

---

---

# ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

---

---

УДК 535.8  
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-8-739-748

## ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА ДЛЯ ТЕПЛО ВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. А. Кишалов<sup>1</sup>, В. М. Журба<sup>1</sup>, А. Г. Попов<sup>1</sup>, А. Э. Пуйша<sup>1</sup>,  
А. К. Шаров<sup>2</sup>, А. В. Хахленков<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>ООО „Научно-производственное предприятие  
волоконно-оптического и лазерного оборудования“,  
199034, Санкт-Петербург, Россия,  
E-mail: grinfo@mail.ru

<sup>2</sup>АО «„Информационные спутниковые системы“ имени академика М. Ф. Решетнева»,  
662972, Железногорск, Россия

Предложен новый источник излучения для проведения тепловакуумных испытаний космических аппаратов на основе иттербиевых волоконных лазеров. Разработана, изготовлена и испытана система локального нагрева, содержащая 20 источников излучения и предназначенная для работы в качестве испытательного оборудования. Каждый источник в составе системы способен формировать квазиравномерное круглое пятно лазерного излучения диаметром от 50 до 250 мм и с плотностью мощности до 55 000 Вт/м<sup>2</sup> на поверхности объекта испытаний.

**Ключевые слова:** система локального нагрева, тепловакуумные испытания, испытания космических аппаратов

**Введение.** В ходе тепловакуумных испытаний имитируются такие условия космоса, как вакуум, солнечный поток и резкие перепады температуры по поверхности космического аппарата (КА) или иного объекта испытаний (составной части КА). Одним из видов тепловакуумных испытаний являются термостатические или термоциклические, суть которых сводится к последовательному выводу объекта испытаний на определенные температурные режимы и их поддержание в течение заданного времени [1]. При этом требуемая карта температур в контролируемых точках объекта испытаний может быть достаточно сложна, содержать большое количество контролируемых точек и высокие градиенты перепада температуры.

Для решения этой задачи вокруг объекта испытаний, находящегося в вакууме, размещаются набор контролируемых и пассивных источников излучения, а также криозкран [2]. В качестве источников излучения могут использоваться имитаторы солнечного излучения и нагреватели на базе инфракрасных галогеновых ламп, из которых собираются панели фонового теплового потока или устройства локального нагрева. Также могут применяться нагревательные элементы различного типа.

В настоящей статье предложен новый тип источника излучения для проведения тепловакуумных испытаний — лазерная система локального нагрева. Свойства лазерного излучения позволяют сформировать на поверхности объекта испытаний пятно с высокой плотно-

стью мощности и высокой равномерностью распределения энергии по его площади, с точно заданным размером. Плотность мощности излучения и размеры пятна также можно регулировать в широких пределах. Источник излучения с такими свойствами полезен в первую очередь для проведения термостатических испытаний, где целью является создание на объекте испытаний заданного температурного распределения, а природа источника излучения не имеет решающего значения.

**Требования к лазерной системе локального нагрева.** Требования к лазерной системе локального нагрева сформированы с учетом того, что разрабатываемая система должна обеспечивать существенное расширение возможностей, предоставляемых испытательным оборудованием для проведения тепловакуумных испытаний. Широко известны имитаторы теплового потока в виде набора панелей, собранных из кварцевых галогенных ламп. Так, лампа КГТ-220-1000, нашедшая широкое применение при проведении тепловакуумных испытаний [3, 4], с учетом конструкции отражателей и прочих потерь способна обеспечить плотность мощности порядка  $14\ 000\ \text{Вт/м}^2$ . Тогда требуемая плотность мощности, формируемая системой, также должна составлять не менее  $14\ 000\ \text{Вт/м}^2$ . Если принять за требуемый диаметр пятна 100 мм, то мощность одного канала должна составлять 110 Вт.

Кроме того, применение распространенных имитаторов теплового потока на основе кварцевых галогенных ламп или имитаторов солнечного излучения позволяет смоделировать большой по площади тепловой поток, но часто возникают задачи, требующие обеспечить локальный нагрев небольшого узла. Так как размеры таких узлов от задачи к задаче варьируются, а размещаться они могут вне зоны действия основных источников тепловых потоков, необходимо заложить в систему возможность изменения диаметра пятна от 50 до 200 мм и возможность формирования равномерного пятна на различных от выходного зрачка расстояниях.

При проведении тепловакуумных испытаний внутри вакуумной установки формируются условия, близкие к условиям окружающей среды космического пространства, в первую очередь это низкая температура и давление. Условия проведения тепловакуумных испытаний регламентированы стандартом\*, а описания вакуумных установок, реализующих эти условия приведены в работах [5, 6]. Поэтому все составные части лазерной системы локального нагрева, расположенные внутри вакуумной установки, должны сохранять работоспособность при давлении до  $10^{-6}$  мм рт. ст. и температуре до  $-195^\circ\text{C}$ .

