

УДК 536.331

Разработка установки концентрированного радиационного нагрева для испытаний образцов высокотемпературных композиционных материалов

М.В. Худорожко, П.В. Просунцов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Development of a concentrated radiation heating facility for testing the high-temperature composite materials

M.V. Khudorozhko, P.V. Prosuntsov

Bauman Moscow State Technical University

Современные летательные аппараты в процессе эксплуатации подвергаются воздействию значительных тепловых нагрузок. Их невозможно создать без экспериментальной отработки теплозащитных материалов и элементов конструкций, для проведения которой необходимы стенды тепловых испытаний. Разработан вариант конструктивно-компоновочной схемы установки радиационного нагрева, работающей по принципу концентрации излучения от большого количества (до 300) серийных шаровых галогенных ламп. В качестве источника излучения предложено использовать серийно выпускаемые шаровые галогенные лампы фирмы OSRAM. Для определения проектных параметров установки разработана методика, основанная на решении геометрической задачи оптимизации. По результатам применения методики показано, что установка, использующая лампы со штатным отражателем, вследствие их малого фокусного расстояния неспособна обеспечить на поверхности образца диаметром 75 мм тепловой поток более $4 \cdot 10^5$ Вт/м². В целях повышения уровня падающего потока излучения рассмотрен вариант установки, оснащенной отражателями со значительно большим фокусным расстоянием, с помощью которых на образце диаметром 100 мм достигается тепловой поток $10 \cdot 10^5$ Вт/м².

EDN: XAEMLG, <https://elibrary/xaemlg>

Ключевые слова: высокотемпературные композиционные материалы, галогенная лампа, стенд радиационного нагрева, источник концентрированного излучения, эллиптический отражатель, моделирование радиационного теплообмена

Modern aircraft are exposed to significant thermal loads in operation. It is impossible to create them without experimental testing of the heat-protective materials and design elements, which requires the thermal testing benches. The paper provides a design and layout option of the radiation heating facility that operates on the principle of concentrating radiation from a large number (up to 300) of the serial halogen ball lamps. It proposes to use the serially produced OSRAM halogen ball lamps as the radiation source. A technique based on solving the geometric optimization problem was developed to determine the facility design parameters. Results of applying the technique show that a facility using lamps with the standard reflector due to their small focal length is unable to provide a heat flux

of more than $4 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ on the surface of a sample with the diameter of 75 mm. In order to increase the incident radiation flux level, the paper considers an option of the facility equipped with reflectors having a significantly larger focal length. Using them makes it possible to achieve the incident heat flux of $10 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ on a sample with the diameter of 100 mm.

EDN: XAEMLG, <https://elibrary/xaemlg>

Keywords: high-temperature composite materials, halogen lamp, radiation heating bench, concentrated radiation source, elliptical reflector, radiation heat exchange simulation

Элементы изделий авиационной и ракетно-космической техники подвергаются воздействию высокоэнтальпийного потока воздуха, под действием которого их поверхность нагревается до температуры, превышающей 2000 K [1]. Для создания наиболее теплонагруженных элементов конструкции летательных аппаратов применяют такие высокотемпературные композиционные материалы, как кварцевая керамика SiO_2 [2], алюмооксидная керамика Al_2O_3 [3] и керамоматричные материалы на основе карбида кремния SiC [4].

Также существует перспективная ультравысокая керамика (Ultra-High Temperature Ceramic — УНТС), рабочая температура которой может превышать 3000 K [5]. Конструкцию подобного рода нельзя создать без масштабной экспериментальной отработки, для чего требуется соответствующая техническая и испытательная база. На сегодняшний день для испытания образцов и элементов конструкций из керамических материалов разработана достаточно широкая гамма установок газодинамического и радиационного нагрева [6].

Наибольшее распространение среди установок газодинамического нагрева получили плазмотроны. Их основные достоинства — высокая температура нагрева образца (до 4000 K) и возможность имитации термохимического воздействия набегающего потока газа [7].

Главными недостатками плазмотронов, по мнению экспериментаторов, являются малые размеры образца (до 30 мм) и существенные трудности при регистрации температуры по его толщине. Последнее связано с использованием металлических термопар, принцип работы которых основан на эффекте Зеебека, вследствие чего электромагнитное поле плазмотрона создает высокий уровень помех при измерениях. Применение защитного металлического кожуха для термопар приводит к искажению температурного поля в образце и, соответственно, вносит существенные погрешности в результаты измерений. К недо-

статкам плазмотронов также следует отнести высокую стоимость испытаний, что делает проблематичным проведение большой серии экспериментов.

