



Закордонец В.С.

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

Тернопольский национальный технический
университет ул. Русская, 56, Тернополь, 46001,
Украина, e-mail: wladim21@gmail.com



Кутузова Н.В.

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.

Введение

В современных мощных светодиодных осветительных системах (СОС) широкое распространение получают активные системы охлаждения, в основе работы которых лежит принудительная циркуляция воздуха либо жидкости в контуре [1]. Однако активное охлаждение связано с шумом. Электродвигатели вентиляторов и сам воздушный поток создают звуковые волны, которые во многих случаях, например, при освещении жилых помещений, концертных залов, учебных аудиторий и т. п., нежелательны. Кроме того, активные системы охлаждения требуют дополнительных капиталовложений и технического обслуживания. Все это обуславливает поиск альтернативных систем охлаждения.

Тепловые трубы (ТТ) – один из наиболее эффективных пассивных методов отбора и переноса тепловой энергии. Благодаря использованию для передачи тепла скрытой теплоты парообразования, эффективная теплопроводность такой трубы в тысячи раз превышает теплопроводность Cu , Ag либо Al , достигая $\sim 10^7$ Вт/(м·К).

Анализируя последние исследования и публикации, можно сделать вывод, что термостабилизация радиоэлектронной аппаратуры при помощи ТТ свидетельствует о высокой эффективности этого метода охлаждения [2, 3]. Очевидно, что он может быть эффективным и для стабилизации теплового режима светодиодов. В частности, в [4 – 6] экспериментально исследовалась система охлаждения СД, функционирующая по принципу ТТ. Доказано, что рассмотренные системы охлаждения обеспечивают необходимый тепловой режим СД в широком диапазоне температур. В [7] исследовалась система охлаждения СД при различных режимах работы ТТ. Экспериментально доказана ее более высокая эффективность в сравнении с радиатором, имеющим идентичный профиль и площадь поверхности.

Однако в упомянутых работах рассматривались только практические конструкции. При этом тепловая математическая модель системы охлаждения не строилась и ее теоретический анализ не проводился.

Целью работы является разработка физической и математической тепловых моделей системы охлаждения СД на базе ТТ и расчет на их основе температуры активной зоны СД.

Задачей работы является установление аналитических связей между мощностью СД, параметрами ТТ, температурами среды и активной зоны СД. Это даст возможность рационально выбрать схему охлаждения, обеспечивающую адекватный тепловой режим работы СД.

Описание физической и математической моделей и обсуждение результатов их анализа.

Для расчета теплового режима СД в качестве базовых рассмотрим физическую и математическую тепловые модели СД, закрепленного на торцевой поверхности ТТ. Будем считать, что тепловая мощность СД полностью поглощается на горячей стороне ТТ

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

а избыточная мощность отводится от боковой и торцевой поверхностей ТТ путем конвективного теплообмена. Схема системы охлаждения на основе ТТ приведена на рис. 1.

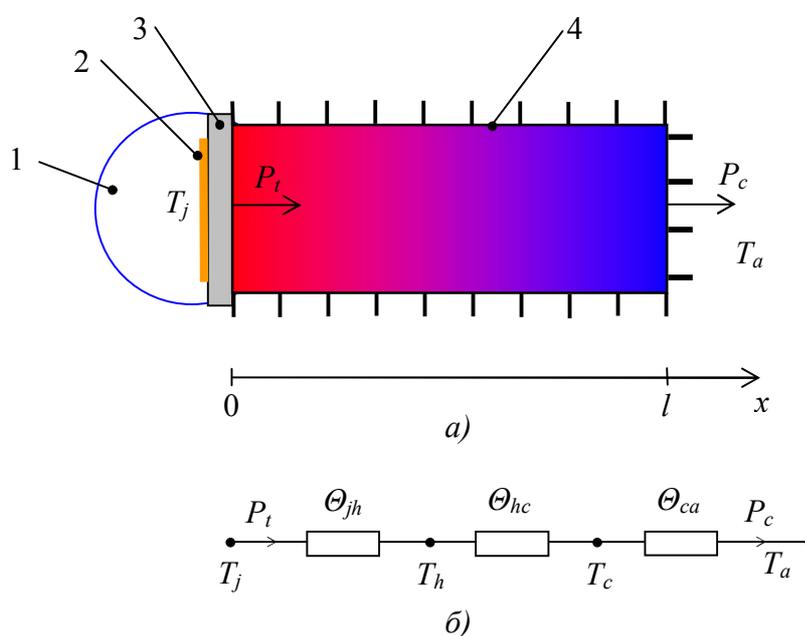


Рис. 1. Схематическое изображение системы охлаждения СД на базе ТТ (а) и ее тепловая схема (б): 1 – СД; 2 – активная зона; 3 – контактная площадка; 4 – ТТ. T_j – температура активной зоны СД; T_h и T_c – температура горячего и холодного концов ТТ, соответственно; T_a – температура среды.

