

## АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ОБОЛОЧКИ МОЩНОГО ГАЗОРАЗРЯДНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ

В.Н. Елисеев, В.А. Товстоног, Я.М. Павлова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: v.n.eliseev@gmail.com; tovstonv@mail.ru; zebra yaroslava@yandex.ru

*Приведены результаты исследования температурного состояния трубчатых оболочек из лейкосапфира (искусственного сапфира), используемых для изготовления водоохлаждаемых газоразрядных источников излучения. Потребность в создании таких излучателей диктуется, в частности, необходимостью совершенствования экспериментальной базы для наземной отработки конструкций гиперзвуковых летательных аппаратов. Суть рассматриваемой проблемы – исследование связи температурного состояния оболочки газоразрядных источников излучения с его мощностью с учетом достаточно сложного характера зависимости теплофизических и оптических свойств лейкосапфира от длины волны излучения и температуры. Выполнен обзор и систематизация этих сведений, содержащихся в технической литературе и электронном ресурсе. Обоснованы основные допущения и сформулирована математическая модель решаемой задачи. Показана возможность использования трубок из лейкосапфира для создания эффективных водоохлаждаемых газоразрядных источников излучения, удельная мощность которых (мощность на единицу длины разрядного промежутка) может быть в 2–2,5 раза выше, чем у существующих источников с оболочками из кварцевого стекла.*

**Ключевые слова:** температура, разность температур, термостойкость, источник излучения, сапфир, летательные аппараты, испытания, оборудование.

## THERMAL REGIME ANALYSIS OF THE SHELL OF THE POWERFUL GAS-DISCHARGE EMITTING SOURCE FOR STRUCTURE THERMAL TESTING

V.N. Eliseyev, V.A. Tovstonog, Ya.M. Pavlova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: v.n.eliseev@gmail.com; tovstonv@mail.ru; zebra yaroslava@yandex.ru

*The article describes the thermal regime analysis results of tubular shells made of leuco sapphire (artificial sapphire), which are used for producing water-cooled gas-discharge emitting sources. Such emitters are necessary, in particular, for improving an experimental gear used for technology groundwork of hypersonic aircrafts. The problem features the analysis of interconnections between the thermal regime of the gas-discharge emitting sources and their powers. The analysis faces a rather complicated dependence of thermal and optical properties of the leuco sapphire on both the length of the emitted wave and the temperature. The article also observes and categorizes the information acquired from both technical publications and electronic resources. The authors explain the main assumptions and formulate a mathematical model of the problem to be solved. It is shown that leuco sapphire tubes can be used for producing water-cooled gas-discharge emitting sources, which have a unit power (a power per a length unit of the discharge gap), which is 2–2.5 times as much as the present sources with the shells made of quartz glass.*

**Keywords:** temperature, temperature difference, thermal resistance, emitting source, sapphire, aircrafts, testing, equipment.

Проводимые в настоящее время во многих развитых странах работы по созданию гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) различного назначения [1–4] тесно связаны с модернизацией существующих и разработкой качественно новых технических средств для их наземной отработки. В первую очередь это относится к созданию высокоэффективных установок и стендов для тепловых и прочностных испытаний теплонагруженных узлов конструкции таких аппаратов. Использование для этой цели гиперзвуковых аэродинамических труб не позволяет в полной мере обеспечить исследование теплопрочности конструкции даже по одному из значимых параметров — времени теплового воздействия, исчисляемому в условиях реального полета десятками минут [5]. Сложности моделирования теплопрочностного состояния ГЛА, обусловленные необходимостью переноса опытных данных, полученных на модели, на натурное изделие, а также особенности свойств используемых в них материалов, вынуждают проводить испытания на моделях достаточно больших размеров с большой площадью нагрева.

Принципиальным в области разработок ГЛА вопросом является выбор тягового двигателя. Определенные успехи, достигнутые в области гиперзвуковых скоростей, доказывают эффективность применения гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ГПВРД) с внешним сжатием для рассматриваемого класса летательных аппаратов.

В работе [6] сформулированы основные проблемы создания ГЛА, где в качестве ключевых отмечены: проектирование проточного тракта двигателя при высоком уровне его интеграции с планером; создание новых конструктивных элементов и узлов двигателя на основе высокотемпературных материалов и покрытий, способных выдерживать необходимое время тепловые нагрузки в проточных трактах ГПВРД; технологии проведения стендовых испытаний ГПВРД, интегрированных с летательным аппаратом, для определения характеристик двигателя в реальных условиях эксплуатации; разработка средств активной тепловой защиты наиболее теплонапряженных участков конструкции ГЛА и активных методов управления газодинамической структурой течения; разработка оптимальной аэротермодинамической формы ГЛА.