Среди стенов радиационного нагрева можно выделить установки на основе трубчатых газоразрядных ламп, например «УТРО-1». Максимальная температура нагрева поверхности образца размером до 200 мм может достигать 2300 K [8]. Однако для работы газоразрядных ламп требуются сложное и дорогое пусковое устройство и система водяного охлаждения колб ламп, а энергопотребление установки превышает 400 кВт.

Существуют установки с трубчатыми галогенными лампами, например «УТРО-6» [9]. Температура нагрева поверхности образца размером до 200 мм не превышает 2000 K [10]. Однако, как показывают расчеты и опыт эксплуатации, установки данного типа работают практически на пределе возможностей, так как дальнейшее увеличение мощности приводит к перегреву колб ламп с последующим выходом из строя.

Среди достоинств установок радиационного нагрева можно выделить относительно низкие затраты на испытания, возможность регулирования падающего потока во времени, достаточно большие размеры образцов и удобство проведения измерений температуры в образце.

Общим недостатком установок радиационного нагрева является невозможность воспроизведения термохимического воздействия набегающего потока газа.

Концепция установки концентрированного радиационного нагрева. Для дальнейшего повышения рабочей температуры на поверхности испытываемого образца материалов можно воспользоваться принципом концентрации излучения. На сегодняшний день этот принцип задействован в установке «УРАН-1», где температура образца может достигать до 2800 K, однако диаметр нагреваемой области составляет 15 мм,

что ограничивает ее использование [11]. Увеличить размер нагреваемой поверхности при одновременном повышении ее температуры можно применением множества источников излучения. В качестве последних предлагается использовать относительно маломощные (150...400 Вт) шаровые галогенные лампы с зеркальным отражателем.

Достоинствами такого технического решения являются:

- относительно низкая стоимость ламп и отражателей;
- наличие серийного производства ламп и отражателей;
- низкая тепловая инерционность источников, что позволяет создавать переменные во времени тепловые нагрузки на испытуемый объект;
- способность к масштабированию установок по размерам испытуемого объекта и к распределению падающего теплового потока;
- потенциальная возможность испытания не только образцов материалов, но и конструктивных элементов летательных аппаратов;
- отсутствие перегрева источников излучения, что позволяет проводить испытания неограниченное время.

Однако до сих пор не разработана ни методика моделирования полей температуры и излучения в рабочих зонах установок подобного типа, ни методика их проектирования.

Цель работы — расширение температурного диапазона испытаний высокотемпературных композиционных материалов за счет использования установок концентрированного радиационного нагрева, разработанных с помощью современных алгоритмов численного моделирования и глобальной оптимизации.

Моделирование тепловых процессов в рабочей зоне установки. Теоретической основой для описания тепловых процессов в рабочей зоне установки являются физические модели переноса энергии в системе излучающих, отражающих и поглощающих поверхностей. При моделировании радиационного теплообмена в рабочей зоне установки приняты следующие допущения:

- решение задачи — в серой постановке;
- поверхность испытуемого объекта — абсолютно черная;
- отражатель лампы — полностью зеркальный;

- поверхность источника излучения — диффузная;

- спираль лампы — тонкостенный цилиндр (что позволяет определить влияние геометрических размеров источника без учета самооблучения);

- собственное излучение колбы спирали, испытуемого объекта и отражателя отсутствует, так как оно пренебрежимо мало по сравнению с излучением спирали.

Для решения задачи переноса излучения в рабочей зоне установки использованы модель прямолинейного переноса излучения в соответствии с уравнениями геометрической оптики (Ray tracing method) и модель радиационного теплообмена в системе диффузно отражающих тел. Уравнения для геометрической оптики запишем как

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{q}}{dt} &= \frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{k}}; \\ \frac{d\mathbf{k}}{dt} &= -\frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{q}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{q} — вектор положения луча в пространстве, м; t — время, с; ω — циклическая частота электромагнитной волны, рад/с; \mathbf{k} — волновой вектор, рад/м.

Система (1) имеет вид уравнений Гамильтона, где ω — аналог функции Гамильтона H , \mathbf{k} — аналог обобщенного импульса, а \mathbf{q} — вектор обобщенных координат. Циклическая частота электромагнитной волны и волновой вектор связаны известным соотношением

$$\omega = \frac{c|\mathbf{k}|}{n(\mathbf{q})},$$

где c — скорость света в вакууме, м/с, n — показатель преломления среды.

В воздушной среде, где коэффициент преломления является постоянной величиной, система уравнения (1) принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{q}}{dt} &= \frac{c\mathbf{k}}{n|\mathbf{k}|}; \\ \frac{d\mathbf{k}}{dt} &= 0. \end{aligned}$$

Эта система уравнений состоит из шести линейных дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих перемещение луча в пространстве.

