

УДК 621.18.062

Исследование возможности создания установки радиационного нагрева на основе инфракрасных направленных излучателей

В.С. Райлян, М.Ю. Русин, В.И. Фокин, А.В. Терехин, В.В. Антонов

АО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина»,
г. Обнинск, 249031, Россия

e-mail: ya.basil-ruivanov@ya.ru; info@technologiya.ru

DOI: 10.34759/tpt-2021-13-1-24-29

Поступила в редакцию 16.12.2019

После доработки 01.12.2020

Принята к публикации 08.12.2020

Проанализированы возможности увеличения температурного диапазона нагревательных установок на базе кварцевых галогенных ламп. Приведена оценка возможностей применения направленных излучателей в установках нагрева. Представлен опытный образец источника направленного излучения на основе галогенной лампы. Приведены результаты экспериментов, подтверждающие возможность достижения температуры объекта нагрева более 1600°C в воздушной среде.

Ключевые слова: высокотемпературный радиационный нагрев, направленные излучатели, кварцевые галогенные лампы, плотность теплового потока.

Введение

Непрерывное развитие ракетной техники сопровождается ростом скоростей и дальностей полета, что обуславливает рост аэродинамических нагрузок и длительность их воздействия на элементы ракеты.

Величины воздействующих факторов к настоящему времени возросли до таких значений, при которых долгое время использовавшиеся способы испытания не обеспечивают необходимый уровень тепловых и силовых нагрузок. Особенно это касается возможности проведения тепловых испытаний в воздушной среде.

В настоящее время установки нагрева на основе кварцевых галогенных ламп имеют ограничение по максимальной температуре применения. При температуре колбы выше 1200°C происходит процесс рекристаллизации кварца, что приводит к снижению его прозрачности, к перегреванию колбы и ее разрушению [1].

При этом альтернативы кварцевым галогенным лампам не существует по нескольким причинам:

– кварцевая галогенная лампа является высокоинтенсивным источником излучения с удельной плотностью излучения с единицы площади тела накала до 170 Вт/см²;

– лампа обладает малой инерционностью с возможностью простого регулирования мощности;

– возможность работы в воздушной среде.

Основной причиной, накладывающей ограничения на эксплуатационные возможности установок, является расположение ламп в непосредственной близости от объекта нагрева, фактически в зоне нагрева, что и приводит к перегреву колбы лампы. Одним из путей решения данной проблемы является разграничение ламп и объекта испытания, например кварцевым стеклом, и охлаждение колб ламп [2]. Однако и в этом случае максимальная достигаемая температура на образце ограничена 1600°C, что связано с диапазоном работы термоэлектрических преобразователей в воздушной среде.

Другим вариантом увеличения температурного диапазона нагрева является применение

источников направленного излучения (использование оптической схемы нагрева), удаленных от объекта испытания [3–5]. В этом случае не только исключается перегрев ламп, но и появляется возможность для дистанционного измерения температуры объекта средствами пирометрии, наблюдения за испытуемым объектом и контроля радиотехнических характеристик. Оптические схемы нагрева традиционно используются совместно с газоразрядными источниками излучения [5, 6], однако их применение ограничено вследствие сложной регулирующей аппаратуры и устройств водяного охлаждения колб ламп.

Целью данной работы является:

– определение возможностей радиационного нагрева (в части достижения температуры более 1600°C) направленными источниками излучения на основе галогенных ламп;

– отработка конструкции установок радиационного нагрева на основе направленных источников излучения.

Конструкция направленного излучателя

Предлагаемая схема источника излучения, включающего кварцевую галогенную лампу и зеркальный параболический отражатель, приведена на рис. 1.

Плотность теплового потока, излучаемого источником, можно оценить по формуле:

$$q \approx kP/S, \quad (1)$$

где q – плотность падающего теплового потока; P – мощность лампы; k – КПД отражателя, характеризующий охватываемый телесный угол; S – максимальная площадь поперечного сечения отражателя.

