

Валерий Кисеев | Valery.Kiseev@usu.ru | Дмитрий Аминев | ruberus@yandex.ru
 Виктор Черкашин | vikgen@e1.ru | Радислав Мурзин | murzin@sintoural.ru

Двухфазные теплопередающие системы

для охлаждения светодиодных светильников

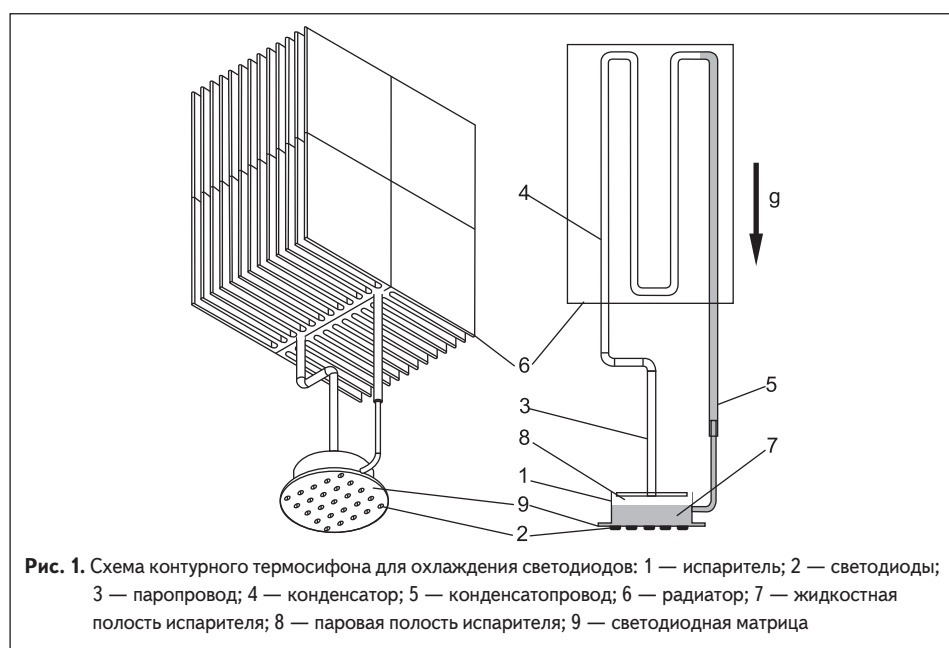
Рассматривается возможность и целесообразность использования контурных термосифонов (КТС) для охлаждения светодиодных (LED) светильников с целью повышения их надежности и экономичности. Приводится приближенная методика расчета теплопередающей способности КТС, рассмотрены конкретные варианты и представлены результаты их экспериментального исследования в зависимости от величины тепловой нагрузки, теплофизических свойств теплоносителей, геометрических и теплофизических свойств радиатора для рассеяния тепла в окружающую среду.

Основной привлекательной чертой светодиодной технологии является принципиально более высокий по сравнению с альтернативными технологическими решениями уровень светоотдачи, что способно привести к значительным

экономическим и социальным эффектам. Важнейшим из них является радикальное сокращение затрат электроэнергии на освещение, составляющих по различным оценкам до 18–20% всех затрат произведенной электроэнергии.

Таблица. Характеристики источников света

Тип источника света (ИС)	Световая отдача ИС, лм/Вт	Эффективность изделия с данным ИС, лм/Вт	Ресурс, ч
Лампы накаливания	8–13	6–10	1 000
Галогенные лампы	16–37	12–20	50–6 000
Компактные люминесцентные лампы	50–70	35–50	6 000–15 000
Металлогалогенные лампы	60–100	<40	6 000–10 000
Люминесцентные лампы	60–100	55–70	15 000–32 000
Полупроводниковые светодиоды (Cree XR-E)	100–110	90–100	>50 000
Натриевые лампы высокого давления	90–130	<50	15 000–32 000



Сравнительные характеристики источников света на основе различных технологий по состоянию на сегодня представлены в таблице.

Хотя стоимость светодиодных ламп более чем в 50 раз выше стоимости ярко-белых ламп и приблизительно в семь раз выше стоимости компактной люминесцентной лампы, цена светодиодов значительно упала за последние годы и продолжает снижаться. Через несколько лет, при улучшении характеристик и уменьшении цены, светодиодные источники будут вполне конкурентоспособны по себестоимости.

