



Закордонець В.С.

**Закордонець В.С.** канд. фіз.-мат. наук  
**Кутузова Н.В.**

Тернопільський національно технічний університет  
імені Івана Пууля, вул. Руська, 56, Тернопіль, 46001,  
Україна; e-mail: [wladim21@gmail.com](mailto:wladim21@gmail.com)



Кутузова Н.В.

## **РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ СВІТЛОДІОДА НА БАЗІ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ**

*Побудована математична теплова модель системи охолодження світлодіода на базі теплової труби. Розв'язана система диференціальних рівнянь, яка включає стаціонарне рівняння теплопровідності та рівняння термогенерації Джоуля доповнена тепловими граничними умовами. Розрахований розподіл температури в структурних елементах системи охолодження в залежності від потужності світлодіода, параметрів теплової труби і температури середовища. Бібл. 10, рис. 3, табл. 1.*

**Ключові слова:** світлодіод, світловий потік, тепловий режим, тепловий опір, термостабілізація, тепла труба.

### **Постановка проблеми.**

В сучасних потужних світлодіодних освітлювальних системах (СОС) широкого поширення набувають активні системи охолодження в основі роботи яких лежить примусова циркуляція повітря або рідини в контурі [1]. Однак активне охолодження пов'язане з шумом. Електродвигуни вентиляторів і сам повітряний потік створюють звукові хвилі, які часто небажані. Зокрема, при освітленні житлових приміщень, концертних залів, навчальних аудиторій і т. п. Крім того вони потребують додаткових капіталовкладень та технічного обслуговування. Все це змушує до пошуку альтернативних систем охолодження.

Теплові труби (ТТ) є одним з найбільш ефективних пасивних методів відбору і переносу теплової енергії. Завдяки використанню для передачі тепла прихованої теплоти пароутворення її ефективна теплопровідність в тисячі разів більша за теплопровідність  $Cu$ ,  $Ag$  або  $Al$ , і досягає  $\sim 10^7$  Вт/м К.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Термостабілізація радіоелектронної апаратури при допомозі теплових труб свідчить про високу ефективність цього методу охолодження [2, 3]. Очевидно, що він може бути ефективним і для для стабілізації теплового режиму світлодіодів. Зокрема в [4–6] експериментально досліджувалася система охолодження світлодіодів, яка функціонує за принципом теплової труби. Доведено, що розглянуті системи охолодження забезпечують необхідний тепловий режим світлодіодів в широкому діапазоні температур. В [7] досліджувалася система охолодження світлодіода при різних режимах роботи теплової труби.

Експериментально доведено її вищу ефективність в порівнянні з радіатором, що має ідентичний профіль і площу поверхні.

Однак, у вказаних роботах розглядалися лише практичні конструкції. При цьому теплова математична модель системи охолодження не розглядалася і теоретичний аналіз не проводився.

**Метою роботи** є створення математичної теплової моделі системи охолодження світлодіода на базі теплової труби та розрахунок на її основі температури активної зони СД.

**Постановка завдання.** Шляхом теоретичного аналізу встановити аналітичні зв'язки між потужністю світлодіода, параметрами теплової труби, температурами середовища та активної зони світлодіода. Це дасть можливість раціонально вибрати схему охолодження з метою забезпечення адекватного теплового режиму СД.

### Виклад основного матеріалу

Для розрахунку теплового режиму СД в якості базової розглянемо теплову математичну модель світлодіода закріпленого на торцевій поверхні теплової труби. Будемо вважати, що теплова потужність СД повністю поглинається її гарячим кінцем

$$P_t = P_h, \quad (1)$$

а від бічної і торцевої поверхонь завдяки конвективному теплообміну відводиться надлишкова потужність. Схема системи охолодження на основі теплової труби приведена на рис. 1.