Под КПД отражателя в данном случае понимается отношение отраженного им (отражателем) в сторону объекта нагрева потока направленного излучения к полному потоку излучения от лампы. Это отношение равно отношению величины телесного угла, охватываемого параболическим отражателем, с вершиной в центре лампы к полному телесному углу, умноженному на коэффициент отражения отражателя. Исходя из геометрических параметров отражателя и лампы, коэффициент отражения отражателя $k \approx 0.5$; $S = 0.016 \text{ м}^2$. В итоге, для лампы мощностью 250 Вт получаем $q = 7.8 \text{ кВт/м}^2$.

Для оценки равновесной температуры (максимальная температура, достигаемая объектом

нагрева при полной мощности нагревателей в стационарном режиме) используем выражение:

$$Aq = \varepsilon\sigma T^4, \quad (2)$$

при условии, что тыльная поверхность образца теплоизолирована и потери тепла осуществляются излучением только наружной поверхности;

$$\text{при } A = \varepsilon \quad q = \sigma T^4, \quad (3)$$

где A – интегральный коэффициент поглощения объекта нагрева; ε – интегральный коэффициент излучения объекта; T – равновесная температура; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$ – постоянная Стефана–Больцмана.

Формула (2) отражает идеализированный теплообмен в состоянии равновесной (стационарной) температуры образца, когда теплообмен образца с окружающей средой происходит только излучением через наружную поверхность образца (остальные поверхности теплоизолированы). На образец падает поток от излучателей, и образец излучает в окружающую среду с наружной поверхности.

Таким образом, используя (3), для одного источника излучения равновесная температура составит $T = 609 \text{ К}$ (336°C).

Необходимо отметить, что распределение теплового потока от одного источника излучения будет далеко не равномерным по площади нагрева. Распределение будет иметь случайный характер вследствие несовершенства оптической системы источника излучения и погрешности юстировки. Использование большого количества источников излучения позволит как

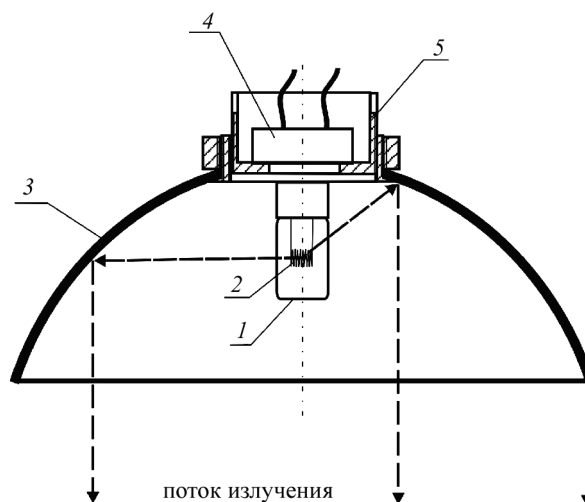


Рис. 1. Схема источника направленного излучения: 1 – лампа, 2 – тело накала, 3 – отражатель, 4 – патрон, 5 – приспособление для установки патрона и регулировки фокусировки

повысить значения плотности теплового потока, так и выровнять плотность теплового потока.

При использовании нескольких источников излучения формула (3) преобразуется к виду:

$$Nq = \sigma T^4, \quad (4)$$

где N – количество источников излучения.

Оценим количество источников излучения с лампой мощностью 250 Вт, необходимых для достижения равновесной температуры 1800°C (2073 К), используя (4):

$$N = \sigma T^4 / q = 134 \text{ шт.} \quad (5)$$

Экспериментальные исследования

Для экспериментальной отработки источников излучения и схемы нагрева была создана установка с несколькими источниками излучения, схема которой приведена на рис. 2. Особенностью конструкции является то, что источники излучения установлены на сферической поверхности. Таким образом обеспечивается направленность всех источников на объект нагрева.

В случае использования восьми источников излучения должны быть достигнуты следующие расчетные параметры нагрева при использовании ламп мощностью 250 Вт:

- плотность теплового потока $q_{\Sigma} = 62.4 \text{ кВт/м}^2$;
- равновесная температура $T = 1024 \text{ К (751}^\circ\text{C)}$.

