

УДК 621.3.032.42:621.378.8.038.825

К. т. н. А. Н. ГЕРШУНИ, к. т. н. А. П. НИЩИК

Украина, г. Киев, НТУУ “Киевский политехнический институт”

E-mail: politekhhins@gmail.com

## ПАССИВНАЯ ИСПАРИТЕЛЬНО-КОНДЕНСАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ЛАЗЕРА

*Разработана специализированная тепловая труба для обеспечения теплового режима активного элемента оптического квантового генератора (лазера) в условиях теплоотвода излучением. Показано, что при мощности имитатора тепловыделяющего элемента 50 Вт температура стенки в зоне нагрева тепловой трубы не превышает 30°C, а аварийный обогрев позволяет предотвратить глубокое замораживание всей системы в условиях отсутствия тепловыделения объекта.*

*Ключевые слова: оптический квантовый генератор, система охлаждения, тепловая труба.*

Характерной особенностью оптических квантовых генераторов (ОКГ), т. е. лазеров, является выделение значительной тепловой энергии в процессе их работы [1]. Перегрев оптических элементов (активного элемента, лампы накачки, фильтров и т. д.) приводит к ухудшению характеристик приборов и уменьшению ресурса их работы. Поэтому реализация требуемого теплового режима элементов лазера с помощью соответствующих систем охлаждения является одной из главных задач, которую необходимо решать при разработке приборов лазерной техники. Выбор эффективного способа отвода теплоты от тепловыделяющих элементов во многом способствует успешному внедрению лазерной аппаратуры различного назначения. При реализации систем обеспечения тепловых режимов (СОТР) для ОКГ обычно решаются три взаимосвязанные задачи:

- организация охлаждения элементов прибора;
- организация теплообмена между элементами прибора и системой теплоотвода;
- обеспечение теплообмена между СОТР и окружающей средой.

Для обеспечения необходимого теплового режима элементов в лазерах применяют конвективный (газовый, жидкостной) и контактный (кондуктивный) способы отвода выделяющейся теплоты, а также их комбинации [2].

Выбор того или иного способа охлаждения зависит от величины удельной тепловой нагрузки, особенностей оптической схемы прибора и требуемой температуры элементов. В случае применения газового охлаждения в качестве теплоносителя можно использовать воздух, азот, аргон, гелий и другие газы, которые в высокой степени прозрачны, фотостойки, имеют стабильные теплофизические параметры в широком ди-

апазоне температур. Этот способ охлаждения используется в основном в системах обеспечения теплового режима ОКГ с небольшой энергией излучения или малой частотой повторения импульсов накачки. К положительным особенностям газового охлаждения относятся фотостойкость и стабильность теплофизических параметров теплоносителей, автономность систем охлаждения, возможность питания контуров охлаждения из централизованных источников, возможность получить достаточно большие значения коэффициента теплоотдачи на поверхности активного элемента (порядка 500 Вт/(м<sup>2</sup>·К) в случае вихревого охлаждения). К недостаткам газового охлаждения ОКГ относятся: необходимость создания фильтров очистки от различных примесей в теплоносителях для проточных систем, зависимость состояния системы охлаждения (рабочее/нерабочее) от запаса теплоносителя, необходимость использования громоздкого дополнительного оборудования и источников энергии (компрессоры, вентиляторы и т. п.), а также промежуточных теплообменных устройств. Срок службы элементов ОКГ при использовании этого способа охлаждения мал.

Жидкостное охлаждение получило широкое распространение для обеспечения тепловых режимов лазеров с высокой удельной тепловой нагрузкой и большой частотой повторения импульсов накачки. Значения коэффициентов теплоотдачи при жидкостном охлаждении могут достигать 10000 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Однако наряду со способностью отводить значительные тепловые потоки от элементов ОКГ, жидкостное охлаждение имеет ряд следующих недостатков: требуется создавать герметичные контуры, устранять паразитные притоки теплоты от двигателей насосов, предотвращать кипение и наличие газовых пузырей. При этом сложен и выбор тепло-

носителя, поскольку он должен обладать приемлемыми теплотехническими характеристиками и одновременно быть прозрачным и фотостойким.