Однако следует также принимать во внимание факторы, свидетельствующие не в пользу светодиодных устройств и препятствующие их внедрению. Светоотдача светодиодного источника света зависит от температуры, при которой функционируют светодиоды. При температурах более +80 °С их светоотдача заметно снижается и стремится к нулю при температуре выше +120 °С. Поэтому необходимо разработать и задействовать такую систему терморегулирования светодиодных источников света, которая обеспечит требуемые значения светового потока, срока службы и надежность при относительно невысокой стоимости всего конкурентоспособного изделия [1].

Подобные проблемы с терморегулированием существуют также и в других технологиях, например авиационно-космических, современных компьютерных процессорах и в других областях техники. Для решения этих проблем все чаще используются двухфазные теплопередающие системы — тепловые трубы (ТТ) и устройства на их основе [2–4].

Поэтому в настоящей работе была поставлена задача: разработать и исследовать технологии охлаждения светодиодных матриц мощностью более 30 Вт с применением эффективных теплопроводов — контурных тепловых труб [5–7], включая наиболее простые из них — контурные термосифоны [8–10].

Разработка и исследование контурных термосифонов для охлаждения светодиодных матриц

Принципиальная схема контурного термосифона (КТС)

Принципиальная схема контурного термосифона представлена на рис. 1.

Контурный термосифон содержит испарительную камеру (1) с паровой (8) и жидкостной (7)

полостями, паропровод (3) и конденсаторпровод (5), соединенные с испарительной камерой и конденсатором (4), выполненным в виде змеевика и размещенным в корпусе радиатора (6). Таким образом, КТС представляет собой теплопередающую систему, выполненную в виде замкнутого двухфазного контура. Паропровод, конденсаторпровод и конденсатор контурного термосифона могут быть выполнены из гибких трубок, при этом радиатор с размещенным в нем конденсатором могут быть изготовлены литьем под давлением, а сам радиатор установлен в любом месте с максимальной естественной конвекцией. В зависимости от месторасположения радиатора в осветительном устройстве, для возврата конденсата используют капиллярные или гравитационные силы: если радиатор расположен выше испарителя, то после конденсации пара в конденсаторе конденсаторпровод имеет столб жидкости с перепадом давления (ΔP_g), обеспечивающим возврат конденсата в испаритель, тем самым замыкая испарительно-конденсационный цикл и обеспечивая циркуляцию теплоносителя. Если же испаритель расположен выше или на одном горизонте с радиатором, то для организации циркуляции теплоносителя используется капиллярная структура, расположенная в испарителе, которая при испарении теплоносителя обеспечивает капиллярное давление, необходимое для возврата теплоносителя от конденсатора к испарителю. Светодиоды (2), размещены на теплопроводящей металлической подложке (светодиодной матрице) (9), в качестве которой использована нижняя поверхность испарительной камеры. Теплопередающая система, из которой предварительно откачан воздух, заполнена теплоносителем с температурой замерзания ниже климатической.

Например, в южных районах, где температура воздуха в зимний период не ниже $+5^\circ\text{C}$, в качестве теплоносителя может быть использована дистиллированная вода, а в северных районах с температурой воздуха в зимний период ниже $+5^\circ\text{C}$ в качестве теплоносителя могут быть использованы метанол, ацетон, этанол, температура замерзания которых ниже -60°C .

При подаче напряжения на светодиоды они излучают световую энергию, при этом происходит выделение тепловой энергии, которая через подложку передается к жидкости, находящейся в жидкостной полости испарителя. Жидкость испаряется или кипит (в зависимости от плотности теплового потока), превращаясь

в пар и выделяя скрытую теплоту парообразования (которая высока у большинства жидкостей и превышает их теплоемкость в сотни раз). При этом давление пара в паровой полости больше давления пара в конденсаторе из-за разности температур между ними, и пар устремляется по паропроводу в конденсатор, где конденсируется и отдает скрытую теплоту при превращении пара в жидкость конденсатору и от него посредством радиатора в окружающую среду. Образовавшийся конденсат возвращается по конденсаторопроводу в жидкостную полость за счет действия гравитационных или капиллярных сил, тем самым замыкая испарительно-конденсационный цикл теплопередачи.

Предлагаемая конструкция КТС позволяет трансформировать плотность теплового потока от светодиодов, которые компактно расположены на металлической подложке, имеющей размер существенно меньше размеров радиатора, пространственно (от 10 см до нескольких метров) разделять источник (светодиоды) и сток тепла (радиатор). Все это, вместе с отсутствием движущихся деталей в системе охлаждения, создает положительный эффект, обусловленный увеличением термодинамической эффективности (за счет использования большой скрытой теплоты парообразования и в свободе размещения радиатора в местах наиболее интенсивной теплоотдачи при естественной и/или вынужденной конвекции).

