

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

УДК 536.248.2; 628.941.8

DOI: 10.15222/ТКЕА2014.2.32

М. А. ЛОЗОВОЙ, д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО,
к. т. н. Б. М. РАССАМАКИН, к. т. н. С. М. ХАЙРНАСОВ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: yunikola@ukr.net, nirtef@kpi.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ДЛЯ СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Приведены результаты экспериментального исследования рабочих характеристик аммиачных алюминиевых тепловых труб (ТТ) с канавчатой капиллярной структурой, предназначенных для использования в качестве теплопередающих элементов в конструкции мощного светодиодного осветительного прибора с принудительным воздушным охлаждением. В диапазоне значений подводимого теплового потока от 50 до 100 Вт и скорости набегающего воздушного потока от 0,8 до 2,1 м/с температура в зоне нагрева ТТ в зависимости от угла их наклона к горизонту находилась в пределах от 31,0 до 52,5°C, при этом перепад температуры по ТТ составлял от 0,9 до 3,1°C. Значения теплового сопротивления ТТ находились в диапазоне от 0,012 до 0,044°C/Вт.

Ключевые слова: светодиод, осветительный прибор, система охлаждения, тепловая труба, тепловые характеристики.

Проблема энергосбережения на сегодняшний день является актуальной во всех странах. По данным Международного энергетического агентства, около 19% всей вырабатываемой в мире энергии затрачивается на освещение [1], а в Украине на освещение расходуется еще больше — около 30% от всей производимой в стране электроэнергии [2]. В связи с этим, разработка и внедрение новых энергосберегающих технологий в сфере освещения является перспективным направлением развития светотехники. С этой целью в последнее десятилетие активно разрабатываются и внедряются осветительные приборы с высокоэффективными полупроводниковыми источниками света — светодиодами (СД) и светодиодными модулями (СДМ), которые при излучении одинакового светового потока потребляют значительно меньше электроэнергии, чем лампы накаливания.

Так, современные мощные светодиодные модули американской компании Cree серии СХА имеют световую отдачу до 125 лм/Вт [3], в то время как для ламп накаливания она составляет 8–13 лм/Вт [4]. В апреле 2014 года появилось сообщение о том, что эта компания создала белые светодиоды с рекордной светоотдачей, равной 303 лм/Вт, что в 30 раз экономичней ламп накаливания и в 6 раз — люминесцентных ламп [5]. Вместе с тем, по мере увеличения мощности СД растет и количество теплоты, выделяемой в активной области полупроводникового кристалла, и в случае недостаточно эффективного ее отвода может произойти перегрев кристалла и, как следствие, ухудшение световых и цветовых характеристик, снижение срока службы и надежности СД и осветительного прибора в целом.

Очевидно, что охлаждение светодиодов в осветительном приборе является одной из основных задач, от решения которой зависит обеспечение надежной работы осветительного прибора [6].

Для обеспечения заданного температурного режима СД в ряде работ предлагается использовать воздушные системы охлаждения с применением высокотеплопроводных подложек [7], различного вида радиаторов [8], вентиляторов [9], а также жидкостные системы с замкнутым водяным контуром [10]. Наиболее распространенными являются воздушные системы охлаждения с применением радиаторов в условиях естественной или вынужденной конвекции воздуха. Необходимость увеличения площади поверхности радиатора в условиях естественной конвекции приводит к возрастанию его геометрических размеров, снижению эффективности ребер и увеличению теплового сопротивления. Более эффективными являются воздушные системы охлаждения с вынужденной конвекцией воздуха, в которых в качестве основания радиатора используется паровая камера, эффективно передающая теплоту от СДМ к ребрам радиатора независимо от их удаленности от СДМ, при этом ребра радиатора дополнительно обдуваются вентилятором [11]. Однако совмещение в одном узле СДМ, паровой камеры, радиатора и вентилятора не всегда может быть оправданно с конструктивной точки зрения, в частности, при построении осветительных приборов с большим количеством рассредоточенных в пространстве СДМ.