Рассмотрим распространение тепла в ТТ с постоянным по длине поперечным сечением. Для интенсификации теплообмена ее боковая и торцевая поверхности имеют радиаторный

рельеф. Считаем, что ТТ находится в среде с постоянной температурой. Распространение тепла в ТТ описывается стационарным уравнением теплопроводности [8]

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

и уравнением термогенерации Джоуля

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

где $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$ – оператор Гамильтона, $t = T - T_a$ – температура перегрева поверхности ТТ, T_a – температура среды, P_t – мощность тепловой генерации, U_f – прямое напряжение, I_f – прямой ток, η_e – квантовая эффективность СД,

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

p и S – периметр и площадь поперечного сечения ТТ, α_p и α_l – коэффициенты конвективного теплообмена между боковой и торцевой поверхностями трубы и средой соответственно, κ – теплопроводность ТТ.

Считаем, что поток тепла равномерно распределен по поперечному сечению трубы, в силу чего для плотности потока тепла справедливо соотношение:

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

Записанные уравнения следует дополнить граничными условиями. В качестве таковых зададим на границах раздела структур системы традиционные условия сопряжения тепловых потоков:

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

Решение системы уравнений (2 – 6) будем искать в виде:

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

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий.

В результате решения системы уравнений получается следующее распределение температуры перегрева по длине ТТ:

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

Найдем температуры горячего и холодного концов тепловой трубы и средний погонный перепад температуры. При $x = 0$ и $x = l$ получим соответственно:

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

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

Для среднего погонного перепада температуры имеем:

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

Из анализа (11) следует, что в силу большого коэффициента теплопроводности ТТ $\lim_{\gamma l \rightarrow 0} \lambda(\gamma l) = 0$ в широком диапазоне длин. Это означает, что поверхность ТТ является практически изотермической поверхностью. Вследствие этого достигается равномерный и эффективный отвод тепловой энергии по всей длине ТТ.

Температуру активной зоны СД определим методом электротепловой аналогии из аналога закона Ома для тепловой ветви [9]:

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

где Θ_{jh} – тепловое сопротивление светодиода.

Учитывая (12), получим

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

где $\beta = \gamma l$ – относительная длина ТТ, $\varepsilon = \alpha_l / \kappa \gamma$ – относительный коэффициент теплообмена.

Температура активной зоны убывает по мере увеличения относительной длины ТТ, асимптотически приближаясь при $\beta \rightarrow \infty$ к предельному значению:

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

Для проведения численного анализа выберем белый СД Gree XL1310СХА, параметры которого приведены в первой и второй строках таблицы.

Таблица

Электрические и тепловые параметры некоторых светодиодов

Серия	Номинальное напряжение (В)	Прямой ток (мА)	Максимальная мощность (Вт)	Световой поток (Лм)	Тепловое сопротивление (К/Вт)	Максимальная температура активной зоны (°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	400-2100	78	6000-9400	0.6	125
XL2590СХА	69	200-1800	130	8000-15600	0.6	125

При этом его квантовая эффективность составляет $\eta_e = 0.25$, а тепловое сопротивление $\theta_{jh} = 1.2 \text{ К/Вт}$. При свободной конвекции воздуха величина коэффициента теплоотдачи $\alpha_p = (5 \div 25) \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. При принудительной конвекции коэффициент теплоотдачи изменяется в пределах $\alpha_p = (10 \div 200) \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Рассмотрим две ТТ с коэффициентами теплопроводности $\kappa = 4 \cdot 10^4$ и $2 \cdot 10^4 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Для сравнения выберем медный теплопровод такой же длины, имеющий идентичный профиль и площадь поверхности при коэффициенте теплопроводности $\kappa = 400 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

На рис. 2. представлены зависимости температуры активной зоны СД от относительной длины ТТ. Очевидно, что с увеличением указанной длины температура активной зоны снижается.