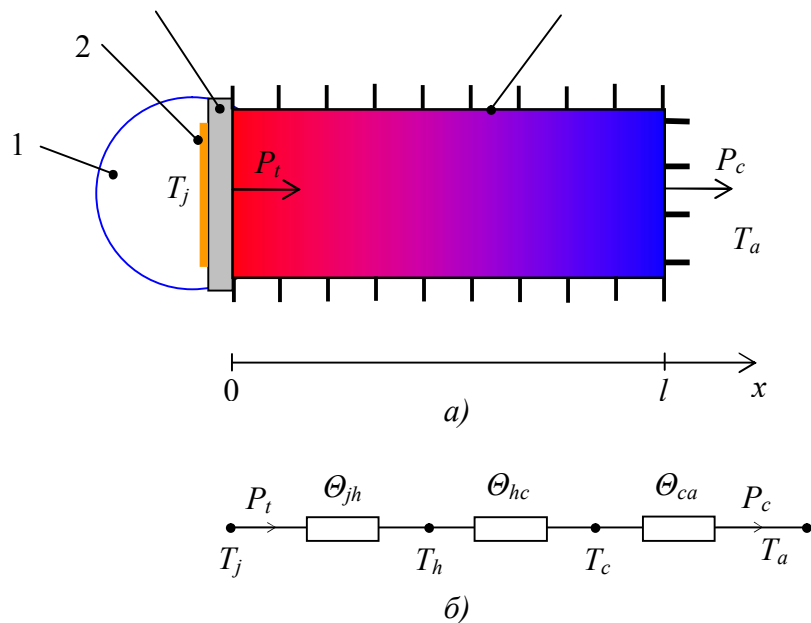


Рис. 1. Схематичне зображення системи охолодження світлодіода на базі теплової труби (а) та її тепла схема (б). Тут 1 - світлодіод, 2 – активна зона, 3 – контактна площадка, 4 - теплова труба.  $T_j$  - температура активної зони LED,  $T_h$  і  $T_c$  - температура гарячого і холодного кінців теплової труби відповідно,  $T_a$  - температура середовища.

Розглянемо поширення тепла в тепловій трубі з постійним по довжині поперечним перерізом. Для інтенсифікації теплообміну її бічна і торцева поверхні мають радіаторний

рельєф. Вважаємо, що труба знаходиться в середовищі з постійною температурою. Поширення тепла в трубі описується стаціонарним рівнянням теплопровідності [8]

$$\nabla^2 t - \gamma^2 t = 0. \quad (2)$$

і рівнянням термогенерації Джоуля

$$P_t = (1 - \eta_e) I_f U_f, \quad (3)$$

де  $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$  – оператор Гамільтона,  $t = T - T_a$  – температура перегріву поверхні труби,  $T_a$  – температура середовища,  $P_t$  – потужність теплової генерації,  $U_f$  – пряма напруга,  $I_f$  – прямий струм,  $\eta_e$  – квантова ефективність світлодіода,

$$\gamma = \sqrt{\frac{\alpha_p P}{\kappa S}}, \quad (4)$$

$p$  і  $S$  – периметр бічної поверхні і площа поперечного перерізу,  $\alpha_p$  і  $\alpha_l$  – коефіцієнти теплообміну між бічною і торцевою поверхнею труби та середовищем відповідно.

Вважаємо, що потік тепла рівномірно розподілений в площині труби. Тоді, для густини потоку тепла отримаємо:

$$q_t = \frac{P_t}{S}. \quad (5)$$

Записані рівняння слід доповнити граничними умовами. На границях поділу структур охолоджувальної системи задамо традиційні умови спряження для теплових потоків.

$$-\kappa \frac{dt}{dx} \Big|_{x=0} = q_t, \quad -\kappa \frac{dt}{dx} \Big|_{x=l} = \alpha_l t \Big|_{x=l}. \quad (6)$$

Розв'язок системи рівнянь (2-6) будемо шукати у вигляді:

$$t(x) = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x}, \quad (7)$$

де  $C_1$  і  $C_2$  постійні інтегрування, які визначаються із граничних умов.