В [12, 13] впервые предложено использовать тепловые трубы (ТТ) в качестве элементов каркаса осветительного прибора с большим количеством рассредоточенных в пространстве СДМ, что по-

звояет значительно увеличить отводимую от него тепловую мощность. В [14] описана теплоотводящая система для СДМ мощностью 35–100 Вт, которые устанавливаются в зоне нагрева плоской алюминиевой ТТ термосифонного типа длиной 400 мм на ее продольном ребре шириной 30 мм [15]. Зона охлаждения ТТ снабжена ребристым радиатором с поверхностью охлаждения 1200–2400 см². Как и в [12, 13], эта конструкция позволяет вынести зону отвода теплоты ТТ за пределы зоны нагрева с установленными здесь СДМ, что удобно с конструктивной точки зрения при создании осветительных приборов с рассредоточенными в пространстве СДМ. Вместе с тем, в [14] не приведены основные рабочие характеристики ТТ и системы теплоотвода на ее основе, такие как, например, зависимость температуры в зоне нагрева ТТ от подводимого теплового потока, значения термического сопротивления ТТ, влияние ориентации ТТ в поле силы гравитации на ее рабочие характеристики, параметры потока охлаждающего воздуха и т. п. Это не позволяет использовать опубликованные результаты для практического применения при создании других аналогичных конструкций мощных светодиодных осветительных приборов на основе алюминиевых ТТ.

Задачей данной работы является исследование рабочих характеристик конструкций алюминиевых ТТ, подобных [14], которые предназначены для использования в качестве теплопередающих элементов мощного светодиодного осветительного прибора с целью обеспечения заданного температурного режима СДМ.

Конструкция мощного светодиодного осветительного прибора с ТТ

Особенностью конструкций осветительных приборов, в которых в качестве теплопередающих элементов предусматривается использование алюминиевых тепловых труб с капиллярной структурой в виде канавок, является расположение ТТ в пространстве таким образом, чтобы ее

зона конденсации находилась выше зоны испарения или на одном уровне с ней. В этом случае силы гравитации не будут препятствовать возврату сконденсировавшегося теплоносителя по канавкам капиллярной структуры из зоны конденсации в зону испарения ТТ и не будут нарушать работу ТТ. В качестве примера такой конструкции на **рис. 1** показана схема светодиодного осветительного прибора с мощными осветительными модулями, смонтированными на пяти алюминиевых тепловых трубах с Ω -образными канавками.

Зона охлаждения ТТ расположена между верхним и нижним радиаторами с игольчатыми ребрами с обеспечением теплового контакта. В основании радиаторов между игольчатыми ребрами выполнены сквозные вентиляционные отверстия. Для создания вынужденной конвекции охлаждающего воздуха в конструкции осветительного прибора предусмотрен вентилятор.

Макет теплоотводящей системы

Для экспериментального исследования рабочих характеристик алюминиевых тепловых труб в составе теплоотводящей системы осветительного прибора был изготовлен тепловой макет, включающий две ТТ (**рис. 2**).

В состав макета теплоотводящей системы входят следующие компоненты:

- две аммиачные алюминиевые тепловые трубы (ТТ1 и ТТ2) длиной 1018 мм каждая с одинадцатью Ω -образными канавками на внутренней поверхности корпуса ТТ, изготовленные из алюминиевого профиля АС-КРА 3,5-Р2 (ширина полка 30 мм, внешний диаметр и расстояние между опорными поверхностями полков 7,5 мм);
- имитаторы теплового потока, выполненные на основе омических электронагревателей, расположенных в зоне нагрева тепловых труб (по 3 шт. на каждой), с максимальной электрической мощностью 100 Вт на одной ТТ;
- два радиатора размерами 122×38×330 мм на основе алюминиевого профиля БПО-1909,