Контактное охлаждение элементов лазера осуществляется с помощью стержней и пластин различной конфигурации, выполненных из теплопроводных материалов и находящихся в контакте с активной средой. От качества теплового контакта стержня с источником теплоты существенно зависят рабочие характеристики активного элемента лазера. При контактном теплоотводе допустимая площадь теплового контакта не должна превышать 25% площади боковой поверхности активного тела, т. к. в противном случае снижается эффективность осветительной системы на 10–15% и резко возрастает пороговая энергия накачки. Для уменьшения термического сопротивления контакта между активной средой и охлаждающим устройством пространство между ними заполняют веществом с высокой теплопроводностью.

Развитие лазерной техники связано с возрастанием потребляемой и, соответственно, выделяемой мощности, часть из которой необходимо отвести в виде теплоты. Применение при этом традиционных систем охлаждения приводит к существенному увеличению массы и габаритов приборов. К тому же в некоторых случаях эти системы не могут обеспечить отвод больших тепловых потоков.

Одним из эффективных способов усовершенствования систем охлаждения элементов ОКГ, в частности контактных, является применение тепловых труб, которые позволяют в отличие от вышеописанных способов превратить систему охлаждения в полностью пассивную; значительно увеличить отводимые тепловые потоки при малых перепадах температуры, что дает возможность существенно повысить энергию излучения и частоту повторения импульсов; значительно уменьшить массу и габариты системы охлаждения; повысить надежность работы ОКГ благодаря отсутствию жидкости в рабочей зоне и подвижных деталей и разъемных соединений в системе охлаждения.

В статье описана оригинальная конструкция пассивной СОТР ОКГ на базе разработанной специализированной тепловой трубы (ТТ).

#### Конструкция пассивной испарительно-конденсационной системы охлаждения

Разработанная система охлаждения представляет собой коаксиальную цилиндрическую зону испарения (теплоподвод), переходящую в плоскую зону конденсации (теплоотвод). Общий вид специализированной тепловой трубы в сборе представлен на рис. 1. Наружная цилиндрическая поверхность и плоская тыльная сторона грибовидного тепловоспринимающего элемента 1, а также внутренняя поверхность плиты 6, снабженная выступающими штырями, покрыты ка-

пиллярно-пористыми фитилями. Фитили гидравлически связаны между собой, обеспечивая надежную подачу теплоносителя из зоны конденсации в зону испарения. Боковая поверхность стакана 2 снабжена трубкой со штуцером 4 для вакуумирования и заполнения системы охлаждения теплоносителем.

Все перечисленные детали неразъемно соединены между собой, образуя замкнутую герметичную полость тепловой трубы. В собранной специализированной ТТ по оси симметрии имеется сквозное отверстие диаметром 3 мм, в котором размещается тепловыделяющий элемент или его имитатор при испытаниях системы охлаждения. Полость, образованная в элементе 1, служит для установки аварийного нагревателя.

Независимо от ориентации ТТ в пространстве фитиль должен обеспечить подъем теплоносителя на высоту не менее 80 мм. При этом плотность подводимого теплового потока составляет около 10 Вт/см<sup>2</sup>. Обеспечить такие условия работы при использовании органического теплоносителя достаточно сложно, поэтому в качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода.

Рабочее давление внутри тепловой трубы соответствует давлению насыщенного водяного пара на уровне температур 20–30°C, что составляет 2–4 кПа. Перед заполнением теплоносителем труба вакуумировалась до остаточного давления 10<sup>-2</sup>–10<sup>-3</sup> мм рт. ст. При проектировании необходимо было обеспечить достаточную жесткость корпуса, особенно излучателя. С целью обеспечения сохранения формы оболочки ТТ плита излучателя снабжена многочисленными штырями жесткости.

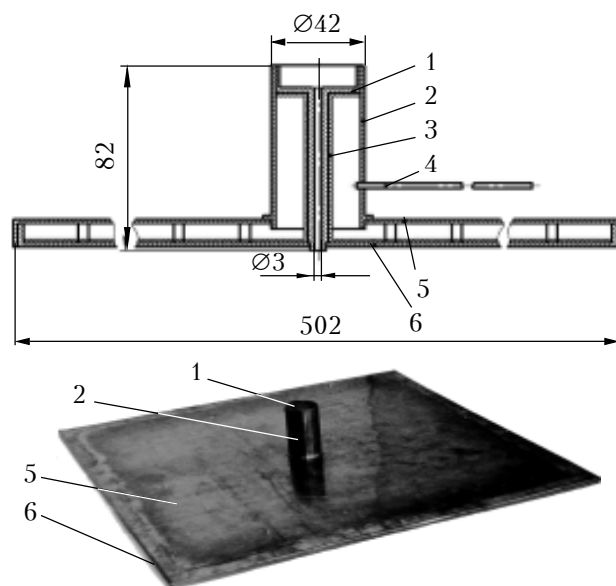


Рис. 1. Конструкция и фото специализированной тепловой трубы:

1 – тепловоспринимающий элемент; 2 – цилиндрический стакан; 3 – капиллярно-пористый металловолоконный фитиль; 4 – медная трубка; 5 – крышка; 6 – плита-излучатель

Диаметр стакана, определяющий площадь поперечного сечения парового канала  $F_{\text{п}}$ , определялся из условий обеспечения допустимой скорости парового потока, при которой не происходит срыв и унос жидкости. Допустимая скорость  $W_{\text{п}}$  водяного пара принималась равной 1 м/с.

Расчет проводился с использованием формулы

$$F_{\text{п}} = Q / (W_{\text{п}} r \rho_{\text{п}}),$$

где  $Q$  — передаваемый тепловой поток;

$r$ ,  $\rho_{\text{п}}$  — скрытая теплота парообразования и плотность пара при рабочей температуре соответственно.

Площадь поперечного сечения парового канала рассчитывалась для  $Q = 50$  Вт, внутренний диаметр стакана при этом составил 40 мм. Рассчитанная площадь излучающей поверхности плиты-излучателя составила 0,224 м<sup>2</sup>. Формой излучающей поверхности был выбран квадрат, длина стороны которого согласно расчету составила 475 мм, а с учетом запаса была принята 500 мм.

Технология изготовления специализированной тепловой трубы включала следующие этапы: изготовление отдельных деталей, частичную сборку, создание фитильной структуры на вышеуказанных поверхностях, окончательную сборку, проверку на герметичность и вакуумную дегазацию, вакуумирование, заполнение и герметизацию. Тепловоспринимающий элемент грибовидной формы с отверстием был выполнен с помощью операций точения, сверления и развертывания. На его тепловоспринимающей поверхности выфрезерованы три радиальных канавки, расположенные под углом 120° одна по отношению к другой, для размещения термомпар при испытании системы охлаждения с аварийным нагревателем. Плита-излучатель изготовлена из медного листа толщиной 6,5 мм. Ее поверхность с выступающими штырями (484 шт.) получена фрезерованием. Частично собранная тепловая труба представляла собой неразъемное соединение грибовидного элемента с плитой с помощью электронно-лучевой сварки.

Фитиль формировался из медных волокон диаметром 50 мкм и длиной 3 мм с последующим спеканием, его толщина составила 0,8 мм. При создании фитильной структуры особое внимание обращалось на обеспечение надежной гидравлической связи между фитилями на отдельных поверхностях. При окончательной сборке вначале устанавливалась крышка, а затем стакан. Соединение стакана с тепловоспринимающим элементом производилось с помощью пайки твердым припоем ПСр 45. В боковой поверхности стакана выполнено отверстие и впаивана твердым припоем медная трубка диаметром 3 мм со штуцером, предназначенная для вакуумирования и заполнения тепловой трубы теплоносителем.

Заключительная операция состояла из вакуумирования, заполнения и герметизации системы охлаждения на специальном стенде. Давление в тепловой трубе перед заполнением было на уровне  $5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. Герметизация тепловой трубы осуществлялась пережимом медного штенгеля и проваркой места пережима с помощью микроплазменного источника.

#### **Экспериментальные исследования и анализ их результатов**

Главной задачей экспериментального исследования являлось изучение теплопередающих характеристик тепловой трубы для определения возможностей системы охлаждения с точки зрения функционирования в заданных условиях без наступления кризисных явлений. Данная ТТ предназначена для работы в условиях теплосброса излучением, но при выполнении экспериментального исследования использовался конвективный теплоотвод к воздуху и к воде с обеспечением при этом такой же температуры в зоне охлаждения, как и в условиях теплосброса излучением.