При гиперзвуковых скоростях полета аэродинамические характеристики планера летательного аппарата и его отдельных элементов будут существенно влиять на тяговые характеристики силовой установки, так как взаимодействие ГЛА с гиперзвуковым потоком приводит к возникновению ударно-волновых конфигураций, окружающих поверхность всего аппарата и зависящих от компоновки ГЛА. Поэтому важной концептуальной задачей проектирования ГЛА должна быть интеграция в единую систему фюзеляжа, крыльев и двигателя с учетом допустимого диапазона углов атаки, так как нижняя поверхность

корпуса выполняет роль верхней поверхности плоского сопла, а головной скачок уплотнения должен падать практически точно на нижнюю кромку воздухозаборника ГПВРД летательного аппарата. Однако, как показано в работе [7], ГЛА имеет весьма сложный спектр собственных частот, во многом зависящий от температурного состояния планера. Поэтому, кроме теплопрочностных, необходимо определять и аэроупругие характеристики ГЛА посредством динамических испытаний в условиях высокотемпературного нагрева. Это, в свою очередь, предъявляет специфические требования к испытательному оборудованию при вполне определенных ограничениях. Так, кроме воспроизведения режимов нагрева, источники нагрева должны быть бесконтактными и располагаться на достаточном расстоянии от нагреваемых поверхностей, что возможно при использовании только источников радиационного нагрева.

Вопросы использования источников радиационного нагрева и создания на их основе технических средств для тепловых и теплопрочностных испытаний конструкций летательных аппаратов типа ГЛА, рассмотрены, в частности, в работе [5], а в монографии [8] систематизированы данные по характеристикам трубчатых источников излучения большой мощности, как наиболее подходящих для практической реализации при создании наземных стендов высокотемпературных испытаний ГЛА. Так показано, что реализация нагрева, например кромок носовой части и воздухозаборника ГЛА, достигающего при полете с числами Маха  $M = 10$  значений  $2400\text{ К}$ , может быть обеспечена при использовании мощных водоохлаждаемых газоразрядных источников излучения (ГИИ), достижимая плотность потока излучения которых составляет  $2500\text{ кВт/м}^2$ . Однако в связи с многократной перегрузкой, вызывающей интенсивный нагрев кварцевой оболочки ГИИ и эрозию электродов, ресурс источника излучения сильно ограничен. Некоторые подходы к повышению ресурса работы ГИИ рассмотрены в работах [9–11], где отмечено, что одной из эффективных мер повышения ресурса работы ГИИ может стать замена внутренней (горячей) оболочки из кварцевого стекла на оболочку из лейкосапфира.

Отечественной промышленностью налажены производство и поставка трубок из лейкосапфира диаметром до  $30\text{ мм}$ , толщиной стенки  $1 \dots 8\text{ мм}$  и длиной  $150 \dots 300\text{ мм}$  [12]. Зарубежные аналоги таких трубок имеют параметры: диаметр от  $1,3$  до  $50\text{ мм}$ , толщину трубки  $0,25 \dots 5,0\text{ мм}$  и максимальную длину  $1000\text{ мм}$  [13]. Серьезным недостатком стекол из искусственного сапфира является достаточно большой коэффициент линейного расширения (КЛР), который на порядок превышает аналогичный параметр кварцевых стекол [14]. Среднее значение КЛР у кварцевых стекол в интервале температур от  $0$  до  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  составляет  $6 \cdot 10^7\text{ град}^{-1}$ , а у лейкосапфира для интервала  $\pm 60\text{ }^\circ\text{C}$  —  $(3,24 \dots 5,66) \cdot 10^6\text{ град}^{-1}$  [15].

Параметр КЛР является одним из определяющих факторов, который характеризует способность стекла выдерживать без разрушения определенные перепады температуры при резком охлаждении — его термостойкость. Для количественной оценки термостойкости стекол предложена формула [16]

$$\Delta T = K \frac{\sigma_{\text{изг}} (1 - \mu)}{\alpha E}, \quad (1)$$

где  $\Delta T$  — разность температур;  $K$  — коэффициент (при охлаждении всего изделия равен единице);  $\sigma_{\text{изг}}$  — предел прочности при изгибе;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения;  $E$  — модуль упругости.

Оценка термостойкости стекла для данных, приведенных в таблице, дает для сапфира  $\Delta T_c = 120 \dots 186$  град и для кварцевого стекла  $\Delta T_{\text{кв}} = 730 \dots 1280$  град, что достаточно хорошо совпадает с данными экспериментальных исследований:  $\Delta T_c = 162 \pm 8$  град [11] и  $\Delta T_{\text{кв}} = 800 \dots 1000$  град [17].

#### Физические параметры материалов

Материал	$\sigma_{\text{изг}}$ , МПа	$E$ , МПа	$\mu$	$\alpha$ , град <sup>-1</sup>
Кварцевое стекло	39,2... 68,7 [18]	(0,72... 0,75) × 10 <sup>5</sup> [19, 20]	0,17... 0,19 [20]	5,8·10 <sup>-7</sup> [13]
Сапфир	350... 690 [13, 21]	4,7·10 <sup>5</sup> [13, 20]	0,25... 0,30 [21, 22]	5,92·10 <sup>-6</sup> [13, 21]

Методика экспериментального исследования термостойкости предусматривает равномерный по объему нагрев образца до заданной температуры и последующее быстрое погружение его в холодную воду с температурой от 5 до 27 °С [22]. В результате отжига в специальных печах термостойкость может быть повышена в 2,5–3 раза [21].