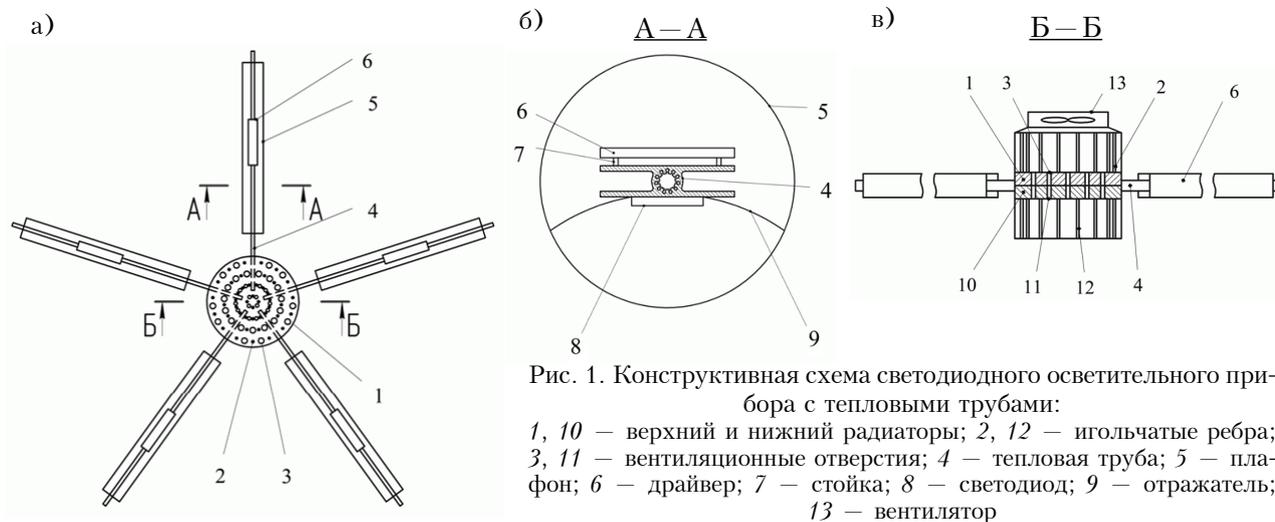


Рис. 1. Конструктивная схема светодиодного осветительного прибора с тепловыми трубами:

- 1, 10 – верхний и нижний радиаторы; 2, 12 – игольчатые ребра; 3, 11 – вентиляционные отверстия; 4 – тепловая труба; 5 – плафон; 6 – драйвер; 7 – стойка; 8 – светодиод; 9 – отражатель; 13 – вентилятор

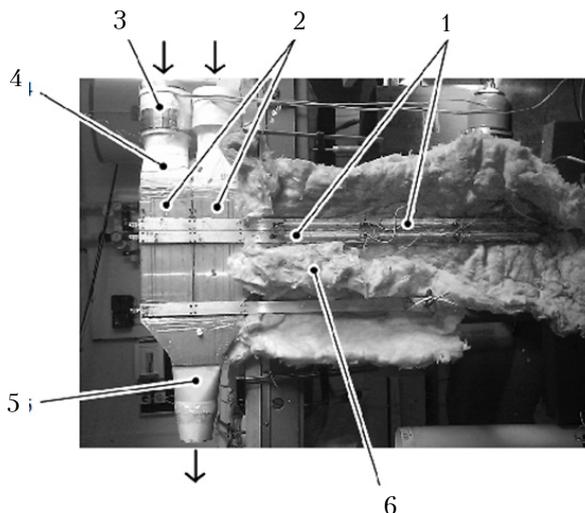


Рис. 2. Общий вид макета теплопроводящей системы: 1 – тепловые трубы с нагревателями; 2 – радиаторы; 3 – нагнетающий вентилятор; 4 – входной патрубок; 5 – выходной патрубок; 6 – базальтовая теплоизоляция

установленные рядом друг с другом на поверхностях зон охлаждения ТТ, с суммарной площадью теплоотдающей поверхности каналов внутри радиаторов 5828 см² (всего 26 ребер размерами 32×330 мм, толщиной 3 мм у основания, 2 мм у вершины, с расстоянием между осями 10 мм);

– два вентилятора «Вентс 125 ВКО пресс», обеспечивающие подачу набегающего потока охлаждающего воздуха.

К вершинам охлаждающих ребер радиаторов плотно прилегает изоляционная пластина, при этом внутри радиаторов образуется 24 сквозных воздушных канала трапециевидного сечения площадью $240 \cdot 10^{-6}$ м² каждый. Для того чтобы обеспечить равномерное поле значений скорости охлаждающего воздуха в этих каналах и минимальные гидравлические потери в воздушном тракте, были установлены два патрубка на входе в каналы и один на выходе.