Математическую модель радиационно-кондуктивного теплообмена в системе испытуемый объект — нагреватель представим как [12]

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v; \\ E_{\text{пад } i} &= \sum_{j=1}^m \Phi_{ij} E_{\text{соб } j}; \\ E_{\text{исх } i} &= E_{\text{соб } i} + (r_{\text{диф } i} + r_{\text{зер } i}) \sum_{j=1}^m \Phi_{ij} E_{\text{соб } j}; \\ E_{\text{рез } i} &= \epsilon_i \sigma_0 \sum_{j=1}^m \epsilon_j \Phi_{ij} (T_j^4 - T_i^4), \end{aligned} \quad (2)$$

где ρ — плотность образца, кг/м³; C_p — удельная теплоемкость образца, Дж/(кг·К); T — температура образца, К; λ_x , λ_y и λ_z — теплопроводность образца в направлении оси x , y и z соответственно, Вт/(м·К); q_v — мощность объемных источников, Вт/м³; $E_{\text{пад } i}$ — плотность теплового потока, падающего на i -ю поверхность излучения в системе, Вт/м²; $E_{\text{исх } i}$ — исходящая плотность теплового потока излучения от i -й поверхности, Вт/м²; $E_{\text{соб } i}$ и $E_{\text{соб } j}$ — собственные плотности теплового потока излучения i -й и j -й поверхностей, Вт/м²; $E_{\text{рез } i}$ — результирующая плотность теплового потока излучения на i -ю поверхность, Вт/м²; i и j — номера излучающей и облучаемой поверхностей в системе; m — общее количество поверхностей в системе; Φ_{ij} — разрешающий коэффициент видимости; $r_{\text{диф } i}$ и $r_{\text{зер } i}$ — коэффициенты диффузного и зеркального отражения; ϵ_i и ϵ_j — степень черноты поверхностей; σ_0 — константа Стефана — Больцмана, Вт/(м²·К⁴); T_i и T_j — температуры излучающей и облучаемой поверхностей, К.

Математическая модель геометрической оптики менее требовательна к вычислительным ресурсам, поэтому ее можно использовать для проектных расчетов. Модель радиационного теплообмена требует значительно больше вычислительных мощностей, однако с теоретической точки зрения является более строгой.

Методика выбора параметров конструктивно-компоновочной схемы установки концентрированного радиационного нагрева. Разработана методика, основанную на решении геометрической задачи оптимизации. Решим задачу обеспечения максимального значения плотности потока на образце при минимальном количестве источников излучения с учетом ограничений:

$$\begin{aligned} \max_{x \in X} Q(\mathbf{x}); \\ \min_{x \in X} N(\mathbf{x}); \\ G(\mathbf{x}) \leq 0, \end{aligned}$$

где Q — среднее значение плотности падающего теплового потока излучения, Вт/м²; N — количество источников излучения; G — функция выражающая ограничения; \mathbf{x} — вектор проектных параметров.

Данная формулировка представляет собой многокритериальную задачу оптимизации. Как правило, такие задачи имеют некоторое множество решений — оптимальных конфигураций установки. Итоговую конфигурацию конструкции выбирают путем учета дополнительных требований, например энергетических или технологических. В общем случае проектные параметры — координаты расположения каждой отдельной лампы. Анализ показывает, что для достижения среднего значения плотности падающего теплового потока 50 Вт/см² на образце диаметром 100 мм при мощности источника излучения 250 Вт требуется более 50 ламп, тогда количество проектных переменных будет превышать 150 шт.

Чтобы уменьшить количество проектных параметров, задачу можно ограничить рассмотрением вариантов с радиальной симметрией. В этом случае лампы должны располагаться на некоторых уровнях, имеющих форму окружности. Каждый такой уровень можно определить с помощью двух параметров, в качестве которых использованы расстояния от центра образца до ламп на i -м уровне R_i и угол наклона данного вектора относительно нормали образца θ_i (рис. 1). Тогда количество проектных параметров будет равно $2k$, что меньше предыдущего значения более чем в 10 раз.

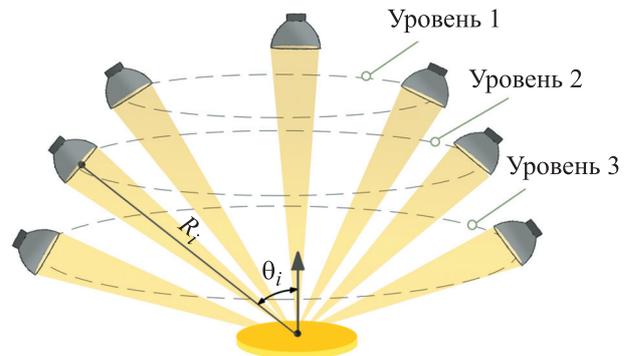


Рис. 1. Расчетная схема установки

В качестве ограничения выступает условие отсутствия пересечений между отдельными лампами. В первом приближении это ограничение можно сформулировать как отсутствие пересечений между телесными углами ламп соседних уровней. Тогда условие отсутствия пересечений между отдельными уровнями можно записать как

$$\theta_i - \arctg\left(\frac{D}{2R_i}\right) < \theta_{i+1} - \arctg\left(\frac{D}{2R_{i+1}}\right),$$

где D — диаметр отражателя, м.