При эксплуатации системы охлаждения источником теплоты является либо тепловыделяющий элемент ОКГ, либо аварийный нагреватель, который поддерживает температуру теплоносителя такой, чтобы тот находился в жидком состоянии (система предназначена для работы в условиях невесомости и, соответственно, низких температур). Под действием подводимого теплового потока происходит процесс испарения (кипения) теплоносителя в пористой структуре фитиля в зоне нагрева. Паровая фаза теплоносителя под действием градиента давления перемещается в зону охлаждения и конденсируется на пористой поверхности фитиля, нанесенного на внутреннюю поверхность плиты-излучателя. Конденсат под действием капиллярного давления возвращается в зону нагрева.

Для исследования рабочих характеристик тепловой трубы был изготовлен имитатор тепловыделяющего элемента в виде цилиндра из фторопласта длиной 56 мм с нанесенной на его внешнюю поверхность резьбой М3 на длине 50 мм. По резьбе была уложена нихромовая проволока диаметром 0,1 мм длиной 0,94 м. Имитатор аварийного нагревателя представлял собой керамическую пластинку с уложенной в пазах спиралью из нихрома.

На каждом уровне подводимой мощности по достижении стационарного режима определялось температурное поле тепловой трубы. Мощность нагревателей изменялась ступенчато в диапазоне 10—90 Вт для аварийного нагревателя и 10—50 Вт для основного.

Вначале ТТ испытывалась при нагреве аварийным нагревателем в условиях теплоотвода свободной конвекцией воздуха с обращенной вниз и вверх плитой-излучателем, расположенной под углом 10° к горизонтальной плоскости

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

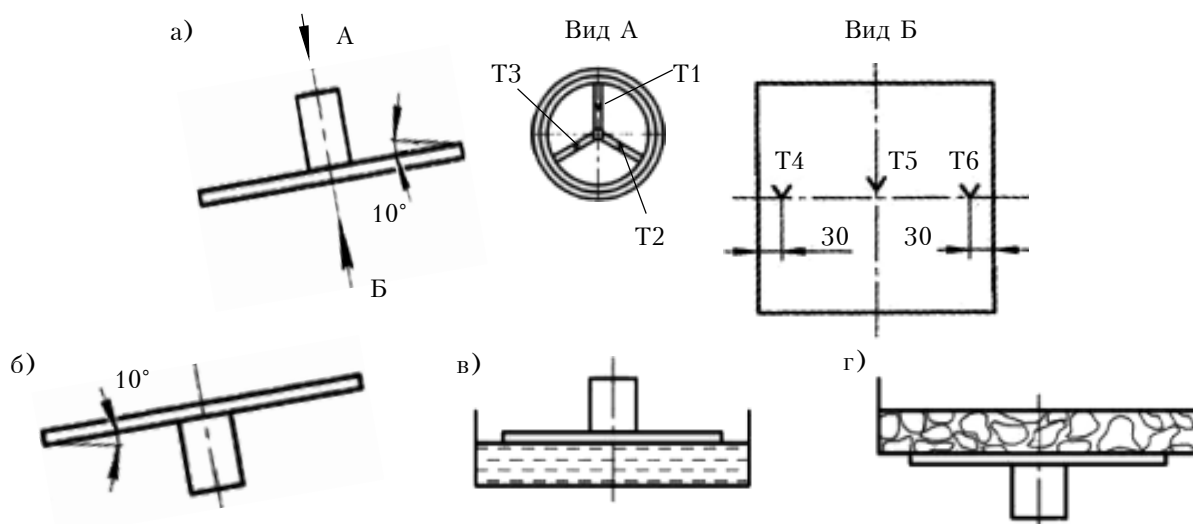


Рис. 2. Ориентация тепловой трубы в экспериментах с аварийным нагревателем

(рис. 2, а, б). Затем испытания ТТ проводились при отводе теплоты свободной конвекцией воды. Для этого расположенную горизонтально и обращенную вниз теплоотдающую поверхность трубы приводили в соприкосновение с водой (рис. 2, в), имеющей температуру 19–20°C. В последней серии опытов ТТ ориентировалась плитой вверх. На поверхности плиты размещалась емкость с тающим льдом (рис. 2, г). В этом случае температура холодного источника была значительно ниже, чем в предыдущем, что компенсировало дополнительное термическое сопротивление контакта емкости с плитой. Схема размещения термодпар (Т1...Т6) представлена на рис. 2, а: три термодпары были закреплены в канавках теплопринимающей поверхности (Вид А) и три на теплоотдающей поверхности

плиты (Вид Б). Термодпары изготавливались из медной и константановой проволоки диаметром 0,16 мм.