Стекло значительно лучше работает на сжатие, возникающее при его нагревании, чем на растяжение. Поэтому резкое охлаждение скорее вызывает разрушение (растрескивание), чем резкий нагрев. Скорость повышения температуры стекла зависит от способа нагрева и должна быть тем меньше, чем больше толщина стенок и меньше термостойкость стекла. При нагревании пламенем газовых горелок она не должна превышать 200 град/мин. Из-за малой теплопроводности стекла более быстрый нагрев вызывает неравномерное распределение температуры по толщине и возникновение значительных внутренних напряжений, что и может приводить к его растрескиванию [23]. Скорость разогрева излучением может составлять до 1000 град/мин, поскольку объемный характер поглощения лучистой энергии, как правило, заметно уменьшает градиент температуры.

Полученную в таких условиях термостойкость образцов стекла можно, по-видимому, использовать в качестве наиболее “жесткого” критерия вероятности разрушения изделия из него в конкретных условиях теплового нагружения.

Термостойкость реальных изделий из стекла определяется совокупностью его термических свойств (теплопроводностью, теплоемкостью, коэффициентом термического расширения), а также размерами, формой изделия, состоянием поверхности, режимом охлаждения и другими факторами. Тонкостенные и округлые изделия из стекла более термостойки, чем толстостенные [12].

Приведенные сведения о термостойкости кварцевых стекол и стекол из сапфира показывают, что разрушение сапфировых оболочек водоохлаждаемых ГИИ, вероятнее всего, будет происходить при существенно более низких температурах, нежели трубчатых оболочек из кварцевого стекла. Температурное состояние последних и причины их разрушения достаточно хорошо изучены теоретически и экспериментально [5, 24].

В настоящей работе поставлена задача исследования достижимого уровня температуры и ее перепадов, возникающих в оболочках мощных ГИИ, выполненных из лейкосапфира, с учетом особенностей теплофизических и оптических свойств этого материала.

**Постановка задачи исследования.** Рассмотрим задачу определения температурного поля тонкой цилиндрической оболочки водоохлаждаемого трубчатого ГИИ, схема теплообмена которой показана на рис. 1, заменив ее плоской стенкой.

Допущение о возможности указанной замены обосновано в работе [25], в которой показано, что для частично прозрачных материалов такая замена приводит к меньшей погрешности, чем для непрозрачных при прочих равных условиях. Дифференциальное уравнение и граничные условия, описывающие температурное поле в стенке, сформулируем в виде

$$\frac{d}{dx} \left[ \Lambda(T) \frac{dT}{dx} \right] + k(T) q_{л,0} e^{-k(T)x} = 0; \quad (2)$$

$$- \left[ \Lambda(T) \frac{dT}{dx} \right]_{x=0} = q_T; \quad (3)$$

$$- \left[ \Lambda(T) \frac{dT}{dx} \right]_{x=h} = \alpha_{ж} (T_2 - T_{ж}), \quad (4)$$

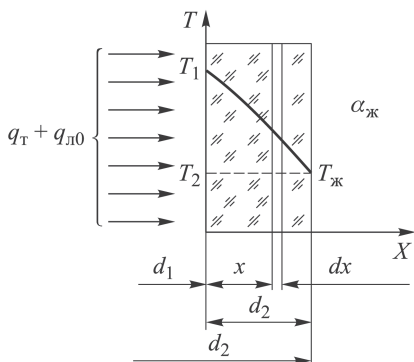


Рис. 1. Схема теплового нагружения “горячей” оболочки ГИИ

где  $\Lambda(T)$  — теплопроводность материала оболочки, зависящая от температуры;  $k(T)$  — коэффициент поглощения излучения в материале оболочки (в общем случае функция температуры);  $q_{л,0}$  — плотность интегрального потока излучения, подводимого к внутренней поверхности оболочки;  $q_T$  — плотность кондуктивного потока;  $\alpha_{ж}$  — коэффициент теплоотдачи;  $T_{ж}$  — температура охлаждающей жидкости (дистиллированная вода).

Значения  $q_{л,0}$  и  $q_T$  рассчитывали для заданного значения электрической мощности  $P$  источника и зависящего от нее коэффициента полезного действия  $\eta(P)$  по формулам ([26]):

$$q_{л,0} = \frac{P\eta(P)}{F_{внут}}; \quad (5)$$

$$q_T = \frac{[1 - \eta(P)] P}{F_{внут}}, \quad (6)$$

где  $F_{внут} = \pi d_{внут} L$  — площадь внутренней поверхности “горячей” оболочки источника излучения;  $d_{внут}$  — внутренний диаметр оболочки;  $L$  — межэлектродное расстояние.

Коэффициент теплоотдачи определяли по формуле

$$\alpha_{ж} = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4} \frac{\Lambda_{ж}}{d_{эж}}.$$

В расчетах использована следующая исходная информация. На рис. 2 приведена зависимость молекулярной теплопроводности сапфира от температуры [12].