Это условие будет верным, если значения углов отсортированы по возрастанию:

$$\theta_1 < \dots < \theta_i < \dots < \theta_k.$$

Приблизленно среднее значение плотности падающего теплового потока

$$Q(R, \theta) = \sum_{i=1}^k q(R_i) \cos \theta_i n(R_i, \theta_i),$$

где q — среднее значение плотности потока от единичной лампы, Вт/м²; n — количество ламп на уровне.

Функция q определяется параметрами источника излучения с отражателем и является уникальной для каждой конкретной конфигурации.

Количество ламп $n(R_i, \theta_i)$ можно определить из следующих рассуждений: чтобы их колбы в пределах одного уровня не пересекались, они должны лежать на гранях многоугольника, имеющих длину D , описанного вокруг окружности соответствующего уровня (рис. 2). Строго говоря, это условие является приближенным, но в большинстве случаев выполняется с запасом. Угол на уровне для одной лампы определяется выражением

$$\varphi = \frac{2\pi}{n} = 2\arctg \frac{D}{2R_i \sin \theta_i}.$$

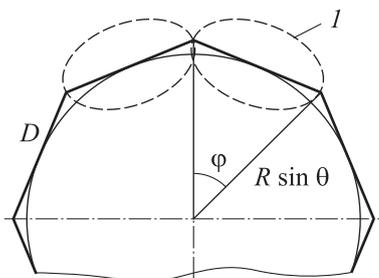


Рис. 2. Геометрическая схема расположения ламп на уровне:

I — проекция сечения по диаметру лампы

Тогда количество граней и ламп можно вычислить как

$$n(R_i, \theta_i) = \frac{\pi}{\arctg \frac{D}{2R_i \sin \theta_i}}.$$

Так как n дискретная величина, значение падающего потока $Q(R, \theta)$ также является дискретной функцией. Общее количество ламп в установке есть сумма ламп на каждом из уровней:

$$N(R, \theta) = \sum_{i=1}^k n(R_i, \theta_i).$$

Таким образом, необходимо решить нелинейную многокритериальную задачу оптимизации, в которой критерии имеют разрывы или дискретны. Функция, задающая ограничения также нелинейна, а функция $Q(R, \theta)$ многоэкстремальна, что видно на рис. 3.

Поставленную задачу оптимизации решали численно с использованием генетического алгоритма в программном комплексе MATLAB

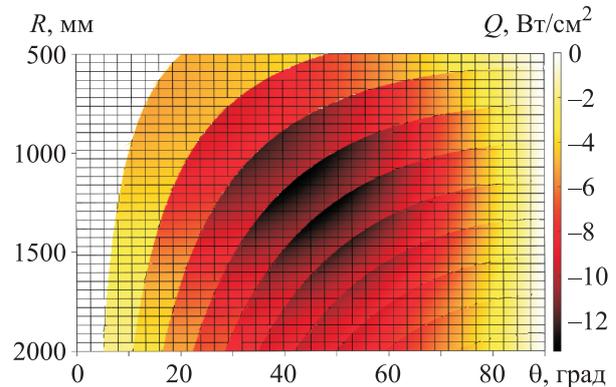


Рис. 3. Поверхность функции $Q(R, \theta)$ при числе уровней $k = 1$

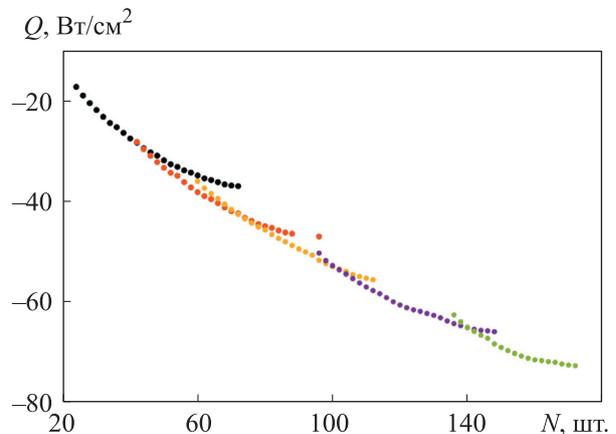


Рис. 4. Линия Парето при числе уровней $k = 3$ (•), 4 (•), 5 (•), 6 (•) и 7 (•)