Для расширения возможностей при проведении тепловакуумных испытаний система локального лазерного нагрева должна быть многоканальной. Каждый канал системы должен управляться независимо, но управление должно быть централизованным, с возможностью одновременного включения, выключения излучения и изменения мощности на нескольких каналах, а также с возможностью архивирования действий оператора. Кроме того, в системе должна предусмотрена функция повышения возможностей ее использования путем наращивания количества каналов.

С учетом требований к максимальной мощности канала в качестве источника излучения был выбран иттербиевый волоконный лазерный модуль YLM-125 IPG Photonics в OEM-исполнении с длиной волны лазерного излучения 1,07 мкм. Данный модуль обладает полным КПД („КПД от розетки“) в 30 %, качеством пучка  $M^2 < 1,1$ , высокой стабильностью мощности и воздушным охлаждением. Модуль не требует постоянного и дорогостоящего обслуживания, а OEM-исполнение подразумевает его интеграцию в более сложные системы в качестве составной части.

---

\* ГОСТ Р 56469-2015 Аппараты космические автоматические. Термобалансные и термовакуумные испытания. М.: Стандартинформ.

**Конструкция лазерной системы локального нагрева.** Технический облик лазерной системы локального нагрева представлен на рис. 1. Источники излучения на базе волоконных лазерных модулей 1 располагаются вне вакуумной камеры. Транспортные волокна 2, оканчивающиеся коллиматорами 3, подводятся к гермоплате 4, где через герметичные кварцевые окна 5 лазерное излучение вводится во внутренний объем вакуумной камеры. Во внутреннем объеме камеры в непосредственной близости от кварцевых окон располагаются узлы ввода лазерного излучения 6 в транспортные световоды вакуумного исполнения 7. Выходные разъемы транспортных световодов подключаются к оптическим головкам 8, формирующим на объекте испытаний 9 пятна лазерного излучения с равномерным распределением. Управление лазерной системой локального нагрева осуществляется с помощью персонального компьютера 10.

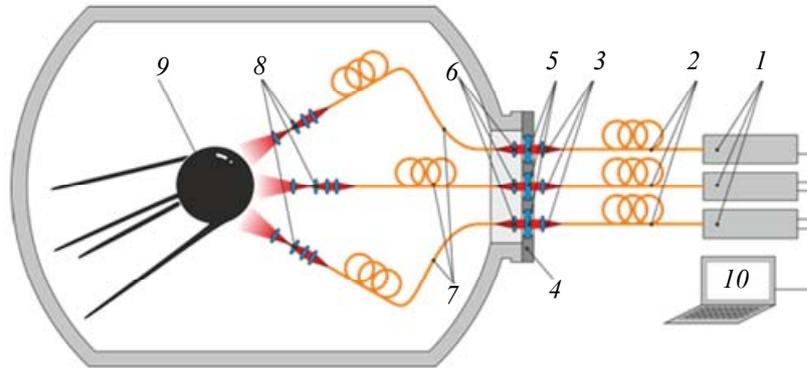


Рис. 1

Рассмотрим конструкцию одного канала лазерной системы локального нагрева. Каждый канал системы состоит, с учетом технического облика, из следующих основных узлов:

- оптической формирующей головки;
- световода для использования в условиях вакуума;
- оптического ввода, установленного на гермоплате;
- лазерного модуля с атмосферным световодом.

Рассмотрим особенности каждого из этих узлов.

Как известно из опыта проектирования и изготовления лазерных систем с волоконно-оптическими трактами передачи излучения, при соосном вводе лазерного излучения в многомодовое оптоволокно, достаточной длине световода и отсутствии значительных напряжений по длине световода распределение излучения по координате на выходе световода является равномерным. Тогда для создания пятна с равномерным распределением энергии по его площади необходимо на заданном расстоянии сформировать изображение торца световода с заданным увеличением, а диапазон размеров пятна и диапазон требуемых рабочих расстояний обеспечить с помощью изменения фокусного расстояния оптической формирующей головки. Увеличение головки можно выразить как

$$|\beta| = \frac{D}{d} = \frac{a - f'}{f'}, \quad (1)$$

где  $f'$  — задний фокальный отрезок,  $a$  — задний отрезок или расстояние от выходного луча головки до рабочей плоскости,  $D$  — диаметр пятна, сформированного головкой,  $d$  — диаметр сердцевины световода.