Видно, что сравнительно высокая теплопроводность сапфира с ростом температуры заметно уменьшается. В противоположность этому молекулярная теплопроводность кварцевого стекла существенно более низкая и с ростом температуры несколько возрастает [27]. Для выполнения расчетов температурного поля оболочек ГИИ обе указанные зависимости (рис. 2, [27]) были представлены формулами

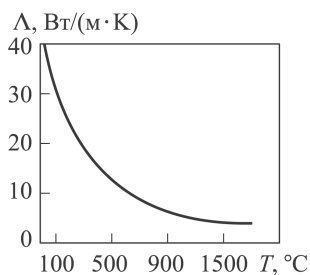
$$\Lambda(T) = 0,0002 T^2 - 0,26 T + 102,5$$

— для сапфира при температуре от 300 К до 600 К;

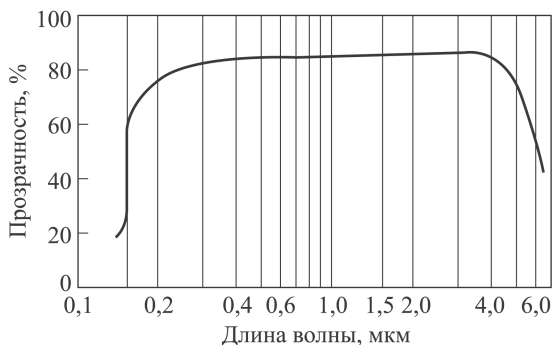
$$\Lambda(T) = 7,27 \cdot 10^{-4} T + 1,14$$

— для кварцевого стекла при 300...1500 К, где  $T$  — температура.

Выбор зависимости коэффициента поглощения сапфира от длины волны и температуры связан с анализом прозрачности материала. В диапазоне длин волн от 0,17 до 5,0 мкм сапфир имеет высокую прозрачность по отношению к излучению ксеноновой плазмы, спектр излучения которой расположен в основном в диапазоне 0,2...3,0 мкм (рис. 3).



**Рис. 2. Зависимость молекулярной теплопроводности сапфира от температуры**

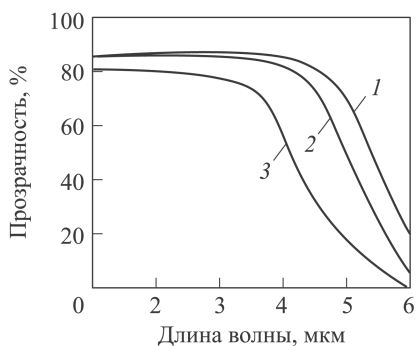


**Рис. 3. Зависимость прозрачности сапфира от длины волны**

С возрастанием температуры в интервале от 20 до 1000 °С наблюдается уменьшение прозрачности сапфира на длинах волн больше 3,0 мкм (рис. 4).

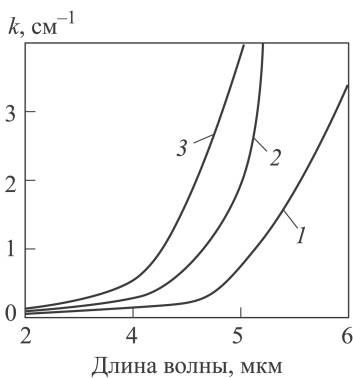
Полученные ранее результаты расчетов температурного поля сапфировой оболочки водоохлаждаемого ГИИ при увеличении его удельной мощности (мощность на единице длины газоразрядного промежутка) до 1250 кВт/м показали, что наибольшая температура оболочки не превышает 600 К. Это обстоятельство в совокупности с данными, приведенными на рис. 4, позволяет принять коэффициент поглощения сапфира, используемый в дифференциальном уравнении (2), не зависящим от температуры и длины волны. Обоснованность сделанного допущения хорошо иллюстрирует также зависимость, представленная на рис. 5 [28], где величина  $k(\lambda, T)$  в диапазоне длин волн до 3,5 мкм и температуры ниже 600 °С остается практически постоянной.

При решении краевой задачи (2)–(4) коэффициент поглощения сапфира принимали равным  $k(\lambda, T) = k = 0,00003 \text{ мм}^{-1}$  [8]. Необходи-



**Рис. 4. Зависимость пропускательной способности сапфира от длины волны и температуры:**

1 –  $T = 20 \text{ °C}$ ; 2 –  $T = 500 \text{ °C}$ ; 3 –  $T = 1000 \text{ °C}$



**Рис. 5. Зависимость коэффициента поглощения сапфира от длины волны излучения и температуры (обозначения см. рис. 4)**

мое для расчета плотностей потоков  $q_{л,0}$  и  $q_T$  значение внутреннего коэффициента полезного действия ГИИ выбрано в соответствии с рекомендациями работы [5] равным 0,92. Использован численный метод решения задачи (2)–(4).