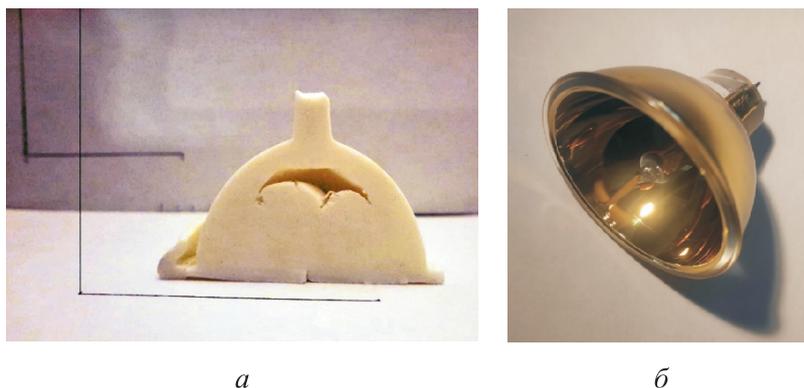


Рис. 5. Внешний вид силиконового слепка отражателя (а) и шаровой галогенной лампы (б)

[13]. Генетический алгоритм позволяет находить глобальный экстремум функции, а также не имеет ограничений на непрерывность функции. Так как задача бикритериальная, ее решением стала линия Парето в пространстве оптимизируемых критериев (рис. 4).

Видно, что установки с оптимальной конфигурацией будут находиться на нижней границе совокупного множества точек. Таким образом, полученная зависимость позволяет определять максимально возможное среднее значение плотности падающего теплового потока с учетом дополнительных накладываемых при производстве ограничений, которые напрямую зависят от количества ламп в установке.

Использование методики для разработки конструктивно-компоновочных схем установок разного типа. На сегодняшний день наиболее широкую гамму шаровых галогенных ламп предлагает немецкая фирма OSRAM [14]. Лампы выпускаются в двух вариантах: низко- и высоковольтные. Для исследования выбраны низковольтные лампы, так как их спирали близки по форме к точечному источнику, и их можно приобрести со штатным отражателем (рис. 5).

В качестве источника излучения выступала шаровая галогенная лампа OSRAM 64635 HLX мощностью 150 Вт со штатным отражателем с золотым напылением диаметром 50 мм. Так как производитель не оставил информации о геометрических размерах формы отражателя, для определения указанных параметров были изготовлены силиконовые модели, повторяющие контур внутренней поверхности отражателя (рис. 5, а), с которых снималась кривая формы рефлектора. С помощью аппроксимации (рис. б) определены размеры полуосей эллипса —

координаты x и y , что позволило построить цифровую модель лампы.

На первом этапе исследована установка № 1 для нагрева образца цилиндрической формы диаметром 75 мм, конструктивно-компоновочная схема рабочей зоны которой показана на рис. 7, а. В результате применения предложенной методики с последующим конечно-элементным расчетом в программном комплексе COMSOL Multiphysics 6.1 [15] удалось достичь среднего значения плотности падающего теплового потока 40 Вт/см^2 (рис. 7, б).

Основные параметры установки № 1 приведены в таблице, где КПД — коэффициент полезного действия. Средняя радиационно-равновесная температура образца составляла около 1600 К.

Среди достоинств установки № 1 можно выделить низкое энергопотребление, что позволяет использовать питание от обычной сети, малые габаритные размеры, относительно низкую стоимость и отсутствие требований по охлаждению. К недостаткам следует отнести слож-

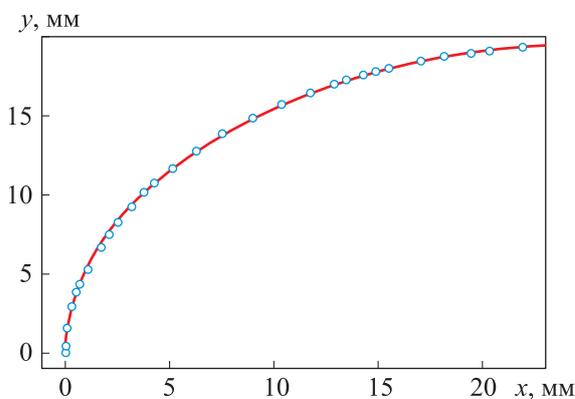


Рис. 6. Результаты аппроксимации формы рефлектора:
 ○ — данные обмера слепка;
 — — аппроксимирующая кривая

