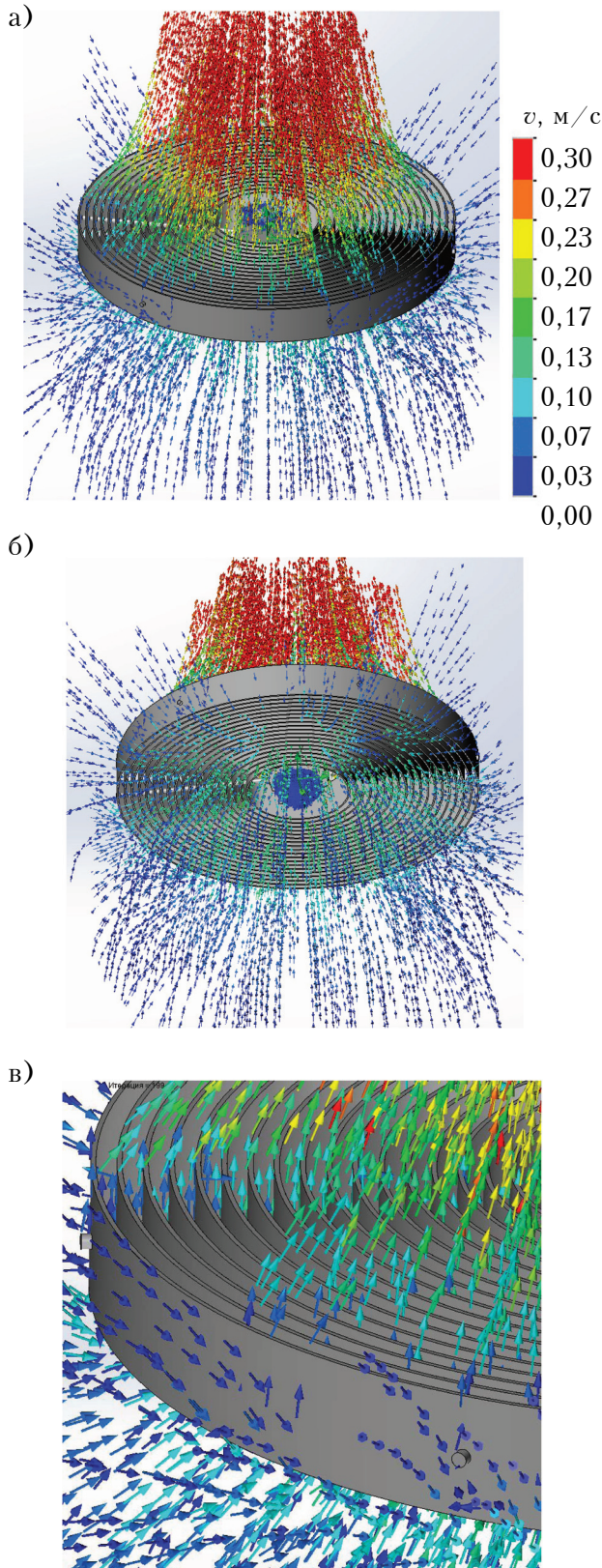


Рис. 6. Візуалізація траєкторії руху та швидкості повітряних потоків навколо системи охолодження з розсіювачем світла:

a — з нижнього положення; *б* — з верхнього положення; *в* — фрагмент у збільшеному масштабі