На рис. 2 представлены фотографии разработанных экспериментальных КТС для охлаждения светодиодных матриц номинальной мощностью более 50 Вт (слева) и светодиодная матрица с LED на алюминиевой подложке (справа) толщиной 1,7 мм и диаметром 80 мм (20–40 светодиодов Oslon SSL LUWCP7P-KTLP-5E8G компании Osram). С целью снижения количества светодиодов (а следовательно, и стоимости матрицы) был увеличен номинальный ток на светодиод до 1 А, так что номинальная нагрузка на светодиод составляла до 3,6 Вт (обычно используют 1 Вт). Вызванное увеличением номинального тока с 0,35 до 1 А снижение светоотдачи составило около 32%.

Испарительная камера всех исследованных КТС выполнялась в виде таблетки с внешним диаметром 60 мм и толщиной 25 мм, материал — медь. Паропровод и змеевиковый конденсатор (4 петли с шагом 25 мм) выполнены из медных трубок с внутренним диаметром 4×1 мм, конденсаторпровод — из медной трубки с внутренним диаметром $2 \times 0,5$ мм.

Использовались два стандартных пластинчатых радиатора размерами 125×98 мм с длиной ребер 39 мм (КТС № 1) и 125×196 мм с длиной ребер 46 мм (КТС № 2). Общая площадь оребренной поверхности для радиатора КТС № 1 составляла $0,20 \text{ м}^2$, а для радиатора КТС № 2 соответственно $0,48 \text{ м}^2$. На безреберных поверхностях радиатора были выполнены канавки для змеевикового конденсатора, и две половинки радиатора через теплопроводящую пасту стягивались болтами так, что змеевик находился внутри радиатора, как показано на рис. 1. Материал радиатора — алюминий (КТС № 2). С целью проверки свойств теплоотсеивающих пластмасс (Теплосток Т6-Э5-7, ООО «СпецПласт-М») [11] с теплопроводностью $8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ для КТС № 1 проводилось сравнение радиаторов из алюминия (полностью одинаковых размеров) и из данной теплоотсеивающей пластмассы.

Оценка гидродинамического предела работы КТС

В основе расчета гидродинамического предела работы КТС лежит основное необходимое условие его работоспособности, обеспечивающее циркуляцию теплоносителя по всему замкнутому контуру. Это условие математически выражается в виде неравенства:

$$\Delta P_g = (\rho_l - \rho_v)gH \geq \Delta P_v + \Delta P_f \quad (1)$$

где ΔP_g — перепад давлений, вызванный действием массовых сил; ρ_l — плотность жидкой фазы теплоносителя; ρ_v — плотность паровой фазы теплоносителя; g — ускорение свободного падения; H — расстояние между крайними точками КТС в направлении вектора ускорения свободного падения (превышение конденсатора над испарителем); ΔP_v — потери давления на трение в паровой линии; ΔP_f — потери давления на трение в жидкостной линии.

Условие равенства в (1) позволяет найти минимальное значение H для реализации условий работоспособности КТС в виде:

$$H = (\Delta P_v + \Delta P_f) / ((\rho_l - \rho_v)g) \quad (2)$$

Обычно это условие записывают для так называемых номинальных рабочих режимов, повышая минимум H еще на 25%. Тогда получим:

$$H = (\Delta P_v + \Delta P_f) / 0,75((\rho_l - \rho_v)g) \quad (3)$$

Режим течения пара (ΔP_v) может быть ламинарный или турбулентный, в зависимости от числа Re. Для жидкости (ΔP_f) режим течения, как правило, ламинарный:

$$\Delta P_v = 128 \frac{\eta_v(T_v)}{\rho_v(T_v)} \times \frac{L_v}{\pi d_v^4} \times \dot{m},$$