В результаті розв'язку системи рівнянь був отриманий наступний розподіл температури перегріву:

$$t(x) = \frac{P_t \alpha_l}{\alpha_l S \kappa \gamma} \left\{ \frac{\text{ch}[\gamma(l-x)] + \text{sh}[\gamma(l-x)]}{\text{sh}(\gamma l) + (\alpha_l / \kappa \gamma) \text{ch}(\gamma l)} \right\}. \quad (8)$$

Знайдемо температуру найгарячішого і найхолоднішого кінців теплової труби і середній погонний перепад температури. При  $x=0$  і  $x=l$  отримаємо відповідно:

$$T_h = T_a + \frac{P_t \alpha_l}{\alpha_l S \kappa \gamma} \left[ \frac{1 + (\alpha_l / \kappa \gamma) \text{th}(\gamma l)}{(\alpha_l / \kappa \gamma) + \text{th}(\gamma l)} \right], \quad (9)$$

$$T_c = T_a + \frac{P_t}{\alpha_l S} \frac{\alpha_l}{[(\alpha_l / \kappa \gamma) + \text{th}(\gamma l)] \kappa \gamma}. \quad (10)$$

Для середнього погонного перепаду температури маємо:

$$\lambda(\gamma l) = \frac{T_h - T_c}{l} = \frac{P_t}{\alpha_l S} \left( \frac{\alpha_l}{\kappa \gamma} \right)^2 \frac{\text{th}(\gamma l)}{(\alpha_l / \kappa \gamma) + \text{th}(\gamma l)}. \quad (11)$$

Із аналізу (11) слідує, що завдяки великому коефіцієнту теплопровідності теплової труби  $\lim_{\gamma l \rightarrow 0} \lambda(\gamma l) = 0$  в широкому діапазоні довжин. Це свідчить, що поверхня труби є ізотермічною поверхнею. Внаслідок цього досягається рівномірне і ефективне відведення теплової енергії по всій довжині.

Температуру активної зони СД визначимо методом електротеплової аналогії із закону Ома для теплової вітки [9]

$$T_j = T_h + \Theta_{jh} P_t, \quad (12)$$

Враховуючи (9) отримаємо

$$T_j = T_a + P_t \left[ \frac{\varepsilon}{\alpha_l S} \left( \frac{1 + \varepsilon \text{th} \beta}{\varepsilon + \text{th} \beta} \right) + \Theta_{jh} \right]. \quad (13)$$

де  $\beta = \gamma l$  - відносна довжина теплової труби,  $\varepsilon = \alpha_l / \kappa \gamma$  - відносний коефіцієнт теплообміну.

Температура активної зони зменшується із збільшенням відносної довжини теплової труби, і при  $\beta \rightarrow \infty$  асимптотично наближається до граничного значення

$$T_j = T_a + P_t \left[ \frac{\alpha_l}{\alpha_p} \frac{1}{\kappa \rho} + \Theta_{jh} \right]. \quad (14)$$

Для проведення числового аналізу виберемо білий світлодіод Gree XL1310СХА параметри якого представлені в табл. 1.

Таблиця

*Електричні і теплові параметри деяких світлодіодів*

Серія	Номинальна напруга (В)	Прямий струм (мА)	Максимальна потужність (Вт)	Світловий потік (Лм)	Тепловий опір (К/Вт)	Максимальна температура активної зони (°С)
XL1310СХА	18	700-1050	20	1400-2100	1.2	125
XL1310СХА	36	350-525	20	1400-2100	1.2	125
XL1520СХА	35	500-900	33	2000-4000	1.2	125
XL1850СХА	35	1400-2100	78	6000-9400	0.6	125
XL2590СХА	69	1200-1800	130	8000-15600	0.6	125

При цьому його квантова ефективність складає  $\eta_e = 0.25$ , а тепловий опір  $\theta_{jh} = 1.2$  К/Вт. Для умов вільної конвекції повітря величина коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha_p = 5 \div 25$  (Вт/м<sup>2</sup>К). При вимушеній конвекції коефіцієнт тепловіддачі коливається в межах  $\alpha_p = 10 \div 200$  (Вт/м<sup>2</sup>К). Використаємо теплові труби з коефіцієнтами теплопровідності  $\kappa = 4 \cdot 10^4$  Вт/м і  $\kappa = 2 \cdot 10^4$  Вт/м·К. Для порівняння виберемо мідний теплопровід такої ж довжини, який має ідентичний профіль і площу поверхні а коефіцієнт теплопровідності рівний  $\kappa = 400$  Вт/м·К.