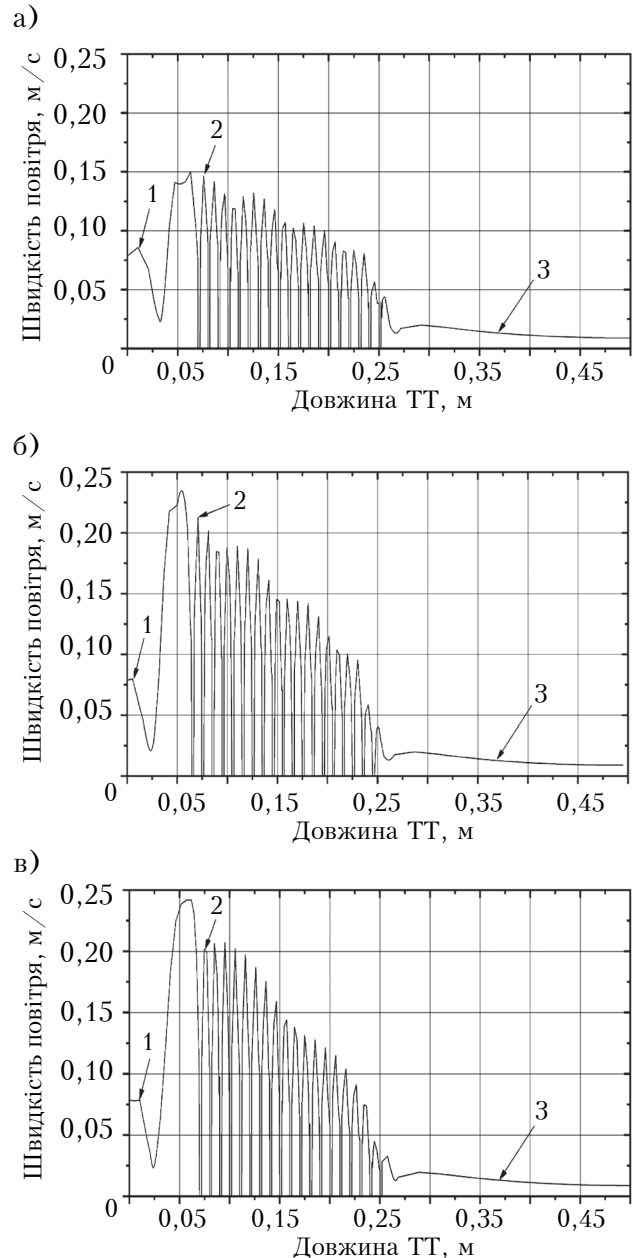


Рис. 7. Розподіл швидкості охолоджуючого повітря вздовж теплової труби в горизонтальній площині, яка проходить по верхніх торцях кілець, безпосередньо над ТТ (*a*), на відстані 10 мм від ТТ (*б*) та посередині між двома сусідніми ТТ (*в*):

(ділянка 1 відповідає потоку повітря над несучою основою; 2 — потоку між першим та другим кільцями; 3 — на віддалені від зовнішнього кільця)

Висновки

Дослідження запропонованої конструкції світлодіодного світильника методом комп'ютерного моделювання показали наступне.

За потужності світлодіодного джерела світла 300 Вт і температури оточуючого повітря 20°C температура ділянки несучої основи в місці приєднання джерела світла становить 67,6°C. Тепловий опір системи охолодження дорівнює

0,159°C/Вт. У разі використання COB-матриці типу CITIZEN CLU058 з тепловим опором 0,1°C/Вт і шару теплопровідної пасти типу Arctic Silver 5 в зоні контакту товщиною 0,1 мм температура $p-n$ -переходів кристалів матриці становитиме 100°C, тобто не буде перевищувати максимально припустиме значення 150°C. При цьому висота кілець світильника складає 50 мм.

Ефективне відведення теплоти забезпечується завдяки використанню в системі охолодження теплових труб. Оскільки ефективна теплопровідність ТТ на порядки вища за теплопровідність міді та алюмінію, вони мають значно менший тепловий опір, ніж металеві конструктивні елементи таких самих розмірів, тому ТТ дозволяють більш ефективно передавати теплоту від джерела світла до всіх кілець, незалежно від їхнього розташування. У такому випадку забезпечується надійна робота більш потужного, ніж у відомих конструкціях, джерела світла мінімальної висоти.