$$\dot{m} = \frac{Q}{H_{ev}(T_v)},$$

$$\text{Re} = \frac{4Q}{\pi \eta_v(T_v) H_{ev}(T_v) d_v} \leq 2100. \quad (4)$$

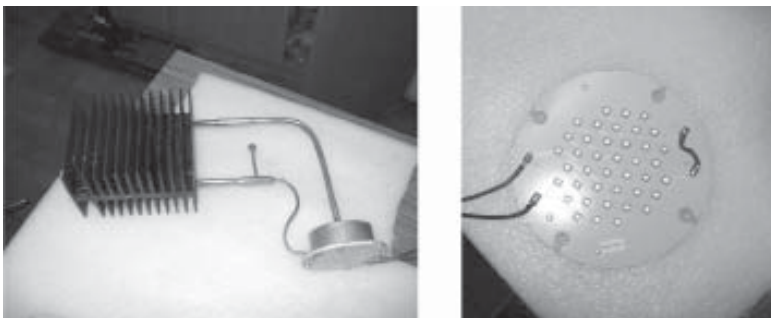


Рис. 2. Контурный термосифон (КТС № 1) со светодиодной матрицей

$$\Delta P_v = 0,6328 \operatorname{Re}^{0,75} \frac{\eta_v(T_v)}{\rho_v(T_v)} \times \frac{L_v}{\pi d_v^4} \times \frac{Q}{H_{ev}(T_v)},$$

$$\operatorname{Re} > 2100; \quad (5)$$

$$\Delta P_l = 128 \frac{\eta_l(T_l)}{\rho_l(T_l)} \times \frac{L_l}{\pi d_l^4} \times \frac{Q}{H_{ev}(T_v)}, \quad (6)$$

где $\eta_v(T_v)$, $\rho_v(T_v)$ — вязкость и плотность пара при температуре пара T_v ; $\eta_l(T_l)$, $\rho_l(T_l)$ — вязкость и плотность жидкости при температуре жидкости T_l ; L_v и d_v — длина и диаметр парового канала; L_l и d_l — длина и диаметр жидкостного канала; \dot{m} — массовый расход теплоносителя; Q — тепловой поток (нагрузка); $H_{ev}(T_v)$ — удельная теплота фазового превращения жидкость–пар.

Вводя для удобства коэффициенты E , C , D , получим окончательную формулу для расчета функциональной зависимости $Q = f(H)$ в виде:

$$Q = \frac{0,75(\rho_l(T_l) - \rho_v(T_v))gH}{(E + D)},$$

$$\operatorname{Re} \leq 2100; \quad (7)$$

$$Q = \frac{0,75(\rho_l(T_l) - \rho_v(T_v))gH}{(C + D)},$$

$$\operatorname{Re} > 2100; \quad (8)$$

$$E = 128 \frac{\eta_v(T_v)}{\rho_v(T_v)} \times \frac{L_v}{\pi d_v^4} \times \frac{1}{H_{ev}(T_v)},$$

$$C = 0,6328 \operatorname{Re}^{0,75} \frac{\eta_v(T_v)}{\rho_v(T_v)} \times \frac{L_v}{\pi d_v^4} \times \frac{1}{H_{ev}(T_v)};$$

$$(9)$$

$$D = 128 \frac{\eta_l(T_l)}{\rho_l(T_l)} \times \frac{L_l}{\pi d_l^4} \times \frac{1}{H_{ev}(T_v)}. \quad (10)$$

На рис. 3 приведена расчетная зависимость $Q = f(H)$ для ряда теплоносителей при параметрах пара $T_v = +70^\circ\text{C}$ и жидкости $T_l = +20^\circ\text{C}$; параметры контура: $L_v = 0,1$ м, $d_v = 4$ мм; $L_l = 0,1$ м, $d_l = 2$ мм.

Как видно из расчетных данных, из выбранных теплоносителей лучшими свойствами обладает метанол в диапазоне $H = 3\text{--}7$ см. Однако по мере увеличения H свойства воды начинают доминировать над другими из выбранных теплоносителей и при $H > 15$ см вода становится лучшим теплоносителем. Правда, у воды температура замерзания около 0°C , что делает ее применение проблематичным при отрицательных температурах.

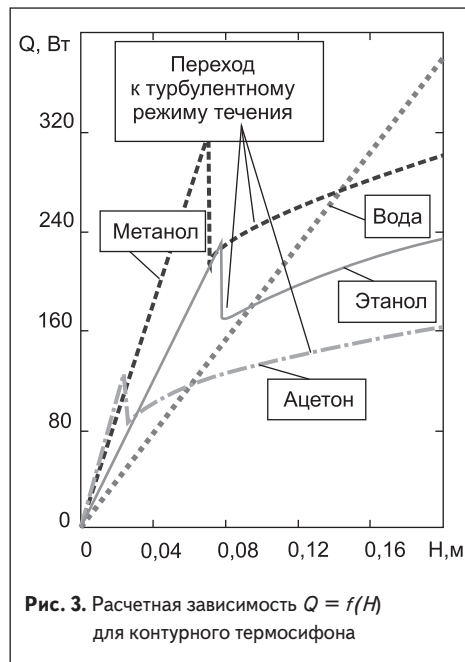


Рис. 3. Расчетная зависимость $Q = f(H)$ для контурного термосифона

Предлагаемая методика определения теплопередающей способности КТС является наиболее простой при малых H (< 20 см) и позволяет оценить величины теплового потока.