Из данных, представленных на рис. 3, а, видно, что при фиксированной тепловой нагрузке температурный уровень работы тепловой трубы зависит от условий теплообмена с окружающей средой: наиболее высок он при естественной воздушной конвекции, когда теплоотдающая поверхность плиты обращена вниз, а самый низкий — в условиях теплоотвода к тающему льду, когда теплоотдающая поверхность плиты обращена вверх. Линейный характер приведенных на рис. 3, б зависимостей свидетельствует о нормальном функционировании системы охлаждения.

Таким образом, в исследованном диапазоне тепловых потоков нарушений нормального функ-

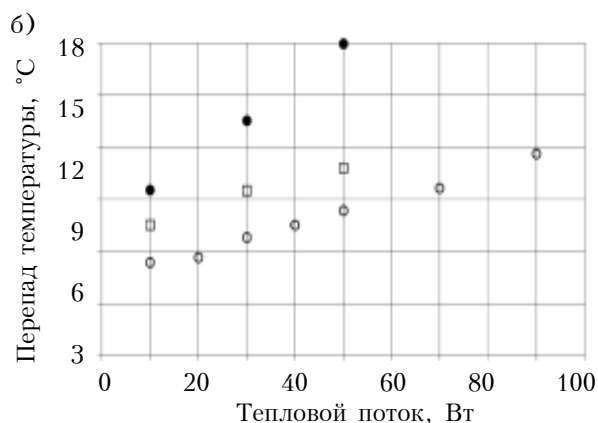
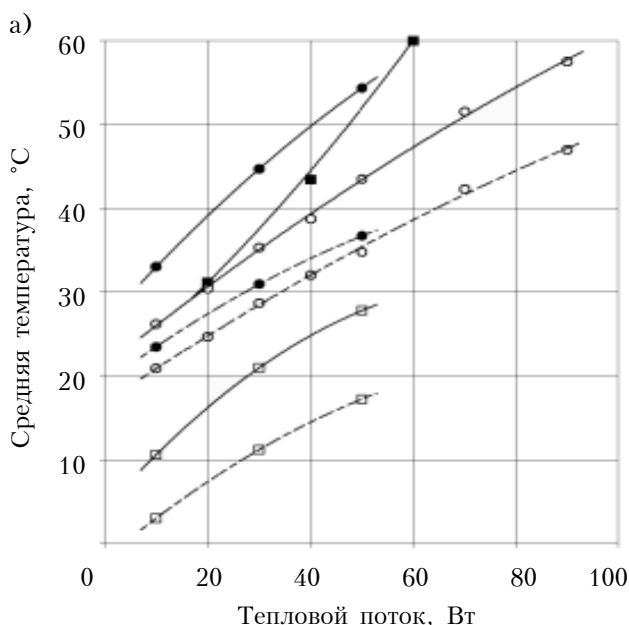


Рис. 3. Зависимость средней температуры теплопринимающей (сплошные линии) и теплоотдающей (штриховые) поверхности (а) и перепада температуры по ТТ (б) от теплового потока аварийного нагревателя при расположении ТТ согласно рис.2:

● — а; ○ — б; ■ — в; □ — г

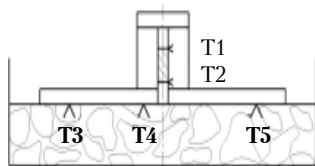


Рис. 4. Схема размещения термомпар при испытаниях с основным нагревателем

ционирования тепловой трубы не наблюдалось. Аварийный обогрев ТТ предотвращает замораживание системы охлаждения при мощности аварийного нагревателя около 10 Вт.

В опытах с основным нагревателем (имитатором тепловыделяющего элемента) теплоотдающая поверхность плиты приводилась в соприкосновение с тающим снегом, который находился в металлической емкости. Термомпары T1 и T2 (рис. 4) измеряли температуру обогреваемой стенки цилиндра в сечениях, граничащих с торцами основного нагревателя, T3, T4 и T5 — температуру поверхности плиты (они размещались в тех же точках, что и термомпары T4, T5 и T6 в опытах с аварийным нагревателем).

