

УДК 536.2

## К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ МОЩНОСТИ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

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

*Приведены результаты анализа теплового режима трубчатых оболочек водоохлаждаемых газоразрядных источников излучения, выполненных из кварцевого стекла и лейкосапфира. Показано, что в диапазоне электрической мощности источника излучения от 100 кВт и более температура внутренней поверхности горячей оболочки из лейкосапфира в 2–4 раза ниже температуры этой же поверхности кварцевой оболочки при прочих одинаковых условиях. Перепад температуры по толщине оболочки, выполненной из лейкосапфира, меньше перепада температуры по толщине оболочки из кварцевого стекла в 8 раз и более. Это обстоятельство может положительно отразиться на работоспособности оболочки из хрупкого материала с большим коэффициентом линейного расширения, каким является лейкосапфир.*

**Ключевые слова:** излучение, испытания, нагрев, кварц, лейкосапфир, конструкция, температура, летательные аппараты.

## ON THE PROBLEM OF INCREASING THE POWER DISCHARGE RADIATION SOURCES FOR THERMAL TESTS OF FLYING VEHICLE CONSTRUCTIONS

V.N. Yeliseev, V.A. Tovstonog, Y.M. Pavlova

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

e-mail: v.n.eliseev@gmail.com; tovstonv@mail.ru

*Analysis results of the thermal regime of the tubular shells (which formed from quartz glass and leucosapphire) of water-cooled gas-discharge radiation sources are given. It is shown that at electric power range within 100 kW or more for radiation source temperature of the inner surface of the hot leucosapphire shell is lower than 2–4 times as compared with the temperature of the same surface of a quartz shell under otherwise identical conditions. The differential temperature through the leucosapphire shell thickness, is less than 8 times or more as compared with the temperature drop over the thickness of the quartz glass shell. This circumstance may have a positive impact for operability of shell made of a brittle material such as leucosapphire with a large linear expansion coefficient.*

**Keywords:** radiation, tests, heating, quartz, leucosapphire, constructions, temperature, flying vehicle.

Проблема создания и экспериментальной отработки конструкций гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) широко обсуждается в научно-технической литературе [1–6]. Одной из самых острых составляющих этой проблемы является задача натуральных теплопрочностных испытаний элементов ГЛА в условиях, максимально приближенных к реальным. В процессе

полета с числами  $M \approx 10$  уровень температуры на кромках носовой части и воздухозаборника таких аппаратов достигает  $\sim 2400$  К. Обеспечить указанный уровень температур на установках радиационного нагрева способны нагреватели с плотностью падающего потока не менее  $2000$  кВт/м<sup>2</sup>.

В настоящее время потоки такой мощности для конструкции с большой поверхностью и в течение длительного времени могут быть реализованы при использовании водоохлаждаемых газоразрядных источников излучения (ГИИ), способных генерировать потоки плотностью до  $2000 \dots 2500$  кВт/м<sup>2</sup>. Однако ресурс таких источников ограничен временем работы  $10 \dots 15$  мин при мощности не более  $65$  кВт [7], а повышение мощности сильно сокращает ресурс.

Реальную возможность повышения мощности ГИИ с одновременным увеличением ресурса работы до десятков минут сулит применение в их конструкции новых материалов типа лейкосапфира. Сравнение его характеристик с характеристиками кварцевого стекла, применяемого сегодня для изготовления оболочек ГИИ, приведено в таблице [8].

Из приведенных в таблице данных следует, что лейкосапфир по сравнению с кварцевым стеклом имеет существенно большие теплопроводность и прозрачность и на порядок больший коэффициент линейного расширения.

Одним из важных параметров, позволяющих судить о работоспособности ГИИ повышенной мощности, является температурное состояние их оболочек.

#### Характеристики лейкосапфира и кварцевого стекла

Свойства	Лейкосапфир	Кварцевое стекло
Диапазон пропускания, мкм	0,17–5,5	0,16–3,5
Показатель преломления, $n$	1,75449	1,46
Потери отражения, %	14	7
Коэффициент поглощения, мм <sup>-1</sup>	0,00003	0,0035
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,97	2,2
Температура плавления, °С	2040	1473
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	27,21	1,38 (20 °С)
Коэффициент термического расширения, 1/К	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$0,54 \cdot 10^{-6}$

Из двух цилиндрических оболочек ГИИ, образующих его конструкцию, в наилучших условиях работает внутренняя (горячая) оболочка.