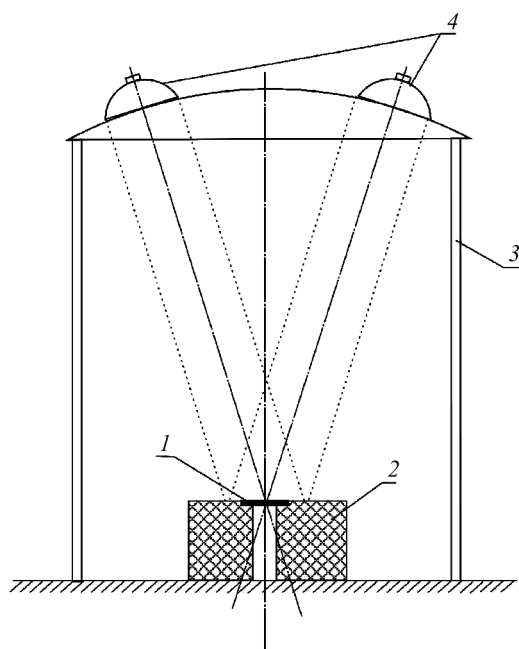


Рис. 2. Схема установки по отработке источников излучения: 1 – образец, 2 – блок теплоизоляции, 3 – каркас, 4 – лампы с отражателями

На рис. 3 приведена фотография изготовленного источника излучения, а на рис. 4 – фотография экспериментальной установки.

Для отработки источника излучения была выбрана лампа Osram 250 Вт. Данная лампа обладает достаточной для исследований мощностью при малом размере тела накала. Малый размер тела накала, приближенный к точечному, должен обеспечить близкий к коллимированному (параллельному) поток излучения.

Существуют также галогенные лампы с большей мощностью (1, 2 и 4 кВт), однако их размеры и размеры тела накала приводят к необходимости применения отражателей значительно больших размеров (диаметром не менее 400–500 мм). То же самое касается и дуговых ламп большой мощности.

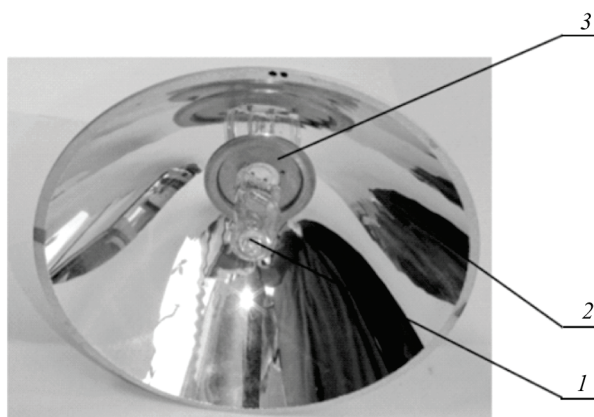


Рис. 3. Вид источника излучения: 1 – галогенная лампа, 2 – зеркальный отражатель, 3 – приспособление для установки лампы и фокусировки

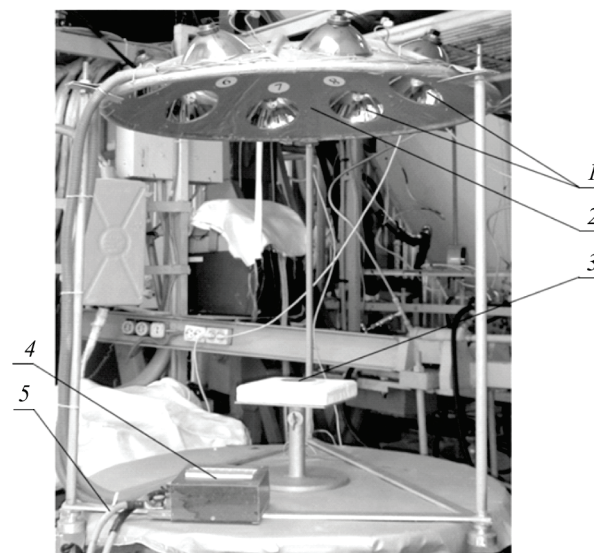


Рис. 4. Экспериментальная 8-ламповая установка нагрева: 1 – источники излучения; 2 – сферическая поверхность; 3 – образец; 4 – пульт управления; 5 – электрические шины

Для оценки фактических параметров падающего теплового излучения в качестве калориметрического датчика теплового потока был использован медный образец толщиной 1.3 мм с зачеканенной на тыльной поверхности термопарой. Образец с наружной стороны покрывался графитом.