**Результаты исследования.** В соответствии с поставленной задачей выполнен анализ температурного состояния “горячей” оболочки ГИИ с межэлектродным расстоянием 200 мм и внутренним диаметром 7 мм из лейкосапфира в форсированных по мощности режимах работы с учетом особенностей теплофизических и оптических свойств этого материала, найденных на основе изучения широкого перечня литературных источников. Приведенная на рис. 2–5 информация позволила обосновать основные допущения, использованные при формулировке математической модели решаемой задачи.

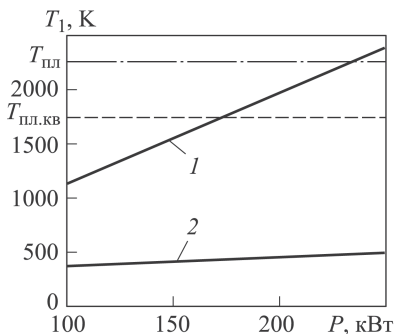
В результате расчетов получены зависимости температурного состояния оболочек ГИИ от его мощности и возникающих при этом перепадах температуры по толщине. Полученные авторами ранее оценки температурного состояния оболочек из сапфира и кварцевого стекла, теплопроводность которых была принята постоянной, показали существенное преимущество оболочек из сапфира при использовании их в конструкции ГИИ. На рис. 6 представлена зависимость температуры поверхности оболочек из кварца и сапфира со стороны плазмы (горячая поверхность) от мощности ГИИ.

Видно, что температура кварцевой оболочки уже при мощности  $\sim 135$  кВт достигает значения, соответствующего температуре размягчения кварца (1450 К). Экспериментальное значение мощности ГИИ, при котором происходит разрушение кварцевых оболочек, составляет  $\sim 100$ – $110$  кВт. Аналогичная температура оболочки из сапфира даже при мощности ГИИ 250 кВт остается равной примерно 600 К. На поверхности оболочки, охлаждаемой водой, ее значение при этой же мощности не превышает температуру кипения воды в тракте охлаждения с давлением 0,5 МПа (рис. 7).

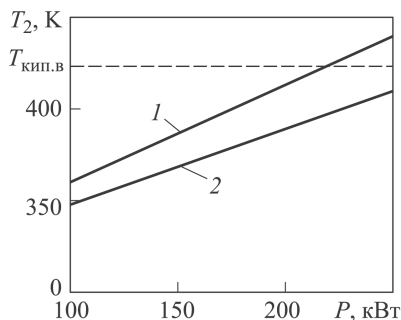
Уточненное распределение температуры оболочек из кварцевого стекла и сапфира, полученное с учетом противоположного характера зависимости их теплопроводности от температуры для мощности ГИИ, равной 120 кВт (удельная мощность 600 кВт/м), приведено на рис. 8.

Уровень температур на граничных поверхностях оболочек сохраняется примерно таким же, как и на рис. 6, но в распределении температуры по толщине кварцевой оболочки наблюдается заметное отклонение от линейного, это объясняется тем, что коэффициент поглощения кварцевого стекла на два порядка больше, чем у сапфира [8]. Перепад температуры по толщине оболочки из сапфира существенно меньше перепада у оболочки из кварца и даже при увеличении мощности ГИИ



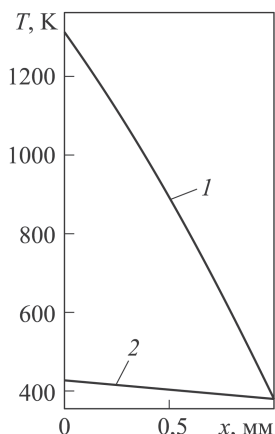


**Рис. 6.** Зависимость температуры горячей поверхности оболочек из кварца (1) и сапфира (2) от мощности ГИИ;  $T_{пл,с}$  и  $T_{пл,кв}$  — температуры плавления сапфира и кварцевого стекла

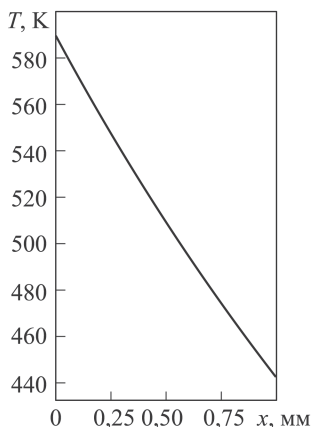


**Рис. 7.** Зависимость температуры охлаждаемой поверхности оболочки от мощности ГИИ:

1 — кварцевое стекло; 2 — сапфир;  $T_{кип,в}$  — температура кипения воды при давлении 0,5 МПа



**Рис. 8.** Уточненное распределение температуры по толщине оболочек из кварца (1) и сапфира (2) при электрической мощности ГИИ 120 кВт (удельная мощность 600 кВт/м)



**Рис. 9.** Температурное поле в оболочке ГИИ из сапфира при мощности 250 кВт (удельная мощность 1250 кВт/м)

до 250 кВт (удельная мощность 1250 кВт/м) он не превышает  $150^\circ\text{C}$  (рис. 9).