Заметим, что увеличение головки взято по модулю, так как пятно имеет круглую форму и центрально-симметричное распределение, а следовательно, знак увеличения не имеет значения. Кроме того,  $f' = f$ , так как головка работает в вакууме. Тогда

$$f = \frac{ad}{D + d}.$$

Учитывая, что  $D \gg d$ , получаем

$$f_{\min} = \frac{a_{\min} d}{D_{\max}}, \quad f_{\max} = \frac{a_{\max} d}{D_{\min}}. \quad (2)$$

Принимая диаметр сердцевины оптоволокна  $d = 400$  мкм, минимальное расстояние  $a_{\min} = 500$  мм, максимальное расстояние  $a_{\max} = 1000$  мм, минимальный размер пятна  $D_{\min} = 50$  мм и максимальный размер пятна  $D_{\max} = 200$  мм, получаем минимальное фокусное расстояние головки  $f_{\min} = 1$  мм и максимальное фокусное расстояние головки  $f_{\max} = 8$  мм.

Также для обеспечения максимального коэффициента пропускания оптической формирующей головки ее передняя числовая апертура должна превышать числовую апертуру используемого оптоволокна.

Описываемая головка рассчитана и оптимизирована с использованием программного пакета Zemax, спроектирована и изготовлена. На рис. 2, а, б показаны внешний вид головки и ее оптическая схема — линзы 2 и 3 неподвижны относительно торца оптоволокна 1, а линзы 4 и 5 являются подвижными и обеспечивают изменение фокусного расстояния головки. Все оптические компоненты изготовлены из кварца и просветлены. Окончательная версия головки имеет диапазон изменения фокусного расстояния от 0,8 до 10 мм, что позволяет формировать равномерные пятна лазерного излучения размером от 50 до 250 мм на расстояниях от 500 до 1300 мм от головки. Кроме того, есть возможность формирования пятен, частично перекрывающих диапазон от 50 до 250 мм на других расстояниях. Так, на расстоянии 250 мм от головки формируются пятна размером от 50 до 115 мм, на расстоянии 3 м — пятна размером от 170 до 250 мм, на расстоянии 4 м от головки есть возможность сформировать пятно размером 250 мм. На рис. 3 показаны расчетные профили пучка размером 50 мм (а, б) и 250 мм (в, г) на расстоянии 1000 мм от головки.