На рис. 2. представлені залежності температури активної зони СД від відносної довжини ТТ. Очевидно, що із збільшенням довжини температура активної зони зменшується.

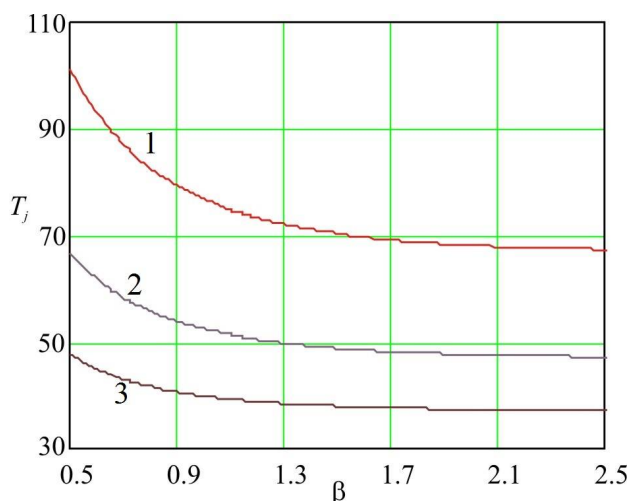


Рис. 2. Залежність температури активної зони СД тепловою потужністю  $P_t=20$  Вт від відносної довжини ТТ при різних відносних коефіцієнтах теплообміну. Лінії 1, 2, і 3 – при  $\varepsilon=0.1$  (мідний радіатор),  $\varepsilon=0.05$  (ТТ) і  $\varepsilon=0.025$  (ТТ) відповідно.

Це пояснюється збільшенням площі поверхні теплообміну із середовищем. Збільшенню відносної довжини теплової труби сприяє збільшення добутку  $\gamma l$ , який відповідає за поширення тепла через бічну поверхню.

На температуру активної зони суттєво впливає і відносний коефіцієнт теплообміну.

$$\varepsilon = \frac{\alpha_l}{\kappa \gamma} = \alpha_l \sqrt{\frac{S}{\alpha_p \kappa p}} \quad (15)$$

Його зменшення також призводить до зменшення температури  $T_a$ . Зменшенню  $\varepsilon$  сприяє збільшення добутку  $\alpha_p \kappa p$ , який відповідає за швидке поширення тепла вздовж теплової труби. Залежність температури активної зони СД від відносного коефіцієнта теплообміну представлена на рис. 3.

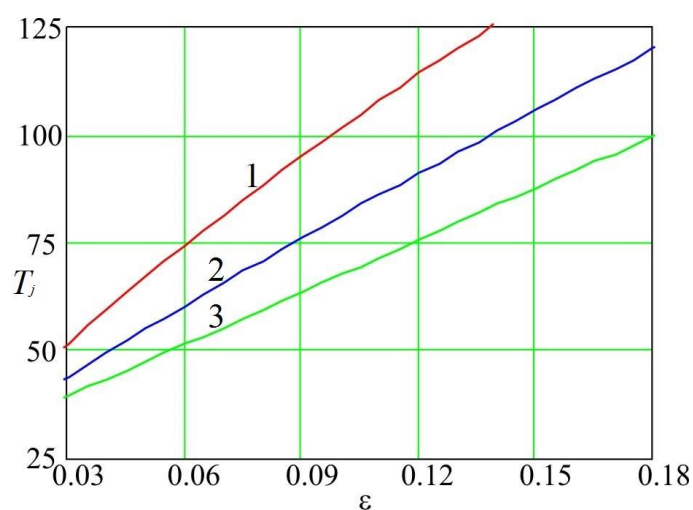


Рис. 3. Залежність температури активної зони СД тепловою потужністю  $P_t=20$  Вт від відносного коефіцієнта теплообміну при різних відносних довжинах ТТ. Лінії 1, 2, 3 при  $\beta=0.50$ ,  $\beta=0.85$ ,  $\beta=2.5$  відповідно.