Пренебрегая потерями тепла в начальный момент времени, плотность падающего на образец теплового потока можно оценить по формуле [6]

$$q = \frac{1}{A} c \rho h \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right)_{\max}, \quad (6)$$

где A – коэффициент поглощения; c – теплоемкость материала образца; ρ – удельная плотность материала; h – толщина образца; $\left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right)_{\max}$ – максимальный темп увеличения температуры образца (в начальный момент нагрева).

На рис. 5 приведены временные диаграммы изменения температуры образца при нагреве отдельно от каждого из восьми источников излучения.

Среднее значение плотности падающего теплового потока от каждого источника излучения составило $q_{\text{ср}} = 9 \pm 1.5$ кВт/м². Отклонение от среднего значения плотности потока не превышает 17%.

Были проведены измерения равновесной температуры образца при нагреве от разного количества источников излучения. За равновесную температуру принималась температура образца при выходе на стационарный режим.

На рис. 6 приведены зависимости измеренной равновесной температуры при количестве источников излучения от 1 до 8. На этом же рисунке приведена аппроксимирующая кривая, которая, согласно (4), должна быть пропорциональна $\sqrt[4]{N}$.

Из рисунка видно, что:

- равновесная температура от восьми источников излучения составила 820°C. При этом фактические значения температуры достаточно хорошо согласуются с аппроксимирующей кривой;

- для достижения температуры 1800°C необходимо около 110 ламп.

Для оценки возможностей увеличения плотности тепловых потоков были также опробованы лампы мощностью 1 кВт.

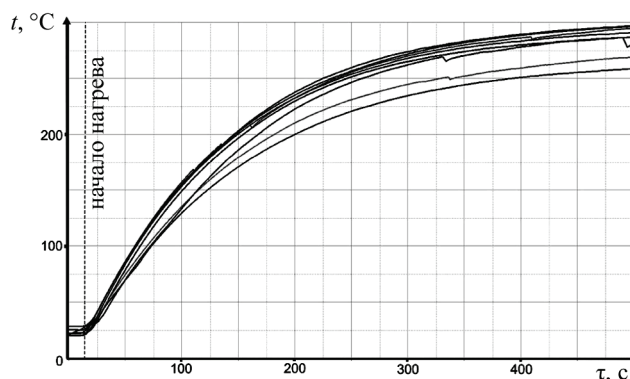


Рис. 5. Временные диаграммы изменения температуры при нагреве от каждого из восьми источников излучения

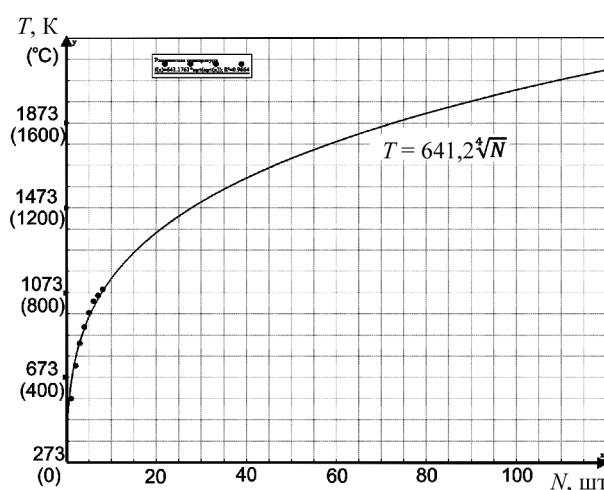


Рис. 6. График измеренных равновесных температур образца при нагреве разного количества источников излучения (показаны кружками) и аппроксимирующая кривая