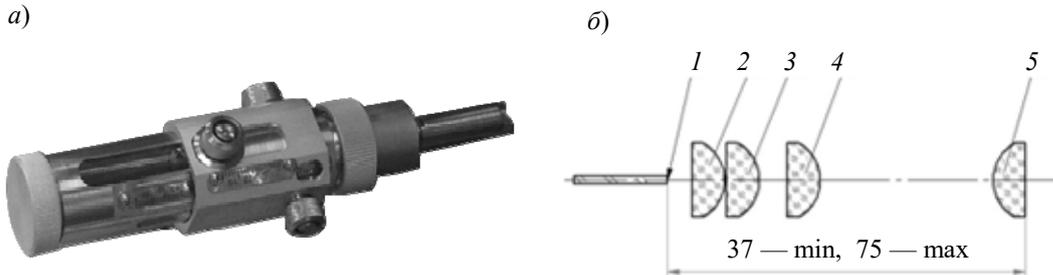


Рис. 2

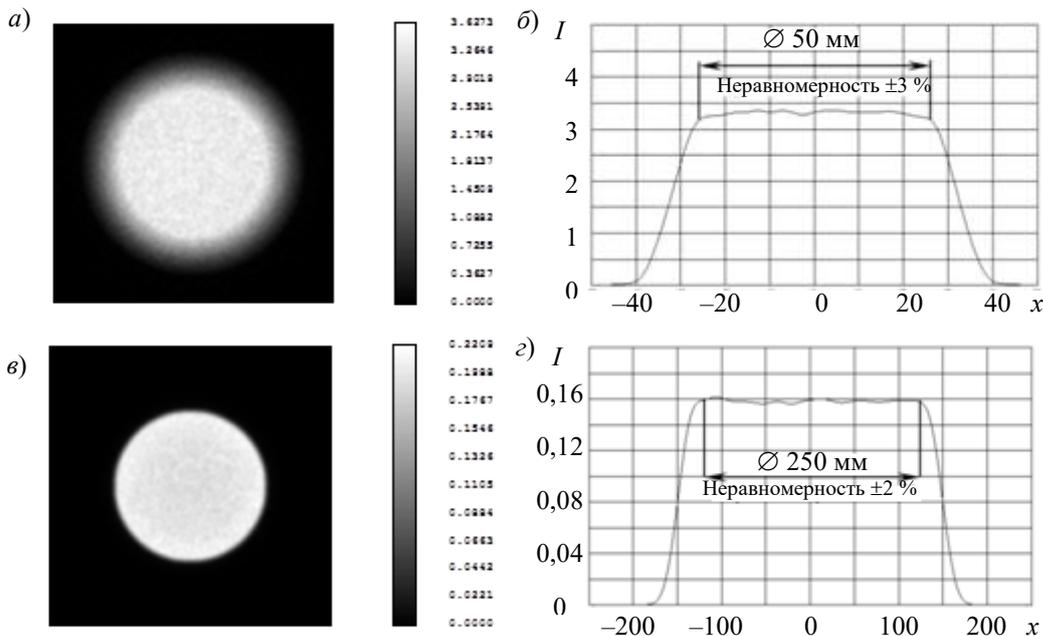


Рис. 3

Световод для использования в условиях вакуума выполнен на базе осушенного кварцево-кварцевого оптоволоконна с защитным алюминиевым покрытием, диаметр сердцевины оптоволоконна 400 мкм. Температурный диапазон, допустимый для данного типа оптоволоконна, составляет от  $-269$  до  $+400$  °С. Для защиты торцов световода от загрязнения на входном торце установлена неразъемная насадка, фокусирующая сколлимированное излучение на торец световода, а на выходном торце — неразъемная насадка, содержащая линзы 2 и 3 (см. рис 2, а) оптической формирующей головки.

Оптический ввод представляет собой единый оптомеханический узел, состоящий из герметичного кварцевого окна и разъемов для подключения лазерного модуля с атмосферным световодом и световода для использования в условиях вакуума. Оптический ввод монтируется на стандартное посадочное место, предназначенное для установки разъема типа 2РМГП/2РМГПД. Гермоплата выполнена как вакуумный фланец стандарта ISO-F с условным проходным диаметром 500 мм, на котором расположено 25 мест для установки оптических вводов.

Лазерный модуль разработан на базе волоконного лазера YLM-125. Управление мощностью волоконного лазера осуществляется аналоговым сигналом, также по аналоговым выходам производится контроль выходной мощности и контроль температуры. Следовательно, для решения задачи по управлению большим количеством лазерных модулей с помощью единой системы целесообразно расположить управляющий контроллер, в состав которого входят аналоговые выходы и входы, в непосредственной близости от каждого модуля. Для связи с ПК управляющие контроллеры соединены последовательно по стандарту RS-485. Питание лазерного модуля осуществляется постоянным напряжением в 24 В. Благодаря компактности лазерного модуля можно расположить сам модуль, блок питания и управляющий контроллер в стандартном корпусе 19-дюймовых стоек телекоммуникационного оборудования.

В рамках работы по созданию лазерной системы локального нагрева изготовлена система, содержащая 20 каналов. Лазерные модули собраны в две стойки, каждая из которых содержит 10 модулей. Высота стоек составила 32 монтажные единицы (RMU).

На рис. 4, а представлена фотография стойки с лазерными модулями, а на рис. 4, б, в показана гермоплата с подсоединенными к ней лазерными модулями и световодами для использования в условиях вакуума со стороны атмосферы и со стороны вакуума соответственно.

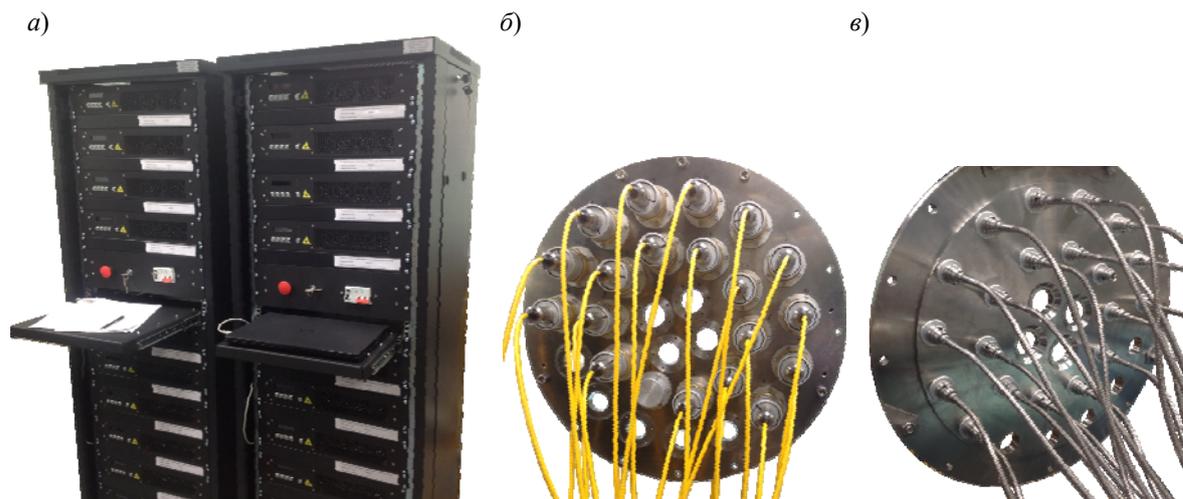


Рис. 4

Оценим пропускание одного канала лазерной системы локального нагрева. Канал состоит из волоконного лазера в качестве источника излучения, транспортное волокно которого оканчивается коллиматором; оптического ввода с входным окном, установленного на гермоплате; одиночной просветленной фокусирующей линзы; световода для использования в условиях

вакуума с непросветленными торцами и оптической формирующей головки, состоящей из четырех просветленных линз. Коэффициент пропускания канала оценивается как

$$T = (\tau_{\phi})^2 \cdot (\tau_{\text{пр}})^N \cdot 10^{-A/l/10} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где  $\tau_{\phi}$  — пропускание на оптических поверхностях световода для использования в условиях вакуума;  $\tau_{\text{пр}}$  — пропускание на просветленных поверхностях оптических элементов,  $N=12$  — количество просветленных поверхностей;  $l$  — длина световода для использования в условиях вакуума;  $A$  — затухание в световоде.