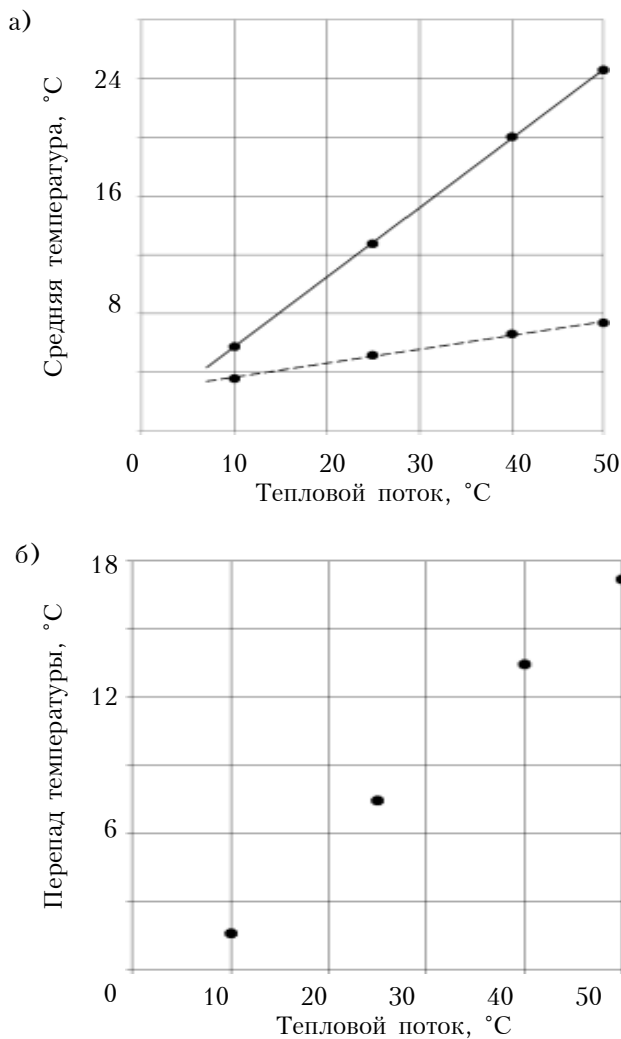


Рис. 5. То же самое, что и на рис. 3, для испытаний с основным нагревателем

Результаты исследований тепловой трубы с основным нагревателем (имитатором тепловыделяющего элемента) представлены на рис. 5. Линейный характер полученных зависимостей свидетельствует о нормальном функционировании ТТ.

При заданной номинальной мощности 50 Вт перепад температуры по тепловой трубе составил  $\Delta T_T = 17,3^\circ\text{C}$ , что несколько превышает полученную в процессе предварительной оценки величину. Это связано с тем, что предварительные расчеты  $\Delta T_T$  были выполнены для условий отсутствия гравитационного поля. В проведенных же экспериментах ориентация тепловой трубы в гравитационном поле была наименее выгодная с точки зрения достижения максимальной эффективности и низкого термического сопротивления. В проведенных опытах (см. рис. 4) зона нагрева находилась выше зоны конденсации, и тепловая труба работала против сил тяжести. Кроме того, рабочее давление внутри тепловой трубы при заданной номинальной нагрузке составило около 2 кПа. Известно [3], что для тепловых труб, работающих против сил гравитации при очень низких давлениях пара (до 5–6 Па), реализовать потенциальное капиллярное давление невозможно, и максимальный движущий напор становится равным давлению насыщения, соответствующему предельному тепловому потоку. Поэтому в проведенных опытах имело место ухудшение снабжения жидкостью поверхности нагрева вследствие снижения движущего напора по сравнению с потенциально возможным капиллярным давлением. При ориентации тепловой трубы, когда плита-излучатель обращена вверх, перепад  $\Delta T_T$  должен существенно уменьшиться, т. к. при этом намного улучшаются условия пропитки фитиля в зоне нагрева. Хотя опыты при такой ориентации ТТ с основным нагревателем не проводились, результаты экспериментов с аварийным нагревателем свидетельствуют о снижении  $\Delta T_T$  на  $10^\circ\text{C}$  при изменении ориентации.