С целью снижения контактного теплового сопротивления между контактирующими поверхностями электронагревателей и зоны нагрева ТТ, а также между зоной охлаждения ТТ и радиаторами была нанесена теплопроводная паста КПТ-8. Длина зоны нагрева ТТ составляла 676 мм, зоны охлаждения – 244 мм. Для уменьшения потерь в окружающую среду с нагретых поверхностей нагревателей, зоны нагрева и транспорта ТТ покрывались слоем теплоизолирующего материала на основе базальтового волокна.

Габаритные размеры теплового макета – 1018×330×38 мм.

Экспериментальная установка и методика исследований

В экспериментальную установку для исследования тепловых характеристик ТТ и теплопроводящей системы на их основе (рис. 3) входят: рабо-

чий участок (описанный выше макет теплопроводящей системы); система подвода, измерения и регулирования электрической мощности; автоматизированная система измерения температуры и обработки результатов измерений на основе персонального компьютера (ПК).

Электрическая мощность нагревателей на каждой ТТ регулировалась с помощью отдельного лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) и контролировалась с помощью индивидуально ваттметра W типа Д502 класса точности 0,1. В ходе проведения экспериментов подводимая к каждой ТТ мощность (за вычетом утечек теплоты через теплоизоляцию) изменялась в пределах от 50 до 100 Вт.



Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Отвод теплоты с поверхности радиаторов осуществлялся воздухом, который подавался нагнетающими вентиляторами в их сквозные каналы. Скорость набегающего потока охлаждающего воздуха регулировалась с помощью ЛАТР и контролировалась анемометром типа Meterman TMA 10.

Температурное поле теплового макета и окружающего воздуха измерялось девятью медь-константановыми термопарами с диаметром электродов 0,16 мм. Схема установки термопар приведена на рис. 4 (термопара 7, предназначенная для измерения температуры окружающего воздуха, не показана). Термопары подключались к автоматизированной системе измерения температуры на основе персонального компьютера, имеющей 24 измерительных канала и обеспечивающей время опроса всех термопар 5 с.

Управляющие сигналы для опроса датчиков температуры (термопар) передавались от ПК по последовательному интерфейсу RS232. Основными составляющими элементами системы, кроме ПК, являются также два модуля аналогового ввода МВА8 и адаптер сигналов АС4. Аналоговые сигналы с модуля МВА8 передавались на адаптер сигналов АС4 по интерфейсу RS485.

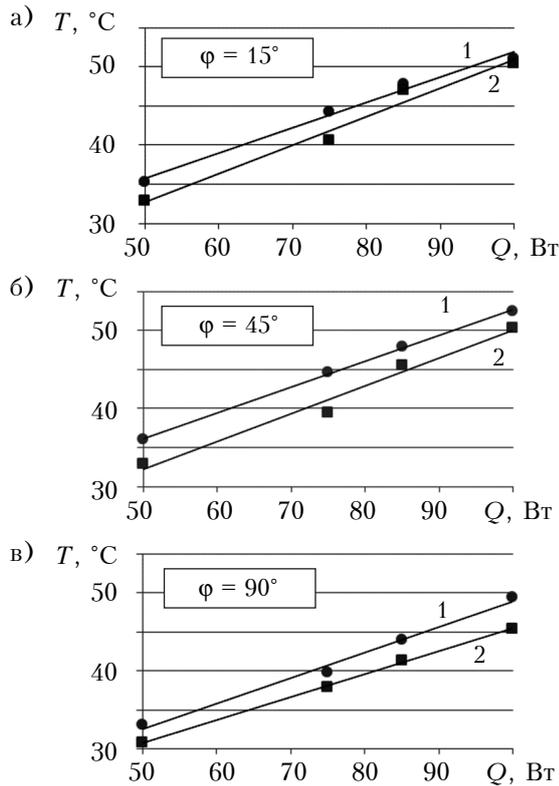


Рис. 6. Зависимость температуры в зоне нагрева ТТ1 от подводимого теплового потока при различных углах ее наклона и скорости охлаждающего воздуха: 1 – 0,8 м/с; 2 – 2,1 м/с