Основную роль в нагреве оболочки играет поток, передаваемый через нее путем теплопроводности. Его плотность  $q_t$  при мощности источника излучения  $P = 250$  кВт, найденная по формуле (6) для  $F_{внут} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  ( $d_1 = 7$  мм,  $L = 200$  мм), равна  $4,55 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ . При этом плотность потока излучения, поглощаемого в оболочке толщиной  $h = 1$  мм и отдаваемого затем в охлаждающую воду, составляет

$$q_{погл} = kq_{л,0} \int_0^h e^{-kx} dx = q_{погл} (1 - e^{-kh}) = 0,00157 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

где  $q_{л,0} = 52,27 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$  — плотность потока излучения на внутрен-

ней поверхности оболочки, рассчитанная по формуле (5). Отношение  $q_t/q_{\text{погл}} = 2898$  показывает, что плотность потока, передаваемого через оболочку в охлаждающую жидкость путем теплопроводности почти в 3000 раз больше потока излучения, который после поглощения в оболочке также передается в жидкость. Это обстоятельство хорошо объясняет практически линейное распределение температуры по толщине оболочки из сапфира (см. рис. 9).

Перепад температуры, равный  $150^\circ\text{C}$ , не превышает значение температуры, характеризующей термостойкость сапфира ( $162 \pm 8$ )  $^\circ\text{C}$ , являющейся наиболее “жестким” критерием работоспособности этого материала. В отличие от термостойкости, определяемой в экспериментах в условиях резкого охлаждения образца, расчетное значение перепада температуры  $150^\circ\text{C}$  возникает в результате нагрева оболочки. Более того, плавное или ступенчатое увеличение мощности ГИИ способно обеспечить достаточно медленное возрастание температуры оболочки, при котором в стекле образуются менее опасные сжимающие напряжения [23]. Например, при начальной мощности при включении ГИИ, равной 40 кВт, температура “горячей” поверхности оболочки из сапфира составляет 350 К, на охлаждаемой поверхности 327 К и перепад температуры по толщине —  $\Delta T = 22$  град.

Следует отметить, что мощность рассматриваемого ГИИ, равная 250 кВт (удельная мощность 1250 кВт/м), примерно в 2–2,5 раза больше достигнутой в настоящее время в современных источниках излучения с трубками из кварцевого стекла [26]. При этом значительно меньшая температура и ее перепады в оболочке из сапфира позволяют надеяться и на существенно больший ресурс работы ГИИ. Внешнюю оболочку такого источника излучения, учитывая невысокий уровень ее нагрева, целесообразно выполнять из кварцевого стекла, имеющего существенно меньшую стоимость и большую термостойкость, чем сапфир.

**Заключение.** Выполнен обзор и систематизированы данные о теплофизических и оптических свойствах лейкосапфира – перспективного материала для использования в конструкции водоохлаждаемых ГИИ. Представлена оценка температурного состояния их оболочек.

Показана возможность использования трубок из лейкосапфира для создания ГИИ, удельная мощность которых в 2–2,5 раза больше ее значения у существующих аналогичных источников излучения с трубками из кварцевых стекол.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Научные основы технологий XXI века* / под ред. А.И. Леонтьева, Н.Н. Пилогина, Ю.В. Полежаева, В.М. Поляева. М.: УНПЦ “Энергомаш”, 2000. 136 с.

2. Лукашевич В.П., Труфакин В.А., Микоян С.А. Воздушно-орбитальная система “Спираль”. Режим доступа: <http://www.buran.ru> (дата обращения 05.08.2014).
3. *Microsoft/NASA X-43 Hyper-X*. Режим доступа: <http://www.airwar.ru/enc/xplane/x43.html> (дата обращения 05.08.2014).
4. Железнякова А.Н., Суржиков С.Т. Численное моделирование гиперзвукового обтекания модели летательного аппарата X-43 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. № 1. С. 3–19.
5. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Анализ технических возможностей создания высокоэффективных установок радиационного нагрева для тепловых испытаний объектов аэрокосмической техники // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 1. С. 57–70.
6. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. На пути к созданию модели виртуального ГЛА. М.: ИПМех РАН, 2013. 160 с.
7. Аричнев С.В., Мензульский С.Ю. Колебания гиперзвукового летательного аппарата внутри области динамической устойчивости // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. № 2. С. 47–58.
8. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 400 с.
9. *Излучатель тепловой энергии* / В.А. Товстоног, В.Г. Мерзликин, К.В. Чирин, Ю.В. Максимов, Н.П. Мерзликина. Патент на изобретение № 2529894 по заявке № 2013123324 с приоритетом от 22.05.2013. Зарегистрировано 11.08.2014.
10. Елисеев В.Н., Товстоног В.А., Боровкова Т.В. Об эффективности оребрения охлаждаемой поверхности ребрами с внутренними источниками теплоты // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 2. С. 28–43.
11. Елисеев В.Н., Товстоног В.А., Павлова Я.М. К проблеме повышения мощности газоразрядных источников излучения для тепловых испытаний конструкций летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 4. С. 131–135.
12. *Производственная компания ООО “ЭЛЕКТРОСТЕКЛЮ”*. Режим доступа: [http://www.elektrosteklo.ru/Al2O3\\_rus.htm](http://www.elektrosteklo.ru/Al2O3_rus.htm) (дата обращения 05.08.2014).
13. *North America. Products. Industrial Ceramics*. Режим доступа <http://americas.kyocera.com/kicc/pdf/kyocera%20sapphire.pdf> (дата обращения 05.08.2014).
14. *Виды и свойства стекла*. Режим доступа: <http://www.dia-m.ru/page.php?page-id=30> (дата обращения 05.08.2014).
15. *Оптические элементы и устройства*. Режим доступа: <http://www.optotl.ru/mat/Al2O3> (дата обращения 05.08.2014).
16. Ляхтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.
17. *Кварцевое стекло*. Режим доступа: <http://www.stroitelstvo-new.ru/steklo/svoystva-2.shtml> (дата обращения 05.08.2014).
18. *Стекло кварцевое оптическое*. Режим доступа: <http://techsteklo.ru/Optic.html> (дата обращения 05.08.2014).
19. Лунин Б.С., Торбин С.Н. О температурной зависимости модуля Юнга чистых кварцевых стекол // Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия. 2000. Т. 41. № 3. С. 172–173.
20. *Кухлинг Х. Справочник по физике / пер. с нем.* М.: Мир. 1985. 250 с.
21. *Добровинская Е.В., Литвинов Л.А., Пищик В.В. Энциклопедия сапфира*. Институт кристаллографии. 2004. 508 с.
22. *ГОСТ 25535–82. Изделия из стекла. Методы определения термической стойкости*. Введен в действие 01.07.1983.
23. *Кингери У.Д. Введение в керамику*. М.: Стройиздат. 1969. 456 с.