Методика проведения и результаты экспериментальных исследований КТС

Методика экспериментальных исследований предполагала получение рабочих характеристик КТС в виде зависимостей характерных температур от величины поданной тепловой нагрузки (Q , Вт) (для электрических нагревателей, моделирующих нагрев светодиодной матрицы) или от величины номинальной нагрузки (N , Вт), поданной непосредственно на светодиодную матрицу. Измерения температур производились в характерных точках КТС либо с помощью термопар, либо тепловизором (Fluke Ti32). Обычно термопары располагались в зоне подвода тепла либо в средней части светодиодной матрицы, либо в средней части корпуса испарителя на стыке с электрическим нагревателем — Th ; в паропроводе на выходе из испарителя — Tv ; в конденсаторе

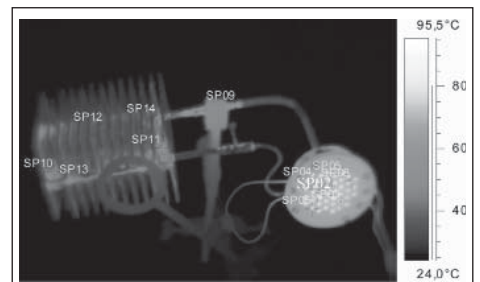


Рис. 4. Изображение температурного поля КТС № 1 со светодиодной матрицей при номинальной мощности $N = 50$ Вт, полученное тепловизором Fluke Ti32 ($T_{\max} = +79,9^\circ\text{C}$; SP 02 — в центре)

воде на входе в испаритель — $T1$. Измерялась также температура окружающей среды — T_{env} . На рис. 4 приведено характерное поле температур КТС № 1 (теплоноситель — ацетон) со светодиодной матрицей, полученное с помощью тепловизора, с виртуальным расположением точек измерения температуры (SP01–SP13). Как видно из этих измерений, максимальная температура на наружной поверхности светодиода в центральной части светодиодной матрицы (SP02) составляла около $+80^\circ\text{C}$ при $N = 50$ Вт и при температуре окружающей среды $+24^\circ\text{C}$. В данных экспериментах использовался алюминиевый пластинчатый радиатор. При этом лимитирующим фактором для увеличения нагрузки N выступала недостаточная поверхность радиатора (около 40 см^2 на 1 Вт) при данных условиях теплообмена с окружающей средой.

Результаты теплофизических исследований и их обсуждение

Проверка условий работоспособности КТС при минимальном превышении конденсатора над испарителем (H)

Данный эксперимент проводился с КТС № 1 (с алюминиевым радиатором). Превышение конденсатора над испарителем варьировалось наклоном КТС к линии горизонта (угол Fi). Видно, что изменение H с 8 до 4 см снижает тепловую нагрузку Q с 80 до 50 Вт при приблизительно одной температуре нагревателя

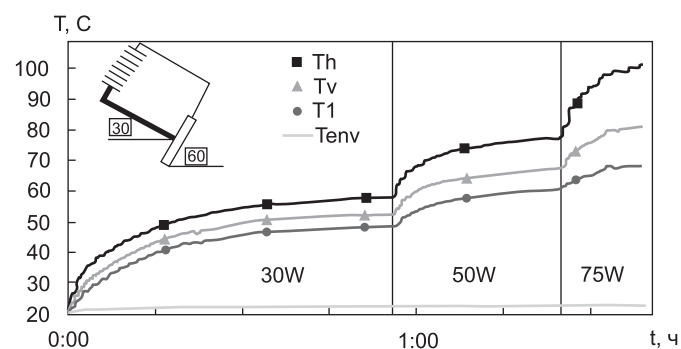
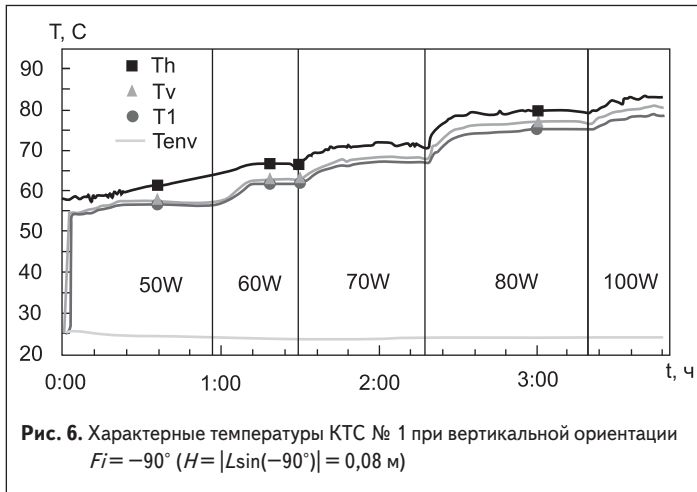