углах их наклона ϕ и значениях скорости охлаждающего воздуха v , видно, что во всех исследованных режимах минимум термического сопротивления достигался в области значений теплового потока 75 Вт. Отличие значений термического сопротивления ТТ1 и ТТ2 обусловлено различным объемом заправленного теплоносителя: в ТТ1 он был большим, вследствие чего ее зона испарения была больше затоплена теплоносителем, что приводило к снижению коэффициента теплоотдачи в зоне испарения и, соответственно, к росту термического сопротивления ТТ. Вместе с тем, полученные абсолютные значения термического сопротивления обеих ТТ (от 0,012 до 0,044 °С/Вт) находятся в пределах, характерных для мелкосерийных аммиачных алюминиевых тепловых труб, изготавливаемых в лаборатории тепловых труб НТУУ «КПИ».

Как следует из рис. 5, термическое сопротивление ТТ практически не зависит от скорости охлаждающего воздуха, т. е. изменение условий внешнего теплообмена при прочих неизменных параметрах не влияет на термическое сопротивление тепловых труб, но зависит от ориентации ТТ в пространстве. Так, при максимальном передаваемом тепловом потоке ($Q = 100$ Вт) наименьшее значение термического сопротивления обеих ТТ наблюдалось при $\phi = 15^\circ$, а наибольшее — при $\phi = 45^\circ$. Это можно объяснить тем,

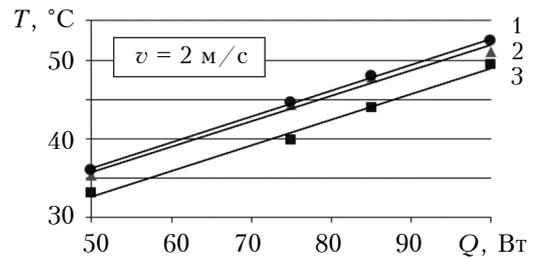


Рис. 7. Зависимость температуры в зоне нагрева ТТ1 от подводимого теплового потока при различных углах ее наклона: 1 – 45°; 2 – 15°; 3 – 90°

что ориентация ТТ влияет на условия стекания конденсата по стенке и его взаимодействия со встречным потоком пара, соответственно, она влияет и на величину коэффициента теплоотдачи в зоне конденсации.

Наименьшее значение термического сопротивления (0,012°С/Вт) имела ТТ2 при $\phi = 15^\circ$, наибольшее (0,044°С/Вт) — ТТ1 при $\phi = 45^\circ$.

Влияние определяющих факторов (подводимого теплового потока, скорости охлаждающего воздуха и угла наклона ТТ к горизонту) на температуру в зоне нагрева для одной из ТТ (ТТ1) приведено на рис. 6 и 7. Как видно из рис. 6, температура в зоне нагрева ТТ растет линейно с увеличением подводимого теплового потока и изменяется в пределах от 31,0 до 52,5°С при изменении Q в диапазоне от 50 до 100 Вт. С увеличением скорости охлаждающего воздуха с 0,8 до 2,1 м/с температура ТТ в зоне нагрева снижается на 2–4°С (т. е. на 6–8%), что обусловлено улучшением теплообмена между радиатором и охлаждающим воздухом и снижением теплового сопротивления в зоне теплоотвода. Из рис. 6 и 7 видно характерное влияние угла наклона на температуру в зоне нагрева ТТ: она снижается на 2–5°С (6–9%) при вертикальной ориентации ТТ по сравнению с углами наклона 15° и 45° .