24. *Елисеев В.Н., Товстоног В.А.* Характеристики источников излучения и излучательных систем высокоинтенсивного нагрева // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2001. № 4. С. 3–32.
25. *Елисеев В.Н.* К расчету температуры цилиндрической колбы охлаждаемой газоразрядной лампы // Светотехника. 1969. № 3. С. 6.
26. *Мьо Тан.* Разработка методического и алгоритмического обеспечения тепловых испытаний материалов и элементов конструкции в стендах с газоразрядными источниками излучения. Дисс. . . канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 183 с.
27. *Сергеев О.А., Мень А.А.* Теплофизические свойства полупрозрачных материалов. М.: Изд-во Стандартов. 1977. 288 с.
28. *Sapphire Products Properties and Benefits.* Режим доступа: <http://www.crystals.saint-gobain.com/uploadedFiles/SG-Crystals/Documents/sapphire-material-products-properties.pdf> (дата обращения 05.08.2014).

## REFERENCES

- [1] Leont'ev A.I., Pilyugin N.N., Polezhaev Yu.V., Polyayev V.M., eds. Nauchnye osnovy tekhnologiy XXI veka [Scientific Bases of Technology of the XXI Century]. Moscow, UNPTs Energomash Publ., 2000. 136 p.
- [2] Lukashevich V.P., Trufakin V.A., Mikoyan S.A. Vozdushno-orbital'naya sistema "Spiral" [Air-Orbital System "Spiral"]. Available at: <http://www.buran.ru> (accessed 05.08.2014).
- [3] Microcraft/NASA X-43 Hyper-X. Available at: <http://www.airwar.ru/enc/xplane/x43.html> (accessed 05.08.2014).
- [4] Zheleznyakova A.N., Surzhikov S.T. Numerical Simulation of Hypersonic Flow Past Model of X-43 Flying Vehicle. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2010, no. 1, pp. 3–19 (in Russ.).
- [5] Eliseev V.N., Tovstonog V.A. Analysis of Technical Feasibilities to Create the High-Efficient Radiation-Heating Plants for Thermal Testing of Aerospace Machinery Objects. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2011, no. 1, pp. 57–70 (in Russ.).
- [6] Zheleznyakova A.L., Surzhikov S.T. Na puti k sozdaniyu modeli virtual'nogo GLA [On the Way to the Creation of a Model of Virtual HCV]. Moscow, IPMech RAS Publ., 2013. 160 p.
- [7] Arinchev S.V., Menzul'skiy S.Yu. Oscillations of Hypersonic Flying Vehicle inside Area of Dynamical Stability. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2010, no. 2, pp. 47–58 (in Russ.).
- [8] Eliseev V.N., Tovstonog V.A. Teploobmen i teplovye ispytaniya materialov i konstruksiy aerokosmicheskoy tekhniki pri radiatsionnom nagreve [Heat Transfer and Thermal Tests of Aerospace Materials and Structures with Radiant Heating]. Moscow MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2014. 400 p.
- [9] Tovstonog V.A., Merzlikin V.G., Chirin K.V., Maksimov Yu.V., Merzlikina N.P. Izluchatel' teplovoy energii [Thermal Radiator]. Patent RF no. 2529894 on the application no. 2013123324 with priority of 22.05.2013. Registered on 11.08.2014.
- [10] Eliseev V.N., Tovstonog V.A., Borovkova T.V. On the Efficiency of Cooling Surfaces with Fins Containing Internal Heat Sources. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2014, no. 2, pp. 28–43 (in Russ.).
- [11] Eliseev V.N., Tovstonog V.A., Pavlova Ya.M. On the Problem of Increasing the Power Discharge Radiation Sources for Thermal Tests of Flying Vehicle Constructions. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2014, no. 4, pp. 131–135 (in Russ.).