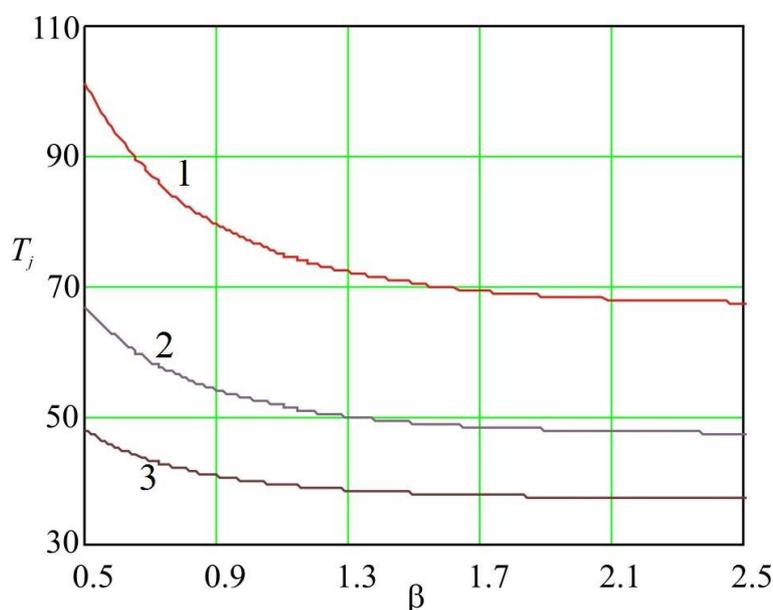


Рис. 2. Зависимость температуры активной зоны СД, имеющего тепловую мощность $P_i = 20 \text{ Вт}$ от относительной длины ТТ при различных относительных коэффициентах теплообмена. 1 – медный радиатор с $\epsilon = 0.1$; 2 и 3 – вышеуказанные ТТ с $\epsilon = 0.05$ и $\epsilon = 0.025$, соответственно.

Это объясняется увеличением площади поверхности теплообмена со средой.

Наряду с относительной длиной ТТ на температуру активной зоны существенно влияет относительный коэффициент теплообмена

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

Его уменьшение также приводит к снижению температуры T_j . Уменьшению ϵ способствует увеличение произведения $\alpha_p \kappa r$, отвечающего за скорость распространения тепла вдоль ТТ. Зависимость температуры активной зоны СД от относительного коэффициента теплообмена приведена на рис. 3.

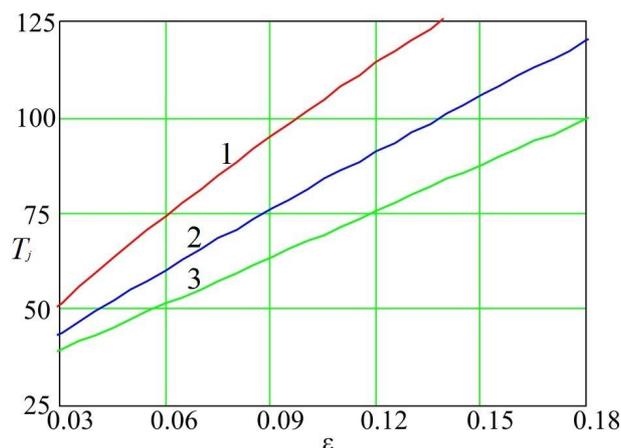


Рис. 3. Зависимость температуры активной зоны СД с тепловой мощностью $P_t = 20$ Вт от относительного коэффициента теплообмена при различных относительных длинах ТТ. Кривые 1, 2 и 3 построены для значений $\beta = 0.50, 0.85$ и 2.5 , соответственно.

Таким образом, система охлаждения СД на базе ТТ имеет более высокую эффективность в сравнении с радиатором, имеющим идентичный профиль и площадь поверхности. Такое преимущество обусловлено равномерным распределением температуры по поверхности тепловой трубы, а, следовательно, и более эффективным отводом тепловой энергии.

Альтернативным способом эффективного и бесшумного охлаждения светодиодов является применение термоэлектрического охлаждения [10].

Выводы

1. Использование тепловых труб (ТТ) является одним из наиболее эффективных пассивных методов охлаждения СД. Эффективность охлаждения возрастает с увеличением длины, периметра поперечного сечения, коэффициента теплоотдачи и коэффициента теплопроводности ТТ. Применение ТТ позволит значительно сократить размеры и массу пассивной системы охлаждения.
2. Система охлаждения СД на базе ТТ имеет более высокую эффективность по сравнению с медным радиатором, имеющим идентичный профиль и площадь поверхности. Такое преимущество обусловлено равномерным распределением температуры по поверхности ТТ, и, следовательно, более эффективным отводом тепловой энергии.
3. Использование схемы охлаждения на базе ТТ позволит увеличить мощность, а, следовательно, и световой поток СД без повышения температуры активной зоны. Это позволит уменьшить количество светодиодов в светильнике и снизить его стоимость без сокращения срока эксплуатации.
4. При конструировании систем охлаждения СД по описанной схеме следует иметь в виду, что ТТ имеют относительно узкий температурный диапазон эффективного применения. При превышении расчетной температуры вся охлаждающая жидкость может превратиться в пар, и наоборот, при недостаточной температуре жидкость плохо испаряется. Это приведет к резкому снижению теплопроводности системы охлаждения СД со всеми вытекающими отрицательными последствиями.

Литература

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. Рассамкин А.Б. Тепловые режимы системы охлаждения светодиодных светильников на основе тепловых труб / А.Б. Рассамкин, 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.

Поступила в редакцию 08.08.2018

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

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]. Tekhnologiia 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 svitylnykv na osnovi teplovykh trub [Thermal modes of system for cooling LED lamps on the basis of heat pipes]. Tekhnologiia 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. Chast1. [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