Рис. 5. Характерные температуры КТС № 1 при угле наклона к горизонту $Fi = -30^\circ$ ($H = |L \sin(-30^\circ)| = 0,04$ м)



+80 °С. Эти данные, представленные на рис. 5 и 6, с точностью до 20% соответствуют расчетным данным для ацетона (рис. 3).

Таким образом, эти экспериментальные данные подтвердили работоспособность КТС при малых превышениях конденсатора над испарителем и неплохо согласуются с оценочной методикой расчета, приведенной выше. Тем самым подтверждены возможности создания достаточного плоского светодиодного светильника с контурными термосифонами.

Определение оптимальной заправки и выбора теплоносителя

Следующая серия экспериментов была направлена на оптимизацию выбора теплоносителя для контурных термосифонов. Для исследования использовался КТС № 2 с увеличенной более чем вдвое поверхностью алюминиевого радиатора (соответственно, более чем вдвое увеличена длина змеевикового конденсатора). В качестве теплоносителей использовался технический ацетон, этиловый спирт (95%) и дистиллированная вода. Выбор теплоносителей обусловлен как возможностями их в передаче тепла на требуемое расстояние, так и климатическими условиями, связанными с незамерзанием при температурах ниже -60 °С (ацетон, этанол, метанол и др.). Кроме того, учитывался имеющийся опыт их использования на со-

вместимость материала (медь) КТС и теплоносителя. Важным было также определение оптимальной заправки теплоносителя для достижения минимальной температуры в зоне подвода тепла при прочих равных условиях. Исследования проводились при вертикальной ориентации КТС № 2 $Fi = -90^\circ$ ($H = |L \sin(-90^\circ)| = 0,35$ м). На рис. 7 рассмотрено влияние количества теплоносителя (дистиллированной воды) в КТС на рабочие характеристики $T = f(Q)$. Для сравнения исследовалась температура пара на выходе из испарителя T_v в зависимости от поданной тепловой нагрузки и количества теплоносителя в КТС № 2 при температуре окружающей среды $T_{env} = +20$ °С.

Как видно из полученных данных, КТС № 2 работоспособен при значительных изменениях величин заправки теплоносителем. Однако в дальнейшем была рекомендована минимальная заправка теплоносителем в количестве 15 мл, что составляло четверть внутреннего объема КТС № 2. При этой заправке наблюдались наиболее низкие температуры в широком интервале тепловых нагрузок.