Учитывая, что для нормального падения лучей

$$\tau_{\phi} = \frac{4n}{(n+1)^2}, \quad (4)$$

а также принимая показатель преломления  $n$  кварца на длине волны 1,07 мкм равным 1,45, остаточное отражение на просветленных поверхностях 0,15 %, длину световода — 20 м, а затухание — 3 дБ/км, получаем суммарное пропускание канала равным 90,5 %. При испытаниях системы расчетный коэффициент пропускания подлежит сравнению с измеренным.

**Испытания лазерной системы локального нагрева.** В ходе работы лазерная система локального нагрева была собрана на территории АО „ИСС“ (Железногорск) и испытана в составе вакуумной установки ГВУ-600. На первом этапе испытаний все каналы системы собраны и испытаны при нормальном атмосферном давлении и температуре  $(25 \pm 5)$  °С. В ходе испытаний произведена проверка максимальной выходной мощности лазерного излучения по каждому из каналов, суммарного пропускания каждого из каналов, формы и размеров формируемых пятен, а также осуществлена проверка распределения плотности мощности излучения и произведен расчет неравномерности для различных размеров пятна и расстояний от оптической формирующей головки до рабочей плоскости. На втором этапе испытаний проверена работоспособность системы и проведено исследование динамики нагрева лазерным излучением различных образцов материалов в условиях вакуума и криогенных температур. Регистрировались зависимости температуры образцов и составных частей системы локального нагрева от подаваемой мощности лазерного излучения и времени воздействия.

В ходе испытаний при нормальном атмосферном давлении и температуре производились измерения выходной мощности каждого волоконного лазера и мощности лазерного излучения на выходе из каждого канала системы локального нагрева с последующим вычислением коэффициентов пропускания. Для всех каналов системы значение измеренного коэффициента пропускания находилось в диапазоне от 89 до 91 %, что хорошо согласуется с рассчитанным по соотношению (3) коэффициентом пропускания. При установке максимальной мощности волоконного лазера в 125 Вт мощность лазерного излучения на выходе головки составила не менее 110 Вт для каждого канала.

Регистрация распределения плотности мощности по сечению пятна проводилась путем сканирования пятна по двум координатам термоэлектрическим измерительным преобразователем лазерного излучения. Диаметр входной апертуры преобразователя был в 10 раз меньше диаметра измеряемого пятна для каждого его размера. Дополнительно проводилась фотофиксация изображения пятна, формируемого системой. Неравномерность распределения энергии рассчитывалась как

$$U = \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{P_{\text{max}} + P_{\text{min}}} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где  $P_{\text{max}}$  и  $P_{\text{min}}$  — максимальная и минимальная мощность, зарегистрированная преобразователем лазерного излучения.

Для всех каналов неравномерность не превышала 15 % при размерах пятен от 50 до 250 мм, что указывает на корректность расчета оптической схемы головки, а также подтверждает предположение о равномерном распределении излучения по координате на выходном торце световода.

На рис. 5, а, в представлены фотографии формируемых системой пятен диаметром 70 и 230 мм на расстоянии 1000 мм от головки, а также трехмерные диаграммы и графики распределения энергии по сечению пятна (рис. 5, б, г). Размер клетки на фотографиях составляет 10 мм.