Розроблений потужний світлодіодний освітлювальний прилад з природнім повітряним охолодженням можна використовувати для освітлення приміщень з низькими стелями.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Полищук А., Туркин А. Деградация полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов // Компоненты и технологии. — 2008. — №2. — С. 25–28. — https://kit-e.ru/assets/files/pdf/2008_2_25.pdf
2. Yurtseven M.B., Mete S., Onaygil S. The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs // Lighting Res. Technol. — 2015. — Vol. 48, №8. — P. 943–965. — <https://doi.org/10.1177/1477153515576785>
3. Мельниченко А. Защита мощных светодиодов от перегрева // Электронные компоненты и системы. — 2005. — №12 (100). — С. 22–23.
4. Урсаки А. Развитие светодиодных модулей Chip-on-Board на примере эволюции матриц от компании Citizen Electronics // Современная светотехника. — 2018. — № 2. — С. 20–22. — [http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20\(3\).pdf](http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20(3).pdf)
5. Ying S. P., Shen W. B. Thermal analysis of high-power multichip COB light-emitting diodes with different chip sizes // IEEE Trans. Electron Devices. — 2015. — Vol. 62, №3. — P. 896–901. — <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2390255>
6. Пат. 107882 С2 України. Освітлювальний пристрій / Є.В. Чорний. 2015. — Бюл. № 4.
7. Wang Jing, Zhao Xin-Jie, Cai Yi-Xi, Zhang Chun, Bao Wei-Wei. Experimental study on the thermal management of high-power LED headlight cooling device integrated with thermoelectric cooler package // Energy Conversion and Management. — 2015. — Vol. 101. — P. 532–540. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.040>
8. Maaspuro Mika. Piezoelectric oscillating cantilever fan for thermal management of electronics and LEDs — A review // Microelectronics Reliability. — 2016. — Vol. 63. — P.342–353. — <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.06.008>
9. Deng Xiong, Luo Zhenbing, Xia Zhixun, Gong Weijie, Wan Lin. Active-passive combined and closed-loop control for the thermal management of high-power LED based on a dual synthetic jet actuator // Energy Conversion and Management. — 2017. — Vol. 132. — P. 207–212. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.034>
10. Schneider M., Leyrer B., Herbold C., Maikowski S. High power density LED modules with silver sintering die attach on aluminum nitride substrates // Presented at the 2014 I.E. 64th electronic components and technology conference (ECTC). — 2014. — P. 203–208. — <https://doi.org/10.1109/ECTC.2014.6897289>
11. Wu Y., Tang Y., Li Z. et al. Experimental investigation of a PCM-HP heat sink on its thermal performance and antithermal-shock capacity for high-power LEDs // Appl. Therm. Eng. — 2016. — Vol. 108. — P. 192–203. — <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.127>
12. Nikolaenko Yu.E., Kravets V.Yu., Naumova A.N. Baranyuk A.V. Development of the ways to increase the lighting energy efficiency of living space // International Journal of Energy for a Clean Environment. — 2017. — Vol. 18, iss. 3. — P. 275–285. — <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2018021641>
13. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Sorokin V.M. Light characteristics of high-power LED luminaire with a cooling system based on heat pipe // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2019. — Vol. 22, N 3. — P. 366–371. — <https://doi.org/10.15407/spqeo22.03.366>
14. Лозовой М.А., Николаенко Ю.Е., Рассамкин Б.М., Хайрмасов С.М. Исследование рабочих характеристик тепловых труб для светодиодных осветительных приборов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2014. — № 5–6. — С. 32–38. — <https://doi.org/10.15222/TKEA2014.2.32>
15. Трофимов В.Е., Павлов А.Л., Мокроусова Е.А. CFD-моделирование радиатора для воздушного охлаждения микропроцессоров в ограниченном пространстве // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2016. — № 6. — С. 30–35. — <https://doi.org/10.15222/TKEA2016.6.30>
16. Трофимов В.Е., Павлов А.Л., Сторожук А.С. CFD-моделирование импактно-струйного радиатора для проведения термотренировки микропроцессоров // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2018. — №5–6. — С. 30–36. — <https://doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.30>
17. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В. и др. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2008.
18. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2012.

*Дата надходження рукопису
до редакції 25.10 2019 г.*