Таким чином, система охолодження СД на базі теплової труби має вищу ефективність в порівнянні з радіатором, що має ідентичний профіль і площу поверхні. Така перевага обумовлена рівномірним розподілом температури по поверхні теплової труби, а значить, і більш ефективним відведенням теплової енергії.

Альтернативою ефективного і безшумного охолодження світлодіодів при допомозі теплових труб є застосування термоелектричного охолодження [10].

## **Висновки**

1. Теплова труба (ТТ) є одним з найбільш ефективних пасивних методів охолодження СД. Причому, ефективність охолодження збільшується із збільшенням її довжини, периметра, коефіцієнта тепловіддачі і коефіцієнта теплопровідності. Застосування ТТ дозволить значно скоротити розміри і масу пасивної системи охолодження.
2. Система охолодження СД на базі теплової труби має вищу ефективність в порівнянні з мідним радіатором, що має ідентичний профіль і площу поверхні. Така перевага обумовлена рівномірним розподілом температури по поверхні ТТ, і ефективнішим відведенням теплової енергії.
3. Використання схеми охолодження на базі ТТ дозволить збільшити світловий потік світлодіода (збільшити потужність) без збільшення температури активної зони. Це дозволить зменшити кількість світлодіодів в світильнику і його вартість без скорочення терміну експлуатації.
4. ТТ мають відносно вузький діапазон ефективного використання. При перевищенні розрахункової температури вся охолоджуюча рідина може перейти в пару, і навпаки, при недостатній температурі рідина погано випаровується. Це призведе до різкого зниження теплопровідності системи охолодження СД з усіма негативними наслідками.

## **Література**

1. Лотар Ноэль. Охлаждение и регулирование температурных режимов светодиодов. / Лотар Ноэль // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 3. – С. 13-15.
2. Хайрнасоев С.М. Применение тепловых труб в системах обеспечения тепловых режимов РЭА: современное состояние и перспективы / С.М. Хайрнасоев // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2015.— № 2-3. — С. 19 – 33.
3. Алексеев В.А., Арефьев В.А. Тепловые трубы для охлаждения и термостатирования радиоэлектронной аппаратуры. М.: Энергия, 1979. — 128 с.
4. Christopher A. Soule. Heatpipereliability in high-power applications // Power Electronics Technology. -2004. - P 40-44.
5. Стожок В. М., Загуляев О. И. Светодиодный светильник устройство. Пат. Украина №40882, 2009.- Бюл. №8.
6. Сысун В.В. Мощная светодиодная лампа с охлаждением тепловой трубой. Пат. РФ №2568105, 2015,- Бюл. №31.
7. Рассемакин А.Б. Тепловые режимы системы охлаждения светодиодных светильников на основе тепловых труб. / А.Б. Рассемакин, Е.В. Быков, С.М. Хайрнасоев // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. -2013. - № 5.- С. 28-30.
8. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики. / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 735 с.

9. Беляев Н.М. Методы теории теплопроводности. Ч.1. / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – М.: Высш. шк., 1982. –327 с.
10. Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения. / П. Шостаковский // Компоненты и технологии. – 2009. – № 12. – С. 40-46.