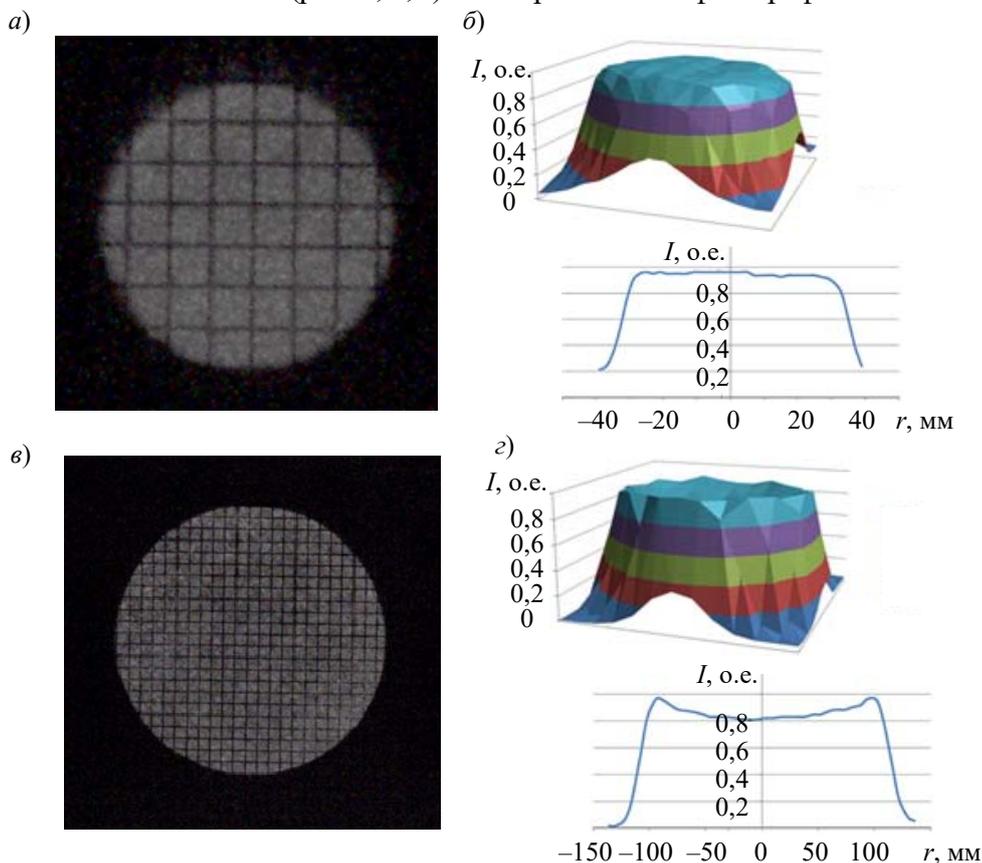


Рис. 5

При испытаниях в условиях вакуума во внутренний объем вакуумной камеры были введены 20 каналов системы локальных нагревателей с фокусировкой пятна. В качестве образцов использованы детали из листового алюминиевого сплава и сотовые панели с алюминиевой и углепластиковой обшивками. На стапеле перед образцами на расстояниях 1000 и 2000 мм размещались оптические головки, формировавшие на образцах пятна диаметром от 60 до 200 мм. На обратной стороне каждого образца были установлены терморезисторы для контроля температуры образцов. Также термосопротивления были установлены на корпусе одной из головок и вблизи выходного торца световода для использования в условиях вакуума, подключенного к этой головке.

После настройки положения и размеров пятен вакуумная камера была закрыта и откачана до давления  $5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст., температура на криоэкранах вакуумной камеры доведена до рабочего уровня  $(-185 \pm 5)$  °С. При испытаниях были попеременно задействованы все 20 каналов лазерной системы локального нагрева. Система успешно выдержала испытания и по их результатам аттестована согласно ГОСТ РВ 0008-002.

В ходе испытаний получены зависимости температуры ( $T$ ) образцов от мощности лазерного излучения ( $P$ ) и времени воздействия ( $t$ ). Так, на рис. 6, а приведена зависимость температуры на обратной стороне сотовой панели с углепластиковой обшивкой ( $T_{\text{угл}}$ ) при воздействии на ее лицевую сторону лазерного излучения с плотностью мощности  $5\,000$  Вт/м<sup>2</sup>

в пятне диаметром 80 мм, что соответствовало  $P=27$  Вт на выходе оптической формирующей головки (25 % от максимальной мощности канала). Данной мощности хватило, чтобы поднять температуру с  $-160$  до  $+20$  °С за 30 мин, после чего был достигнут режим термостабилизации. Воздействие большей плотности мощности приводило к росту температуры сотовой панели вплоть до ее разрушения, что также было зафиксировано при испытаниях. После прекращения воздействия лазерного излучения температура панели возвращалась к криогенной за время  $\approx 1$  ч.