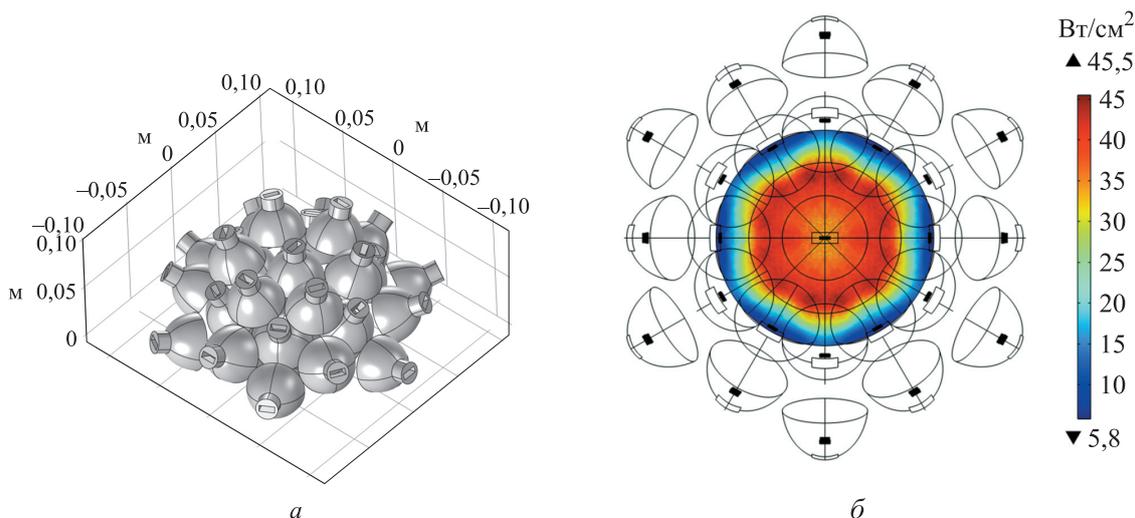


Рис. 7. Результаты исследования установки № 1:
 а — конструктивно-компоновочная схема ее рабочей зоны;
 б — распределение плотности падающего потока, Вт/см², по поверхности образца

Основные параметры установок

Номер установки	Количество ламп, шт.	Габаритные размеры, мм	Потребляемая мощность, Вт	КПД, %
1	25	250×250×150	3750	45
2	54	5000×5000×3000	108 000	6
3	256	1800×1800×1200	66 000	15

ность использования пирометра для контроля температуры образцов и их малый диаметр.

Указанные параметры установки № 1 при использовании ламп со штатным отражателем являются практически предельными, и дальнейшее повышение плотности падающего теплового потока не представляется возможным. Основная причина — малое фокусное расстояние отражателя, составляющее всего 21 мм.

Для дальнейшего повышения уровня плотности падающего теплового потока требуются отражатели, обладающие значительно большим фокусным расстоянием. В качестве таковых можно использовать серийные отражатели производства «ОНПП Технология» с фокусным расстоянием более 2 м [16].

На втором этапе исследована установка № 2 с эллиптическими отражателями диаметром 800 мм и шаровыми галогенными лампами ЛИСМА КГМ 220-2000 мощностью 2000 Вт. Особенностью таких ламп является номинальное напряжение 220 В, что позволяет получать энергию от сети общего назначения.

Конструктивно-компоновочная схема рабочей зоны установки № 2 приведена на рис. 8, а, а основные параметры — в таблице. Среднее

значение плотности падающего теплового потока на образце диаметром 100 мм составляло 75 Вт/см² (рис. 8, б), средняя радиационно-равновесная температура для такого потока — 1900 К. Для шаровых галогенных ламп ЛИСМА КГМ 220-2000 оптимальным является расположение ламп в виде полусферы с радиусом, равным фокусному расстоянию отражателя 3 м.

Среди недостатков следует выделить большие габаритные размеры и относительно низкий КПД, на значение которого существенно влияет соотношение размеров спирали и отражателя. Чем ближе источник излучения к точке, тем больше КПД единичной лампы, а значит, и установки в целом.

На третьем этапе исследована установка № 3 с отражателями эллиптической формы диаметром 150 мм и шаровыми галогенными лампами OSRAM 64652 HLX мощностью 250 Вт. Основные параметры установки № 3 приведены в таблице. С помощью предложенной методики определены параметры конструктивно-компоновочной схемы установки № 3 (рис. 9), позволяющей создать на образце диаметром 100 мм среднее значение плотности падающего теплового потока 100 Вт/см². Средняя радиаци-