Надійшла до редакції 08.08.2018

**Закордонец В.С., канд. физ.-мат. наук, доцент  
Кутузова Н.В.**

Тернопольський національний технічний університет,  
імени Івана Пулюя, ул. Русская, 56, Тернополь, 46001, Україна,  
*e-mail: wladim21@gmail.com*

### **РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СВЕТОДИОДА НА БАЗЕ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ**

*Разработаны физическая и математическая тепловые модели системы охлаждения светодиода (СД) на базе тепловой трубы (ТТ). Решена система дифференциальных уравнений, включающая стационарное уравнение теплопроводности и уравнение термодинамики Джоуля, дополненная тепловыми граничными условиями. Расчитано распределение температуры в структурных элементах системы охлаждения в зависимости от мощности СД, параметров ТТ и температуры среды. Библ. 10, рис. 3, табл. 1.*

**Ключевые слова:** светодиод, световой поток, тепловой режим, тепловое сопротивление, термостабилизация, тепловая труба.

**Volodymyr Zakordonets, Cand.Sc. (Physics and Mathematics)  
Natalija Kutuzova**

Ivan Puyul, Ternopil National Technical University  
56, Russian st., Ternopol, 46001, Ukraine  
*e-mail: wladim21@gmail.com*

### **CALCULATION OF HEAT PIPE-BASED LED COOLING SYSTEM**

*The mathematical thermal model of heat pipe-based LED cooling system is constructed. The system of differential equations is solved, which includes stationary equation of thermal conductivity and the Joule thermal generation equation, both supplemented by thermal boundary conditions. The distribution of temperature in structural elements of the cooling system is calculated depending on the power of LED, the parameters of heat pipe and the ambient temperature. Bibl. 10, Fig. 3, table 1.*

**Key words:** LED, luminous flux, thermal mode, thermal resistance, thermal stabilization, heat pipe.

## References

1. Lotar Noel (2010). Okhlazhediie i regulirovanie temperaturnykh rezhimov svetodiodov [Cooling and control of temperature modes of LEDs]. Poluprovodnikovaia svetotekhnika – Semiconductor Illumination Engineering, 3, 13-15 [in Russian].
2. Khairnasov S.M. (2015). Primeneniie teplovykh trub v sistemakh obespecheniia teplovykh rezhimov REA: sovremennoie sostoiianiie i perspektivy [The use of heat pipes in the systems providing thermal modes of electronic equipment]. Tekhnologiya i konstruirovaniie v elektronnoi apparature, 2-3, 19 – 33 [in Russian].
3. Alekseiev V.A., Arefiev V.A. (1979). Teplovyie truby dlia okhlazhdeniia i termostatirovaniia radioelektronnoi apparatury [Heat pipes for cooling and thermostating radioelectronic equipment]. Moscow: Energiia [in Russian].
4. Soule Christopher A. (2004). Heat pipe reliability in high-power applications. Power Electronics Technology, 40-44.
5. Patent of Ukraine №40882, Bul. №8. (2009). Stozhok V.M., Zaguliaiev O.I. LED lighting device [in Ukrainian].
6. Patent of RF №2568105, Bul.№ 31 (2015). Sysun V.V. Powerful LED lamp with heat pipe cooling [in Russian].
7. Rassamakin A.B., Bykov E.V., Khairnasov S.M. (2013). Teplovi rezhimy okholodzhennia svitlodiodnykh svitylnykyv na osnovi teplovykh trub [Thermal modes of system for cooling LED lamps on the basis of heat pipes]. Tekhnologiya i konstruirovaniie v elektronnoi apparature, 5, 28-30 [in Ukrainian].
8. Tikhonov A.N., Samarskii A.A. (1977). Uravneniia matematicheskoi fiziki [Mathematical physics equations]. Moscow: Nauka [in Russian].
9. Beliaiev N.M., Riadno A.A. (1982). Metody teorii teploprovodnosti. Chast I. [Methods of thermal conductivity theory. P.1] – Moscow: Vysschaia shkola [in Russian].
10. Shostakovski P. (2009). Sovremennyye resheniia termoelektricheskogo okhlazhdeniia . [Modern solutions of thermoelectric cooling]. Komponenty i tekhnologii – Components and Technologies, 12, 40-46 in Russian].

Submitted 08.08.2018