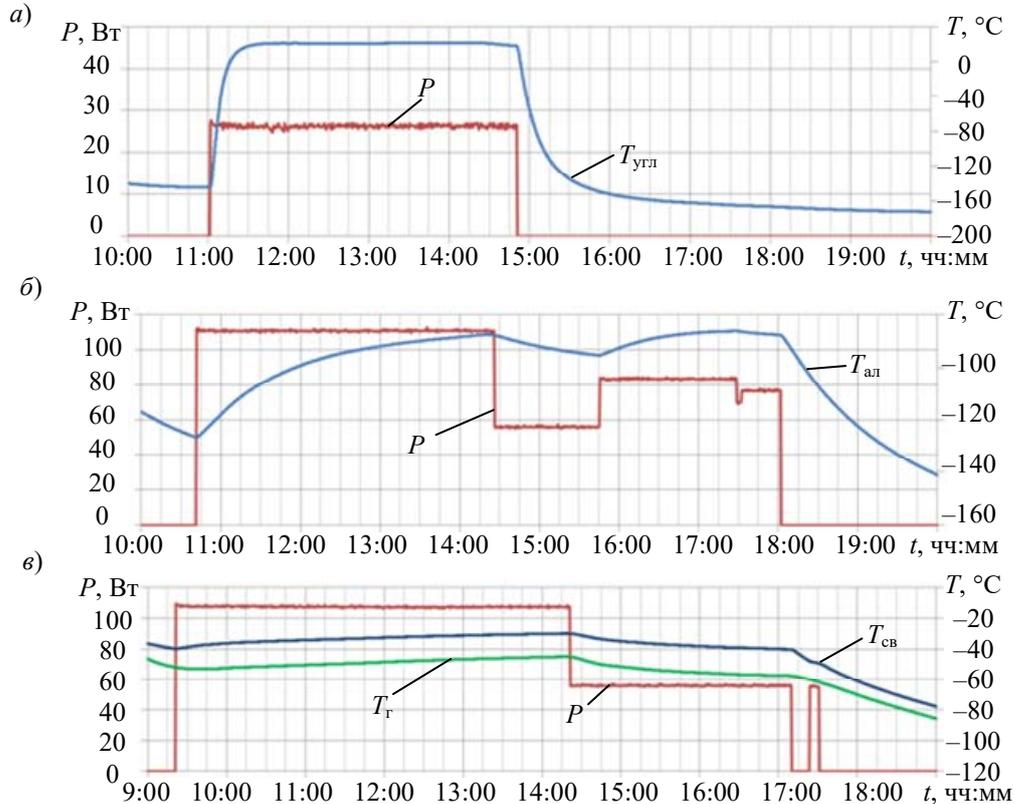


Рис. 6

На рис. 6, б приведена зависимость температуры на обратной стороне сотовой панели с алюминиевой обшивкой ( $T_{ал}$ ) при плотности мощности 20 000, 10 000 и 15 000 Вт/м<sup>2</sup> в пятне диаметром 80 мм. Мощность лазерного излучения составляла 110, 55 и 82 Вт соответственно. По сравнению с панелью с углепластиковой обшивкой скорость нагрева и охлаждения алюминиевой панели существенно ниже, что обусловлено высоким коэффициентом отражения на длине волны 1,07 мкм, высокой теплоемкостью и малым коэффициентом черноты материала. При этом видно, что с помощью регулировки значений  $P$  можно с высокой точностью регулировать температуру панели.

На рис. 6, в приведена зависимость температуры оптической формирующей головки ( $T_{г}$ ) и защитной рубашки световода ( $T_{св}$ ) вблизи его выходного торца от мощности лазерного излучения, передаваемой каналом. Видно, что в ходе испытаний температуры головки и световода изменялись незначительно и не превышали  $-30^{\circ}$  при всех значениях мощности излучения вплоть до максимального. Следовательно, головки и световоды при испытаниях не будут являться вторичными источниками тепла и не будут оказывать существенного влияния на результаты.

**Заключение.** Разработана, изготовлена, испытана и аттестована многоканальная лазерная система локального нагрева для тепловвакуумных испытаний космической техники. Система позволяет формировать на испытуемом объекте пятно лазерного излучения диаметром от 50 до 240 мм и плотностью мощности до 55 000 Вт/м<sup>2</sup> с распределением плотности мощности по сечению пятна, близким к равномерному. Технические характеристики системы и

широкий диапазон регулировки выходных параметров лазерного излучения позволяют применять систему как источник излучения для проведения термовакуумных испытаний, значительно расширяя возможности существующих испытательных комплексов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевляков А. В., Выхристюк И. А., Верховгляд А. Г. и др. Автоматизированная система управления тепловыми потоками при проведении тепловакуумных испытаний космических аппаратов // Сибирский журнал науки и технологий. 2014. № 1 (53). С. 137.
2. Верховгляд А. Г., Выхристюк И. А., Макаров С. Н. и др. Алгоритмы управления имитаторами тепловых потоков в процессе термовакуумных испытаний // Решетневские чтения. 2010. Т. 1, № 14. С. 52.
3. Куликов Д. С., Бирюк В. В., Моисеев В. В. Экспериментальное исследование теплового режима трубчатой галогенной лампы накаливания // Вестн. Пермского нац. исслед. политехнич. ун-та. Аэрокосмическая техника. 2019. № 56. С. 92.
4. Двирный Г. В., Шевчук А. А., Двирный В. В. и др. Анализ возможности создания имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для наземной отработки космических аппаратов // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 2. С. 271.
5. Крат С. А., Христинич В. В. Тепловакуумная отработка космических аппаратов: развитие новых тенденций // Сибирский журнал науки и технологий. 2010. № 4. С. 126.
6. Рассамкин Б. М., Рогачев В. А., Хайрнасоев С. М. и др. Термовакуумные испытания оптико-электронных приборов космического аппарата МС-2-8 // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 4. С. 42.