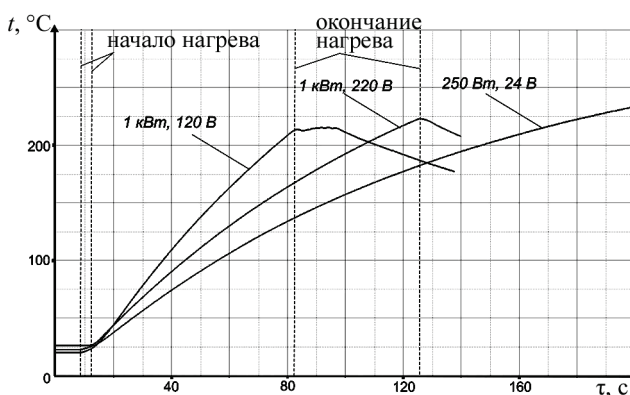


Рис. 7. График изменения температуры образца при нагреве источником излучения с различными лампами: 1 кВт, 120 В; 1 кВт, 220 В; 250 Вт, 24 В

Графики изменения температуры образца при нагреве источниками излучения с этими лампами и лампой мощностью 250 Вт (для сравнения) приведены на рис. 7.

Как видно из рис. 7, скорость роста температуры увеличилась при использовании ламп мощностью 1 кВт. Исходя из измеренных показаний плотность теплового потока составила:

- для лампы 1 кВт, 120 В – 16.5 кВт/м²;
- для лампы 1 кВт, 220 В – 12.2 кВт/м²;
- для сравнения лампа 250 Вт, 24 В – 9.4 кВт/м².

Однако было отмечено, что при использовании ламп мощностью 1 кВт наблюдается сильный нагрев приспособления для установки ламп.

Анализ результатов и выводы

1) Определенные экспериментально плотность теплового потока и равновесная температура подтверждают расчетные оценки. Экспериментальные оценки выше расчетных на 10–15%, и причиной этого, вероятно, является то, что поток излучения от источника является не параллельным, а сходящимся, со вторым фокусом, находящимся в районе образца.

2) Использование направленных источников излучения обеспечит нагрев образцов более 1600°C в воздушной среде. Для достижения 1800°C понадобятся лампы мощностью 250 Вт в количестве около 110–130 шт. Плотность падающего теплового потока при этом должна достигнуть ~1000 кВт/м².

Конструкция экспериментальной установки подходит в качестве прототипа для создания большой установки нагрева со 130 лампами. Размеры установки с таким количеством ламп составит (длина×ширина×высота) около 2.5×2.5×2.5 м. Максимальная потребляемая мощность – 32.5 кВт.

3) Использование ламп бóльшей мощности (1 кВт) обеспечивает бóльшую на 75% плот-

ность теплового потока от одного источника излучения. На столько же сокращается количество источников излучения для достижения необходимой температуры и плотности теплового потока. Однако необходимо проработать конструкцию источника излучения для снижения прогрева узла установки лампы.

4) Для создания работающей установки большой мощности необходимо проведение дополнительных работ:

- исследование покрытий с высоким коэффициентом поглощения, работающих при температурах более 1600°C;
- исследование средств пирометрии для измерения температуры объекта нагрева;
- исследование температурного поля на поверхности объекта нагрева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баранов А.Н.** Теплопрочностные испытания летательных аппаратов // Труды ЦАГИ. 1999. Вып. 2638. 101 с.
2. **Ильин Ю.С.** Устройство для испытания материалов при высоких температурах. Патент №2279052 Российская Федерация, 2004. 6 с.
3. **Полежаев Ю.В., Баранов А.Н. и др.** Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее. В 3 т. Т. 3. Экспериментальные исследования / Под ред. Ю.В. Полежаева, С.В. Резника. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 264 с.
4. **Ласло Т.** Оптические высокотемпературные печи. М.: Мир, 1968. 212 с.
5. **Полежаев Ю.В., Фролов Г.А.** Тепловое разрушение материалов. Киев: Академперіодика, 2006. 354 с.
6. **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. 396 с.
7. **Баранов А.Н., Белозеров Л.Г., Ильин Ю.С., Кутынов В.Ф.** Статические испытания на прочность сверхзвуковых самолетов. М.: Машиностроение. 1974. 344 с.