Важной рабочей характеристикой ТТ является перепад температуры по ее длине ΔT , определяемый как разность температур в зонах нагрева и охлаждения. В результате исследований двух ТТ установлено, что при минимальном значении подводимого теплового потока (50 Вт)

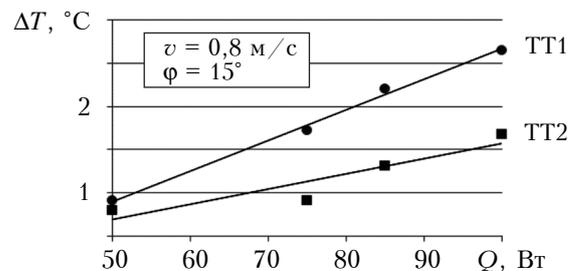


Рис. 8. Зависимость перепада температуры ΔT между зонами нагрева и охлаждения от подводимого теплового потока для ТТ1 и ТТ2

$\Delta T = 0,9 - 1,7^\circ\text{C}$, а при его максимальном значении (100 Вт) $\Delta T = 1,7 - 3,1^\circ\text{C}$. На рис. 8 можно увидеть, что перепад температуры по ТТ растет линейно с увеличением подводимого теплового потока.

Выводы

1. Результаты проведенных экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности практического применения аммиачных алюминиевых тепловых труб в качестве теплопередающих элементов каркаса мощных энергоэффективных осветительных приборов на основе светодиодных модулей.

2. При максимальном значении подводимого теплового потока от светодиодных модулей, установленных на одной тепловой трубе, равном 100 Вт, в исследованном диапазоне определяющих параметров (геометрических размеров зон ТТ, теплоотдающей поверхности радиаторов, скоростей набегающего потока охлаждающего воздуха, углов наклона ТТ к горизонту) температура на поверхности тепловой трубы в зоне установки светодиодных модулей не превышала $52,5^\circ\text{C}$, что вполне приемлемо для условий охлаждения светодиодных источников света.

3. Использование в каркасе осветительного прибора пяти исследованных тепловых труб (см. рис. 1) позволит отвести от светодиодных модулей суммарный тепловой поток до 500 Вт. При коэффициенте полезного действия мощных светодиодов в среднем 75% это эквивалентно потребляемой электрической мощности осветительного прибора 665 Вт. С учетом того, что световая отдача современных светодиодов приблизительно в десять раз выше, чем у ламп накаливания, световой поток от предложенного осветительного прибора будет эквивалентен потоку в 6650 Вт от светильника с лампами накаливания, что подтверждает перспективность использования предложенной конструкции с целью экономии энергоресурсов.

4. При условии обеспечения нормального теплового режима мощность (500 Вт) светодиодного осветительного прибора предложенной конструкции значительно превышает мощность известных светодиодных светильников промышленного назначения с радиаторной системой теплоотвода без ТТ и вентилятора, например светильника ДСП27У-150 (Корпорация «Ватра», г. Тернополь), мощность которого составляет 150 Вт.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Светодиоды: перспективы и барьеры // Современная светотехника. — 2012. — №5. — С. 3–6.
2. Морозов А. А., Клименко В. П., Корбут В. Б., Иевлев Н. Г., Бутко В. Г. Опыт разработки и внедрения систем светодиодного освещения // Промелектро. — 2014. — № 2(86). — С. 30–36.
3. Дорожкин Ю., Матешев И., Туркин А. Светодиодные модули серии СХА компании Cree: характеристики и применение // Полупроводниковая светотехника. — 2012. — № 5. — С. 50–53.
4. Полищук А., Туркин А. Дegradaция полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов // Компоненты и технологии. — 2008. — № 2. — С. 25–28.
5. Новости. Созданы светодиоды, обладающие светоотдачей выше 300 лм/Вт. 02.04.2014 / Режим доступа: www.engelihg.com/page/8281
6. Сорокин В. М. Организационно-экономические механизмы внедрения светодиодных осветительных систем в масштабах национальной экономики // Світло люкс. — 2012. — № 1. — С. 8–16.
7. Fan A., Bonner R., Sharratt S., Ju Y. S. An innovative passive cooling method for high performance light-emitting diodes // Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM), 28th Annual IEEE. — 2012. — P. 319–324. — DOI : 10.1109/STHERM.2012.6188867
8. Староверов К. Системы охлаждения для светодиодов // Новости электроники. — 2008. — № 17. — С. 21–23.
9. Пат. 72606 України. Світлодіодне джерело світла для вуличних світильників / М. І. Носанов, В. І. Тимченко, Т. І. Романова, Ю. О. Некрашенко, В. І. Шаталов. — 2012. — Бюл. № 16.
10. Sorensen H. Water cooling of high power light Emitting Diode // Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (Itherm), 13th IEEE Intersociety Conferenc. — 2012. — P. 968–974. — DOI : 10.1109/ITHERM.2012.6231531.
11. Wang J.-C., Wang R.-T., Chang T.-Li, Hwang D.-S. Development of 30 Watt high-power LEDs vapor chamber-based plate // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2010. — Vol. 53, iss.19–20. — P. 3990–4001. — Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.018>
12. Николаенко Ю. Е. Решение тепловой проблемы мощных светодиодных светильников с помощью тепловых труб // Труды XIII МНПК «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, г. Одесса. — 2012. — С. 203.
13. Пат. 68831 України. Люстра / Ю. Є. Ніколаєнко, Т. Ю. Ніколаєнко. — 2012. — Бюл. № 7.
14. Гвоздев С. М., Митрофанов А. В., Сафонов С. А., Холодилов В. И. Об использовании тепловых труб в проектировании мощных светильников со светодиодами // Светотехника. — 2012. — № 2. — С. 19–21.
15. Хайрнасов С. М., Рассамкин Б. М., Рассамкин А. Б. Применение алюминиевых тепловых труб в системах охлаждения радиоэлектронной аппаратуры // Труды XV МНПК «Современные информационные и электронные технологии». Том II. — Украина, г. Одесса. — 2014. — С. 8–11.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 14.06 2014 г.*