## Сведения об авторах

- Антон Александрович Кишалов** — ООО „НПП ВОЛО“, лаборатория оптоэлектронных систем; начальник лаборатории; E-mail: grinfo@mail.ru
- Владимир Михайлович Журба** — ООО „НПП ВОЛО“, генеральный директор; E-mail: mail@volo.ru
- Анатолий Геннадьевич Попов** — ООО „НПП ВОЛО“, опытно-конструкторский отдел; начальник отдела; E-mail: popov@volo.ru
- Александр Эдуардович Пуйша** — канд. техн. наук; ООО „НПП ВОЛО“, научно-исследовательский отдел; начальник отдела; E-mail: pujsha@mail.ru
- Александр Константинович Шаров** — АО „ИСС“, отдел термовакуумных испытаний; начальник отдела; E-mail: sharov@iss-reshetnev.ru
- Антон Владимирович Хахленков** — АО „ИСС“, отдел термовакуумных испытаний; ведущий инженер; E-mail: hahlenkov@iss-reshetnev.ru

Поступила в редакцию  
29.05.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Кишалов А. А., Журба В. М., Попов А. Г., Пуйша А. Э., Шаров А. К., Хахленков А. В. Лазерная система локального нагрева для тепловакуумных испытаний космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 8. С. 739—748.

## LASER LOCAL HEATING SYSTEM FOR THERMAL VACUUM TESTING OF SPACECRAFT

A. A. Kishalov<sup>1</sup>, V. M. Zhurba<sup>1</sup>, A. G. Popov<sup>1</sup>, A. E. Puysha<sup>1</sup>,  
A. K. Sharov<sup>2</sup>, A. V. Khakhlenkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LLC Scientific and Production Enterprise of Fiber-Optic and Laser Equipment  
199034, St. Petersburg, Russia,  
E-mail: grinfo@mail.ru

<sup>2</sup> JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems,  
662972, Zheleznogorsk, Russia

A new light source based on ytterbium fiber laser is proposed for spacecraft thermal vacuum tests. Local heating laser system using as test equipment and consisting of 20 laser channels is developed and manufactured. Each of the channels creates a quasi-uniform circular laser spot with a diameter of 50 to 250 mm and a power density of up to 55,000 W / m<sup>2</sup> on the test object surface.

**Keywords:** local heating system, thermal vacuum tests, spacecraft tests

#### REFERENCES

1. Shevlyakov A.V., Vykhristyuk I.A., Verkhoglyad A.G. et al. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2014, no. 1(53), pp. 137. (in Russ.)
2. Verkhoglyad A.G., Vykhristyuk I.A., Makarov S.N. et al. *Reshetnev readings*, 2010, no. 14(1), pp. 52 (in Russ.)
3. Kulikov D.S., Biryuk V.V., Moiseyev V.V. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2019, no. 56, pp. 92. (in Russ.)
4. Dvirnyy G.V., Shevchuk A.A., Dvirnyy V.V. et al. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2018, no. 2(19), pp. 271. (in Russ.)
5. Krat S.A., Khristich V.V. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2010, no. 4, pp. 126. (in Russ.)
6. Rassamakin B.M., Rogachev V.A., Khayrnasov S.M. et al. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2008, no. 4, pp. 42. (in Russ.)

#### Data on authors

- Anton A. Kishalov** — LLC Scientific and Production Enterprise of Fiber-Optic and Laser Equipment, Laboratory of Opto-electronic Systems; Head of the Laboratory; E-mail: grinfo@mail.ru
- Vladimir M. Zhurba** — LLC Scientific and Production Enterprise of Fiber-Optic and Laser Equipment; General Director; E-mail: mail@volo.ru
- Anatoly G. Popov** — LLC Scientific and Production Enterprise of Fiber-Optic and Laser Equipment, Research and Development Department; Head of the Department; E-mail: popov@volo.ru
- Alexander E. Puysya** — PhD; LLC Scientific and Production Enterprise of Fiber-Optic and Laser Equipment, Scientific Research Department; Head of the Department; E-mail: pujsha@mail.ru
- Alexander K. Sharov** — JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems, Thermal Vacuum Testing Department; Head of the Department; E-mail: sharov@iss-reshetnev.ru
- Anton V. Khakhlenkov** — JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems, Thermal Vacuum Testing Department; Leading Engineer; E-mail: hahlenkov@iss-reshetnev.ru

**For citation:** Kishalov A. A., Zhurba V. M., Popov A. G., Puysya A. E., Sharov A. K., Khakhlenkov A. V. Laser local heating system for thermal vacuum testing of spacecraft. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 8. P. 739—748 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-8-739-748