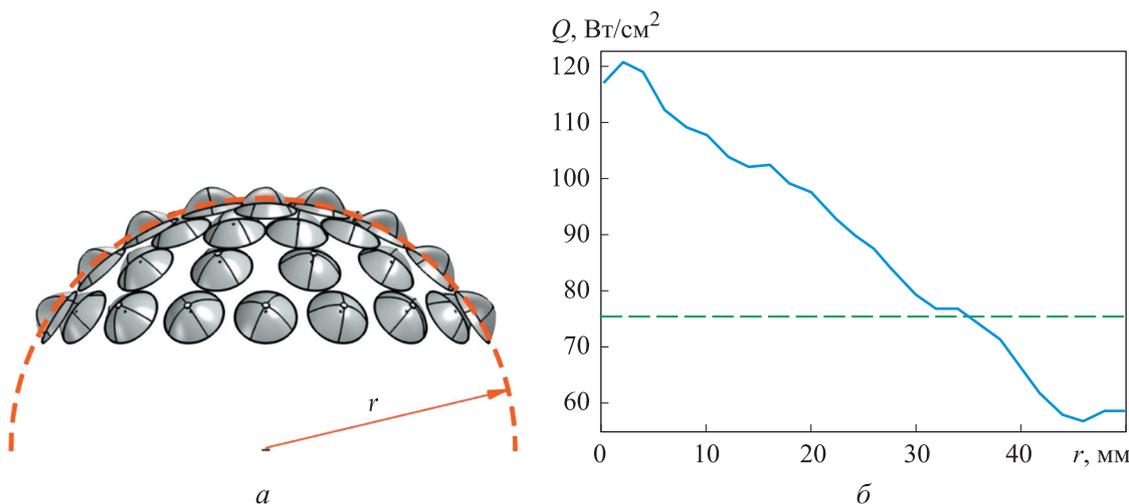


Рис. 8. Результаты исследования установки № 2:
 а — конструктивно-компоновочная схема ее рабочей зоны;
 б — распределение плотности падающего теплового потока Q , Вт/см², по радиусу образца r (— результаты расчета по уравнениям (1); — — среднее значение плотности падающего теплового потока)

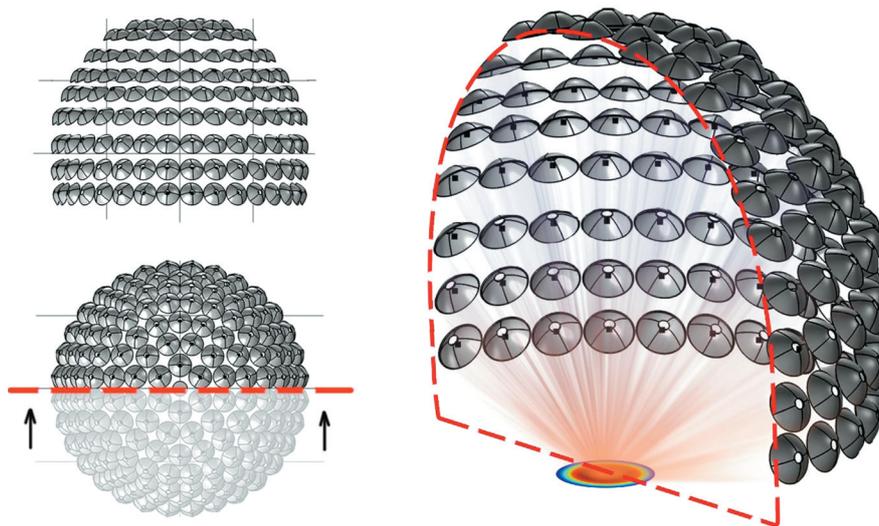


Рис. 9. Конструктивно-компоновочная схема рабочей зоны установки № 3

онно-равновесная температура, соответствующая такому тепловому потоку, составляла около 2100 К.

Анализ результатов расчета показал, что оптимальную конфигурацию рабочей зоны установки № 3 можно представить в виде комбинации полусферы и цилиндра, на поверхности которых расположены верхние и нижние уровни ламп соответственно.

Среди основных достоинств установки № 3 можно выделить приемлемый КПД, отсутствие системы охлаждения, способность к масштабированию по размерам испытуемого объекта и уровню падающего теплового потока. Как и две другие установки радиационного нагрева, уста-

новка № 3 позволяет достичь температуры образца более 2000 К, но не требует при этом системы охлаждения и потребляет примерно в 2 раза меньше электрической энергии.

Для сравнения проведены расчеты распределения плотности падающего теплового потока по радиусу образца для установки № 3 с использованием уравнений геометрической оптики (1) и уравнений радиационно-кондуктивного теплообмена (2). Полученные результаты приведены на рис. 10.