М. О. ЛОЗОВИЙ, Ю. Є. НИКОЛАЄНКО, Б. М. РАССАМАКИН, С. М. ХАЙРНАСОВ

Україна, Київ, НТУУ «КПІ»

E-mail: yunikola@ukr.net, nirtef@kpi.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВИХ ТРУБ ДЛЯ СВІТЛОДІОДНИХ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

Приведено результати експериментального моделювання теплових характеристик двох алюмінієвих аміачних теплових труб (ТТ) з канавчатою капілярною структурою, призначених для використання як

теплопередавальні елементи в конструкції потужного світлодіодного освітлювального приладу з вимушеним повітряним охолодженням. В діапазоні значень теплового потоку, що підводиться, від 50 до 100 Вт і швидкості повітряного потоку, що набігає, від 0,8 до 2,1 м/с температура в зоні нагрівання ТТ в залежності від кута її нахилу до горизонту знаходилася в межах від 31,0 до 52,5°C, при цьому перепад температури по ТТ складав від 0,9 до 3,1°C. Значення теплового опору ТТ знаходилася в діапазоні від 0,012 до 0,044°C/Вт.

Ключові слова: світлодіод, освітлювальний прилад, система охолодження, тепла труба, теплові характеристики.

DOI: 10.15222/ТКЕА2014.2.32
UDC 536.248.2; 628.941.8

М. А. LOZOVOI, Yu. E. NIKOLAENKO,
B. M. RASSAMAKIN, С. М. KHAIRNASOV

Ukraine, Kiev, NTUU “KPI”
E-mail: yunikola@ukr.net, nirtef@kpi.ua

RESEARCH ON THERMAL CHARACTERISTICS OF HEAT PIPES FOR LED LIGHTNING DEVICES

New energy-saving technologies for lighting is a promising trend in lighting technology. To this end, during the recent decade, have been actively developed and implemented lighting units based on LED modules. Reliability of such devices is largely dependent on the ensuring of cooling of the LEDs. Heat pipes are being used with ever increasing frequency for increasing an efficiency of cooling of powerful LEDs within a lightning device. Results of experimental modeling of thermal characteristics of two aluminum heat pipes with grooved capillary structure and ammonia used as a heat transfer agent, designed for application as a heat transfer elements in designs of powerful LED lightning device with forced air cooling are presented in this paper. It is shown that for the heat flux range of 50 to 100 W and for incident flow speed in the range of 0.8 to 2.1 m/s the temperature in the heating zone of the heat pipe falls into the range of 31.0 to 52.5 °C. In this case the temperature difference along the heat pipe is between 0.9...1.7 °C, when a minimal value of the fed heat flux is 50 W, and 1.7...3.1°C, when a maximum value of the heat flux is 100 W. The value of heat transfer resistance of the heat pipes was in the range of 0.012 to 0.044 °C/W. The key factors influencing the thermal characteristics of the heat pipes are: the value of the fed heat flux, the speed of cooling air flux, heat pipe inclination angle with respect to the horizon. By using five such heat pipes within the powerful LED lightning device it is possible to achieve an elimination of the total heat flux from LED modules up to 500 W. At an efficiency factor of LEDs of about 75% this is equivalent to intake power 665 W. Taking into account that luminous efficiency of modern LEDs is about 10 times as high as those of incandescent lamps, proposed lightning device will produce a luminous flux which is equivalent to the luminous flux of a lightning device with incandescent lamps with a power of 6650 W, so that this will allow reducing an input power of the lightning device by 5985 W.