- [12] Available at: [http://www.elektrosteklo.ru/Al2O3\\_rus.htm](http://www.elektrosteklo.ru/Al2O3_rus.htm) (accessed 05.08.2014).
- [13] Available at: <http://americas.kyocera.com/kicc/pdf/kyocera%20sapphire.pdf> (accessed 05.08.2014).
- [14] Available at: <http://www.dia-m.ru/page.php?pageid=30> (accessed 05.08.2014).
- [15] Available at: <http://www.optotl.ru/mat/Al2O3> (accessed 05.08.2014).
- [16] Lakhtin Yu.M., Leont'eva V.P. *Materialovedenie [Materials Science]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 528 p.
- [17] Available at: <http://www.stroitelstvo-new.ru/steklo/svoystva-2.shtml> (accessed 05.08.2014).
- [18] Available at: <http://techsteklo.ru/Optic.html> (accessed 05.08.2014).
- [19] Lunin B.S., Torbin S.N. Temperature Dependence of the Young's Modulus of Pure Quartz Glass. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 2: Khim.* [Moscow Univ. Chem. Bull.], 2000, vol. 41, no. 3, pp. 172–173 (in Russ.).
- [20] Kukhling Kh. *Spravochnik po fizike [A handbook of Physics]*. Moscow, Mir. Publ., 1985. 250 p.
- [21] Dobrovinskaya E.V., Litvinov L.A., Pishchik V.V. *Entsiklopediya sapphire*. [Encyclopedia of Sapphire]. Khar'kov, Institut Kristallografii Publ., 2004. 508 p.
- [22] Standard RF 25535–82. *Izdeliya iz stekla. Metody opredeleniya termicheskoy stoykosti [Articles Made of Glass. Methods for Thermal Stability Determination]*.
- [23] Kingeri U.D. *Vvedenie keramiku [Introduction to Ceramics]*. Moscow Stroyizdat Publ., 1969. 456 p.
- [24] Eliseev V.N., Tovstonog V.A. Characteristics of High Intensive Heat Radiation Sources and Systems. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2001, no. 4, pp. 3–32 (in Russ.).
- [25] Eliseev V.N. The Calculation of the Cylindrical Envelope Temperature of the Cooled Gas-Discharge Lamp. *Svetotekhnika [Light & Engineering]*, 1969, no. 3, pp. 6 (in Russ.).
- [26] M'о Tan. *Razrabotka metodicheskogo i algoritmicheskogo obespecheniya teplovykh ispytaniy materialov i elementov konstruksii v stendakh s gazorazryadnymi istochnikami izlucheniya [Development of Methodical and Algorithmic Support of Thermal Tests of Materials and Structural Elements on the Stands with Gas-Discharge Light Sources]*. Diss. kand. tekhn. nauk [Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2008.
- [27] Sergeev O.A., Men' A.A. *Teplofizicheskie svoystva poluprozrachnykh materialov [Thermal Properties of Translucent Materials.]*. Moscow, Izd. Standartov Publ., 1977. 288 p.
- [28] Available at: <http://www.crystals.saint-gobain.com/uploadedFiles/SG-Crystals/Documents/sapphire-material-products-properties.pdf> (accessed 05.08.2014).

Статья поступила в редакцию 24.04.2015

Елисеев Виктор Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области теплообмена в конструкциях летательных аппаратов. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Yeliseev V.N. — D.Sc. (Eng.), Professor Engineering Department of Spacecrafts and Launch Vehicles Bauman Moscow State Technical University, author of over 150 publications in the field of heat exchange in structures of flying vehicles. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Товстоног Валерий Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 140 научных работ в области исследования процессов теплопереноса в материалах специального назначения, тепловых и теплопрочностных испытаний материалов и конструкций. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Tovstonog V.A. — D.Sc. (Eng.), Professor Engineering Department of Spacecrafts and Launch Vehicles Bauman Moscow State Technical University, author of over 140 publications in the field of study of heat transfer processes in special-purpose materials, thermal and thermal structural tests of materials and constructions. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Павлова Ярослава Максимовна — студентка кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных работ в области проектирования и тепловых испытаний конструкций летательных аппаратов. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Pavlova Ya.M. — student Department of Spacecrafts and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University, author of three publications in the field of design and thermal tests of constructions of flying vehicles. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Елисеев В.Н., Товстоног В.А., Павлова Я.М. Анализ температурного состояния оболочки мощного газоразрядного источника излучения для тепловых испытаний конструкций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 4. С. 49–62.

**Please cite this article in English as:**

Eliseyev V.N., Tovstonog V.A., Pavlova Ya.M. Thermal regime analysis of the shell of the powerful gas-discharge emitting source for structure thermal testing. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 4, pp. 49–62.