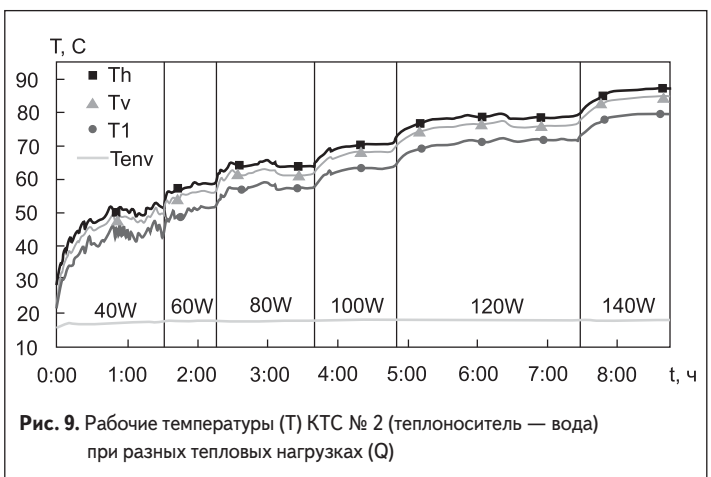
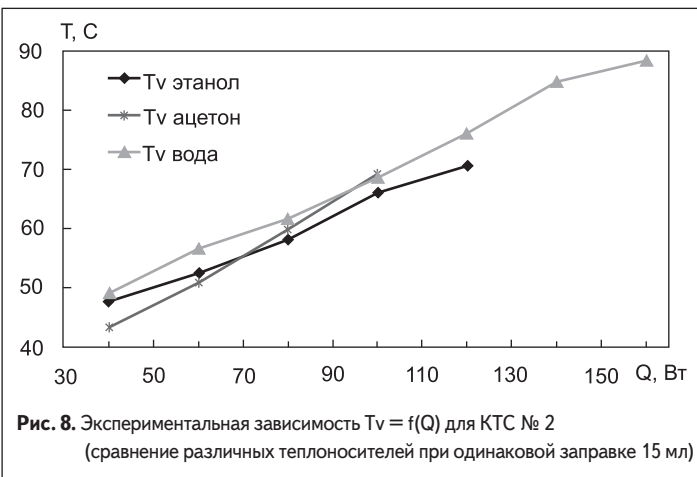
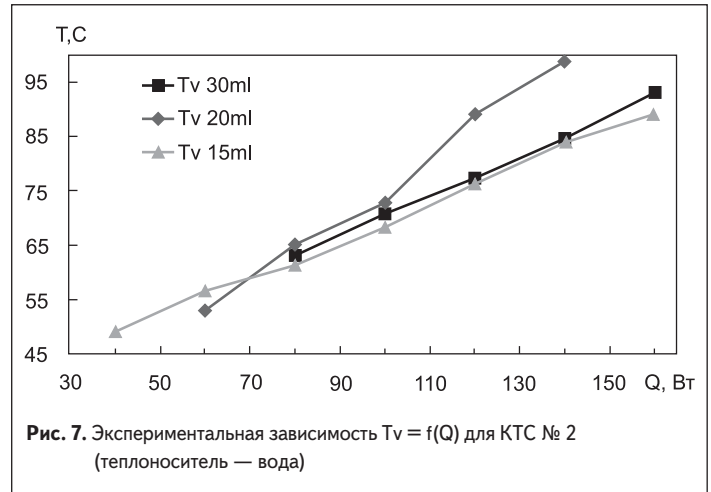
Дальнейшие исследования заключались в выборе оптимального теплоносителя для конкретных возможных климатических условий эксплуатации светодиодных светильников. На рис. 8 представлены результаты этих исследований для трех теплоносителей: дистиллированная вода, этиловый спирт (95%) и тех-

нический ацетон при одинаковых заправках в количестве 15 мл. Видно, что максимальная тепловая нагрузка в данных условиях составляла $Q = 140$ Вт для воды, $Q = 125$ Вт для этилового спирта и $Q = 100$ Вт для ацетона. Однако вода может быть рекомендована для климатических условий с температурой окружающей среды не ниже 0 °С.

На рис. 9 представлена типичная экспериментальная зависимость КТС № 2 с водой в качестве теплоносителя. Следует заметить, что при малых тепловых нагрузках наблюдаются пульсации измеряемых температур с амплитудами пульсаций до трех-четырёх градусов. Величины этих пульсаций значительно снижаются с ростом тепловой нагрузки.

Исследование возможности использования теплорассеивающих пластмасс в качестве радиатора для систем сброса тепла

В последние годы все больше появляется информации об альтернативном использовании теплорассеивающих пластмасс (ТР) в качестве материала радиаторов [11]. Это объясняется технологическими свойствами ТР и их более низкой стоимостью по сравнению с широко применяемым для этих целей алюминием. С целью проверки свойств теплорассеивающих пластмасс (Теплосток Т6-Э5-7, ООО «СпецПласт-М»)