Далее приведены результаты анализа температурного состояния оболочек, выполненных из кварцевого стекла или лейкосапфира, в целях оценки перспективы его использования в конструкции водоохлаждаемых ГИИ большой мощности.

Для определения температуры внутренней (горячей) поверхности оболочки ГИИ  $T_1$  и ее внешней, охлаждаемой водой, поверхности  $T_2$  были использованы зависимости, приведенные в работе [6]:

$$T_1 = T_2 + (q_m + q_0 \xi) \frac{h}{\lambda}; \quad \xi = 1 - \frac{1 - e^{-Bu}}{Bu}; \quad T_2 = T_x + \frac{q_m + q_0(1 - e^{-Bu})}{\alpha_x},$$

а также следующие значения исходных данных:  $d_1 = 0,01$  м — внутренний диаметр внутренней оболочки;  $h = 0,001$  м — толщина оболочки;  $\delta = 0,003$  м — зазор в охлаждающем тракте;  $\dot{m} = 0,5$  кг/с — расход хладагента,  $T_x = 308$  К — его средняя температура;  $B = kh$  — критерий Бугера.

Плотность потока излучения на горячей поверхности оболочки  $q_0$  и потока, передаваемого ей путем теплопроводности и конвекции, определяли по формулам

$$q_0 = \frac{\eta(P)P}{F_{\text{внут}}}, \quad q_{\text{т}} = \frac{[1 - \eta(P)]P}{F_{\text{внут}}},$$

где  $F_{\text{внут}} = \pi d_1 l$  — площадь внутренней поверхности горячей оболочки;  $P$  — электрическая мощность ГИИ;  $l = 200$  мм — расстояние между электродами;  $\eta(P)$  — внутренний КПД ГИИ [6].

Результаты расчета температур на внутренней и внешней поверхностях горячих оболочек, выполненных из кварцевого стекла и лейкосапфира, приведены на рис. 1 и 2. На рис. 1 указаны также температуры плавления лейкосапфира  $T_{\text{л}}$  и кварца  $T_{\text{кв}}$ , а на рис. 2 — температура воды при давлении в тракте охлаждения ГИИ, равном 5 атм.

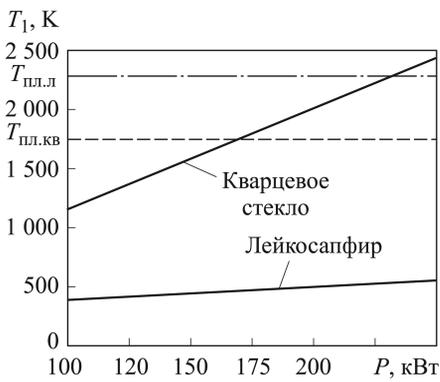
Характер зависимостей температуры внутренней поверхности горячей оболочки от мощности ГИИ (см. рис. 1) свидетельствует о том, что во всем исследованном диапазоне мощностей температура  $T_1$  лейкосапфировой оболочки оказывается в 2–4 раза меньше температуры оболочки из кварцевого стекла и намного меньше температуры плавления лейкосапфира. Температура  $T_1$  кварцевой оболочки достигает значения температуры плавления при мощности ГИИ  $\sim 170$  кВт. Экспериментальное же значение мощности, при которой происходит ее разрушение, меньше этого значения и составляет не более 120 кВт, а ресурс работы находится в интервале от 1 до 2 мин.

Температура внешней поверхности горячей оболочки из лейкосапфира  $T_2$  (рис. 2) также ниже температуры оболочки из кварца и в исследованном диапазоне мощностей не достигает температуры кипения воды.

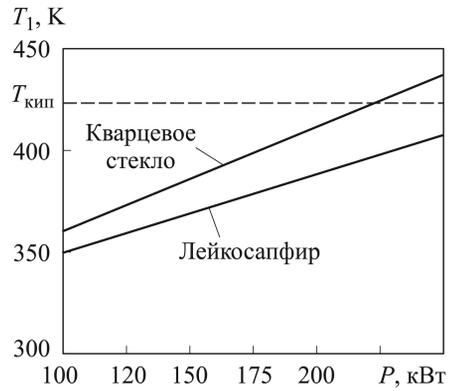
И, наконец, очень важным результатом анализа температурного состояния оболочек, выполненных из двух рассмотренных материалов, является то, что перепад температуры по толщине оболочки из лейкосапфира лежит в интервале от 50 до 110 градусов, а у оболочки из кварца — от 800 градусов и более.