Investigation the possibility of creating a radiation heating facility based on infrared directional emitters

V.S. Railyan, M.Yu. Rusin, V.I. Fokin, A.V. Terehin, V.V. Antonov

*Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin,
Obninsk, 249031, Russia
e-mail: info@technologiya.ru*

The paper analyzes the possibilities of increasing the temperature range of heating installations based on quartz halogen lamps. One of the options for increasing the temperature range of heating is the use of directional radiation sources (using an optical heating scheme) remote from the test object. In this case, not only overheating of the lamps is excluded, but also there is an opportunity for remote measurement of the object temperature by means of pyrometry. A sche-

ma of a directional radiation source based on a halogen lamp is presented. The directional radiation source contains a quartz halogen lamp, a mirror parabolic reflector and a lamp cartridge with a focusing adjustment mechanism. Estimated calculations show that using a 250 W lamp, the heat flux density from the source will be 7.8 kW/m². The temperature of the heating object is 336°C. When using eight sources of radiation density of a heat flux will be 62.4 kW/m², and the maximum temperature – 751°C. It is shown that at least 134 sources are needed to reach the temperature of the heating object 1800°C. For experimental testing, a directional radiation source and a device with several radiation sources installed on it were created. The design feature of the device is that the radiation sources are installed on a spherical surface, due to which the directivity of all sources to heating object is ensured. An experiment scheme was assembled, including a heating object in the form of a copper plate with a coating with a high degree of blackness applied to the outer surface. The other surfaces of the plate were heat insulated. A thermocouple was installed on the rear surface of the plate. Experimental studies have been carried out with heating of the sample with one and eight radiation sources with a 250 W lamp. The maximum temperature of the sample when heated by one radiation source was from 260 to 295°C, by eight radiation sources – 820°C. The heat flux density calculated on the basis of the sample temperature change diagram from one radiation source was 9±1.5 kW/m², from eight – 62 kW/m². The results of the experiments confirm the calculated values of heat flux density and equilibrium temperature achieved using one and eight radiation sources. This suggests that temperatures above 1600°C in the air can be reached.

Keywords: high-temperature infrared heating, directed emitters, quartz halogen lamps, heat flux density.

REFERENCES

1. **Baranov A.N.** *Teploprochnostnye ispytaniya letatel'nykh apparatov* [Thermal strength tests of aircraft]. *Proceedings of Central Aerohydrodynamic Institute*, 1999, is. 2638. 101 p. In Russ.
2. **Ilyin Yu.S.** *Ustrojstvo dlya ispytaniya materialov pri vysokikh temperaturakh* [Device for testing materials at high temperatures]. Patent RF, no. 2 279 052, 2004. 6 p.
3. **Materialy i pokrytiya v ekstremal'nykh usloviyakh. V 3 t.**, Red Yu.V. Polezhaev and S.V. Reznik [Materials and coatings in extreme conditions. In 3 volumes. Eds. Yu.V. Polezhaev and S.V. Reznik]. T. 3. Yu.V. Polezhaev, A.N. Baranov et al. *Eksperimental'nye issledovaniya* [Experimental research]. Moscow: Publ. house of N.E. Bauman Moscow State Technical University, 2002. 264 p. In Russ.
4. **Laszlo T.S.** *Image furnace techniques*, 1965. 195 p. (Russ. ed.: Laszlo T. Optical high-temperature furnaces. Moscow: Mir, 1968. 212 p.)
5. **Polezhaev Yu.V., Frolov G.A.** *Teplovoe razrushenie materialov* [Thermal destruction of materials]. Kiev: Akadempriodika, 2006. 354 p. In Russ.
6. **Eliseev V.N., Tovstonog V.A.** *Teploobmen i teplovye ispytaniya materialov i konstruktivnykh aerokosmicheskoy tekhniki pri radiatsionnom nagreve* [Heat transfer and thermal testing of materials and structures of aerospace technology under radiation heating]. Moscow: Publ. house of N.E. Bauman Moscow State Technical University, 2014. 396 p. In Russ.
7. **Baranov A.N., Belozarov L.G., Ilyin Yu.S., Kutinov V.F.** *Sticheskie ispytaniya na prochnost' sverkhzvukovykh samoletov* [Static strength tests of supersonic aircraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1974. 344 p. In Russ.