Key words: LED, lightning device, cooling system, heat pipe, thermal characteristics.

REFERENCES

- [LEDs: prospects and barriers]. *Sovremennaja svetotekhnika*, 2012, no 5, pp. 3–6. (in Russian)
- Morozov A. A., Klimenko V. P., Korbut V. B., Iyevlev N. G., Butko V. G. [An experience of development and inoculation of LED lightning systems]. *Promelektro*, 2014, no 2(86), pp. 30–36. (in Russian)
- Dorozhkin Yu., Mateshev I., Turkin A. [LED modules of the CXA series from CREE: characteristics and application]. *Poluprovodnikovaja svetotekhnika*, 2012, no 5, pp. 50–53. (in Russian)
- Polishchuk A., Turkin A. [The degradation of the semiconductor LEDs based on gallium nitride and its solid solutions]. *Komponenty i tekhnologii*, 2008, no 2, pp. 25–28. (in Russian)
- [News. LEDs with luminous efficiency over 300 lm/W have been created]. 02.04.2014: www.engelihg.com/page/8281. (in Russian)
- Sorokin V. M. [Organizational and economical mechanisms of inoculation of LED lightning systems on the scale of a national economics]. *Switlo luks*, 2012, no 1, pp. 8–16. (in Russian)
- Fan A., Bonner R., Sharratt S., Ju Y. S. An innovative passive cooling method for high performance light-emitting diodes. *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM)*, 2012, 28th Annual IEEE, Date 18–22 March 2012, pp. 319-324. DOI : 10.1109/STHERM.2012.6188867
- Staroverov K. [Cooling systems for LEDs]. *Novosti elektroniki*, 2008, no 17, pp. 21–23. (in Russian)
- Pat. 72606 Ukraine. [LED light source for street lamps]. Nosanov M. I., Tymchenko V. I., Romanova T. I., Nekrashenko Y. O., Shatalov V. I. 2012, byul. no 16.
- Sorensen H. Water cooling of high power light emitting diode. *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITHERM)*, 2012 13th IEEE Intersociety Conference on May 30 2012–June 1 2012, pp. 968–974. DOI: 10.1109/ITHERM.2012.6231531.
- Wang J.-C., Wang R.-T., Chang T.-Li, Hwang D.-S. Development of 30 Watt high-power LEDs vapor chamber-based plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 53, is. 19-20, pp. 3990–4001. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.018>
- Nikolaenko Yu. E. [Solution of the heat problem of high power LED lamps with heat pipes]. *Proc. of 13th International scientific-practical conf. “Modern information and electronic technologies”*, Ukraine, Odessa, 2012, pp. 203. (in Russian)
- Pat. 68831 Ukraine. [Luster]. Yu. E. Nikolaenko, T. Yu. Nikolaenko. 2012, byul. no 7.
- Gvozdev S. M., Mitrofanov A. V., Safonov S. A., Kholodilov V. I. [On the application of heat pipes in designing powerful lightning devices with LEDs]. *Svetotekhnika*, 2012, no 2, pp. 19–21. (in Russian)
- Khairnasov S. M., Rassamakin B. M., Rassamakin A. B. [Aluminium heat pipes application to electronic cooling systems]. *Proc. of 15th International scientific-practical conf. “Modern information and electronic technologies”*, Vol. II. Ukraine, Odessa, 2014, pp. 8–11. (in Russian)