**Выводы.** Проведен сравнительный анализ температурного состояния оболочек мощных водоохлаждаемых газоразрядных источников излучения, материалами которых служат кварцевое стекло и лейкосапфир. Показано, что в диапазоне изменения мощности ГИИ от 100 кВт и более при межэлектродном расстоянии 200 мм температура поверхности горячей оболочки, выполненной из лейкосапфира, в 2–4 раза меньше этой же температуры кварцевой оболочки при одинаковых режимах работы.

Перепад температуры по толщине оболочки из лейкосапфира в 8 раз и более меньше перепада температуры в оболочке из кварцевого стекла.



**Рис. 1. Зависимость температуры внутренней поверхности горячей оболочки из кварцевого стекла и лейкосапфира от мощности ГИИ**



**Рис. 2. Зависимость температуры внешней поверхности горячей оболочки из кварцевого стекла и лейкосапфира от мощности ГИИ**

Последний результат может оказать заметное положительное влияние на работоспособность оболочки из такого хрупкого материала с большим коэффициентом линейного расширения, каким является лейкосапфир.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лукашевич В.П., Труфакин В.А., Микоян С.А. Воздушно-орбитальная система “Спираль” / <http://www.buran.ru> (дата обращения 02.11.2013).
2. Microcraft / NASA X-43 Hyper-X / <http://airwar.ru/euc/xplame/X43.html> (дата обращения 02.11.2013).
3. Евстафьев М.Д. Долгий путь к “Буре”. М.: Вузовская книга. 1999. 58 с.
4. Полежаев Ю.В. Быть или не быть гиперзвуковому самолету? // ИФЖ. 2000. Т. 73. № 1. С. 5–10.
5. Железнякова А.Л., 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.
6. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Анализ технических возможностей создания высокоэффективных установок радиационного нагрева для тепловых испытаний аэрокосмической техники // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 1. С. 57–70.
7. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Характеристики источников излучения и излучательных систем высокоинтенсивного нагрева // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 4. С. 3–32.
8. Каталог оптической продукции ООО “Электростекло”. [http://www.elektrosteklo.ru/AL203\\_rus.htm](http://www.elektrosteklo.ru/AL203_rus.htm) (дата обращения 02.11.2013).

## REFERENCES

- [1] 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 02.11.13) (in Russ.).
- [2] Microcraft. NASA X-43 Hyper-X. Available at: <http://www.buran.ru> (accessed 02.11.13) (in Russ.).

- [3] Evstaf'ev M.D. Dolgiy put' k "Bure" [A long way toward "Burya"]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 1999. 58 p.
- [4] Polezhaev Yu.V. Be or not hypersonic aircraft? *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [J. Eng.Phys. Thermophys.], 2000, vol. 73, no. 1, pp. 5–10 (in Russ.).
- [5] Zheleznyakova A.L., Surzhikov S.T. Numerical simulation of hypersonic flow around model aircraft X-43. *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.).
- [6] Yeliseev V.N., Tovstonog V.A. Analysis of the technical possibilities of production facilities with high efficiency of radiation heating for thermal tests of aerospace engineering. *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.).
- [7] Yeliseev V.N., Tovstonog V.A. Characteristics of radiation sources and emitting systems of high-intensity heating. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2011, no. 4, pp. 3–32 (in Russ.).
- [8] Catalogue of optical products JCC "Elektrosteklo". Available at: [www.elektrosteklo.ru/AL203\\_rus.htm](http://www.elektrosteklo.ru/AL203_rus.htm) (accessed 02.11.13) (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 30.08.2013

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.

V.N. Yeliseev — Dr. Sci. (Eng.), professor of "Spacecrafts and Launch Vehicles" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of heat exchange in structures of flying vehicles.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya 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.

V.A. Tovstonog — Dr. Sci. (Eng.), professor of "Spacecrafts and Launch Vehicles" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 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, Vtoraya 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.

Y.M. Pavlova — student of "Spacecrafts and Launch Vehicles" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of three publications in the field of design and thermal tests of constructions of flying vehicle.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.