### Заключение

Проведенные исследования разработанной специализированной тепловой трубы показали эффективность ее использования для обеспечения теплового режима активного элемента твердотельного лазера в условиях теплоотвода излучением. При мощности имитатора тепловыделяющего элемента 50 Вт температура стенки в зоне нагрева тепловой трубы не превышала  $30^\circ\text{C}$ . Аварийный обогрев специализированной тепловой трубы позволяет предотвратить глубокое замораживание всей системы в условиях отсутствия тепловыделения объекта.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Белостоцкий Б.Р., Губанов А.С. Тепловой режим твердотельных оптических квантовых генераторов. — Москва: Энергия, 1973. [Belostotskii B.R., Gubanov A.S. Teplovoi rezhim tverdotel'nykh opticheskikh kvantovykh generatorov. Moskva: Energiya, 1973]

2. Волохов В.А., Хрычиков Э.Е., Киселев В.И. Системы охлаждения теплонагруженных радиоэлектронных приборов. — Москва: Сов. радио, 1975. [Volokhov V.A., Khrychikov E.E., Kiselev V.I. Sistemy okhlazhdeniya teplonagruzhennykh radioelektronnykh priborov. Moskva: Sov. radio, 1975]

3. Гершуни А. Н. Исследование основных характеристик процессов тепломассообмена в низкотемпературных тепловых трубах с металловолокнистыми фитилями / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1977. [Gershuni A. N. / Avtoref. dis. ... kand. tekhn.nauk. Kiev, 1977]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 03.10 2011 г.

Gershuni A. N., Nishchik A. P. **Passive evaporation-condensation cooling system of a laser.**

*Keywords: quantum generator, cooling system, heat pipes.*

A special heat pipe for ensuring the thermal regime of the active element of an optical quantum generator (laser) under heat sink by radiation has been developed. It is shown that under the simulated fuel element

power of 50 W wall temperature in the heat pipe heating zone does not exceed 30°C, and the emergency heating prevents deep freezing of the entire system in the absence of heat generation of the object itself.

Ukraine, Kiev, NTUU "Kiev Polytechnic Institute".

Гершуни О. Н., Ніщик О. П. **Пасивна випаровувально-конденсаційна система охолодження лазера.**

*Ключові слова: оптичний квантовий генератор, система охолодження, теплова труба.*

Розроблено спеціалізовану теплову трубу для забезпечення теплового режиму активного елемента оптичного квантового генератора (лазера) в умовах тепловідводу випромінюванням. Показано, що при потужності імітатора тепловідляючого елемента 50 Вт температура стінки в зоні нагріву теплової труби не перевищує 30°C, а аварійний обігрів дозволяє запобігти глибокому заморозуванню всієї системи в умовах відсутності тепловідлення об'єкта.

Україна, м. Київ, НТУУ "Київський політехнічний інститут".

**Промышленное применение аккумуляторных батарей. От автомобилей до авиакосмической промышленности и накопителей энергии / Под ред. М. Бруссили, Дж. Пистойя.— Москва: Техносфера, 2011.— 784 с.**

Представлен аналитический обзор многочисленных электрохимических систем, а также обсуждаются вопросы дальнейшего совершенствования конструкции батарей, технологии их изготовления, разработки новых материалов и повышения их надежности. Издание содержит многочисленные примеры применения аккумуляторов: резервное питание, вспомогательное автомобильное оборудование, автоматическое оповещение о катастрофах, охранная, аварийная и пожарная сигнализации, спасательные системы, портативное медицинское оборудование, источники бесперебойного электропитания, аварийное освещение, измерительные системы, системы контроля и слежения, электроинструменты. Большое внимание уделено применению аккумуляторных систем в космонавтике — на спутниках, ракетах-носителях, летательных аппаратах для исследований планет и космоса. В книге также показано, как новые области применения стимулируют создание новых или усовершенствование существующих аккумуляторных батарей.

Авторский коллектив книги — это ученые и специалисты университетов и научных институтов Англии, США, Франции, Бельгии, Израиля, Японии, Италии. Книга предназначена для широкого круга специалистов, работающих в области электроники, может быть полезна для инженеров и преподавателей высшей школы, студентов и аспирантов, бакалавров и магистров.