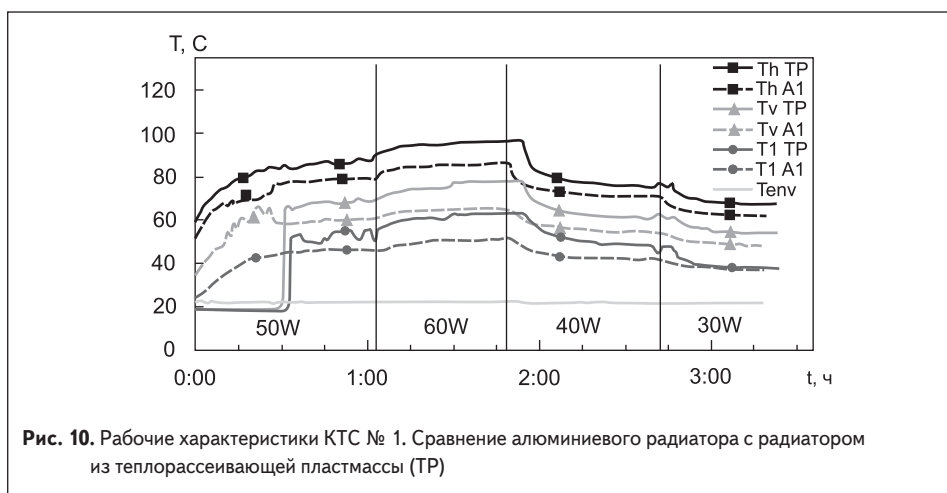


Рис. 10. Рабочие характеристики КТС № 1. Сравнение алюминиевого радиатора с радиатором из теплорассеивающей пластмассы (TP)

с теплопроводностью $8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ для КТС № 1 проводилось сравнение радиаторов из алюминия (полностью одинаковых размеров) и из данной теплорассеивающей пластмассы. На рис. 10 приведены результаты этого сравнения.

Как следует из этого сравнения, теплорассеивающие пластмассы с гораздо более низким коэффициентом теплопроводности ($8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) по сравнению с алюминием или его сплавами ($220\text{--}180 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) вполне конкурентоспособны и справляются со сбросом тепла в условиях естественной конвекции. Действительно, в ходе этих экспериментов наблюдалось возрастание температур в зоне подвода тепла приблизительно на $4\text{--}8\%$ в зависимости от величины тепловой нагрузки при замене алюминиевого радиатора на радиатор из TP (при прочих равных условиях).

Заключение

- Предложена система охлаждения светодиодных устройств с использованием технологии контурных тепловых труб. Проведены комплексные исследования контурных термосифонов и показана возможность их использования в системах охлаждения светодиодных устройств.
- Выполнена оптимизация контурных термосифонов по выбору теплоносителя и величины заправки. Показано, что при малых превышениях конденсатора над испарителем лучшим теплоносителем из выбранных является метанол, а с возрастанием величины превышения (более $0,15 \text{ м}$) — дистиллированная вода.
- Проведен сравнительный анализ широко используемых радиаторов на основе алюминия и радиаторов на основе современных теплорассеивающих пластмасс (TP). Показано, что, несмотря на значительно более низкую теплопроводность TP (отличие почти в $15\text{--}20$ раз), увеличение рабочих температур составило $4\text{--}8\%$. Данное обстоятельство открывает возможности широкого использования TP в качестве радиаторов для рассеяния тепла как более технологичных, дешевых и обладающих низким весом по сравнению с алюминием.

- Использование тепловых труб позволило увеличить номинальную нагрузку на единственный светодиод до $3,6 \text{ Вт}$ (увеличением номинального тока до 1 А) при уменьшении светоотдачи (до 32%), что снижает количество светодиодов в матрице и, следовательно, стоимость изделия без сокращения срока эксплуатации и надежности изделия. ●

Литература

1. Староверов К. Системы охлаждения для светодиодов // Новости электроники. 2008. № 17.
2. Дан П., Рей Д. Тепловые трубы. М.: Энергия. 1979.

3. Воронин В. Г., Ревякин А. В., Сасин В. Я. и др. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов. М.: Машиностроение. 1976.
4. Faghri A. Heat pipe science and technology. Taylor & Francis. 1995.
5. Герасимов Ю. Ф., Майданик Ю. Ф., Щеголев Г. Т., Филиппов Г. А., Стариков Л. Г., Кисеев В. М., Долгирев Ю. Е. Низкотемпературные тепловые трубы с отдельными каналами для пара и жидкости // Инженерно-физический журнал (ИФЖ). 1975. Т. 28. № 6.
6. Maydanik Yu. F. Loop Heat Pipes // Applied Thermal Engineering. 2005. V. 25.
7. Kiseev V. M., Vlassov V. V., Muraoka I. Optimization of capillary structures for inverted meniscus evaporators of loop heat pipes and heat switches // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. V. 53.
8. Пиоро А. С., Пиоро И. Л. Двухфазные термосифоны и их применение в промышленности. Киев: Наукова думка. 1988.
9. Kiseev V. M., Pogorelov N. P., Menkin L. I. The study on two-phase thermosyphon application for mock-up fuel elements temperature regime modeling // Proc. of the 8th IHP. Beijing. 1992.
10. Кисеев В. М. Физика теплопередающих систем. Екатеринбург: Изд-во УрГУ. 2006.
11. Криваткин А., Сакуненко Ю. Теплорассеивающие пластмассы — вызов алюминию // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 1.