Видно, что при расчете по уравнениям геометрической оптики (1) среднее значение плотности падающего теплового потока составляет 101 Вт/см². Более строгий расчет с использова-

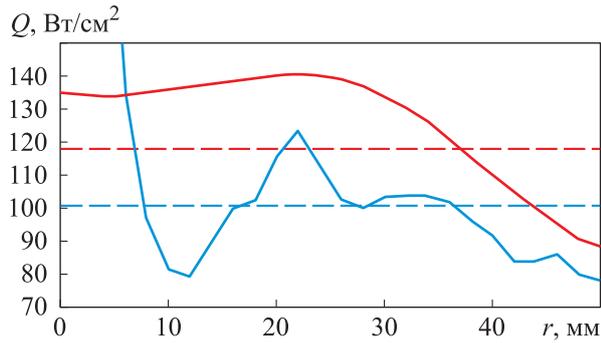


Рис. 10. Распределения плотности падающего теплового потока Q по радиусу образца r для установки № 3:
 — и — результаты расчета по уравнению (1) и среднее значение по ним;
 — и — результаты расчета по уравнению (2) и среднее значение по ним

нием уравнений радиационно-кондуктивного теплообмена (2) показал более равномерное распределение со средним значением плотности падающего теплового потока 118 Вт/см^2 . Таким образом, можно ожидать, что реальное значение плотности падающего теплового потока будет больше, чем при проектном расчете.

Выводы

1. Предложена методика выбора параметров конструктивно-компоновочной схемы установки радиационного нагрева с использованием множества источников концентрированного излучения на основе решения геометрической бикритериальной задачи оптимизации. Резуль-

татом применения методики стала линия Парето, показывающая зависимость среднего значения плотности падающего теплового потока от количества используемых ламп.

2. По предложенной методике определены параметры конструктивно-компоновочной схемы установки радиационного нагрева с использованием шаровых галогенных ламп со штатным отражателем OSRAM 64635 HLX. Показано, что установка на основе таких ламп позволяет достичь на образце диаметром 75 мм среднего значения падающего теплового потока 40 Вт/см^2 с использованием двадцати пяти источников излучения общей мощностью 3750 Вт . Такой вариант установки предназначен для лабораторного использования с питанием от сети общего назначения и не требует систем охлаждения.

3. На основе предложенной методики определены параметры конструктивно-компоновочной схемы установки радиационного нагрева с применением шаровых галогенных ламп OSRAM 64652 HLX и отражателей параболической формы производства «ОНПП «Технология». С помощью двухсот пятидесяти шести источников излучения общей мощностью 66 кВт на образце диаметром 100 мм удалось достичь среднего значения плотности падающего теплового потока 100 Вт/см^2 . Такой вариант установки также не требует системы охлаждения и обладает возможностью к масштабированию по размерам испытываемого объекта и уровню падающего теплового потока.

Литература

- [1] Hannah B., Weihs H., Elsässer H. Hot structure flight data of a faceted atmospheric reentry thermal protection system. *Int. J. Aerosp. Eng.*, 2019, pp. 1–16, doi: <https://doi.org/10.1155/2019/9754739>
- [2] Суздальцев Е.И. Керамические радиопрозрачные материалы: вчера, сегодня, завтра. *Новые огнеупоры*, 2014, № 10, с. 5–18, doi: <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2014-10-5-18>
- [3] Абызов А.М. Оксид алюминия и алюмооксидная керамика (обзор). Часть 2. Зарубежные производители алюмооксидной керамики. Технологии и исследования в области алюмооксидной керамики. *Новые огнеупоры*, 2019, № 2, с. 13–22, doi: <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-2-13-22>
- [4] Евдокимов С.А., Щеголева Н.Е., Сорокин О.Ю. Керамические материалы в авиационном двигателестроении (обзор). *Труды ВИАМ*, 2018, № 12, с. 54–61, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-12-54-61>
- [5] François J.J., Jankowiak A., Guérineau V. et al. Ultra-high temperature ceramics developments for hypersonic applications. *CEAS Aeronaut. J.*, 2020, vol. 11, no. 3, pp. 651–664, doi: <https://doi.org/10.1007/s13272-020-00445-y>
- [6] Баранов А.Н., Белозеров Л.Г., Ильин Ю.С. и др. *Статические испытания на прочность сверхзвуковых самолетов*. Москва, Машиностроение, 1974. 344 с.

- [7] Гордеев А.Н., Чаплыгин А.В. Теплообмен в высокочастотном индукционном плазматроне ВГУ-4 при использовании щелевых сопел. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, № 2, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-2-1953>
- [8] Полежаев Ю.В., Резник С.В., Баранов А.Н. и др. *Материалы и покрытия в экстремальных условиях*. Т. 3. Экспериментальные исследования. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 264 с.
- [9] Елисеев В.Н., Товстоног В.А. *Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 400 с.
- [10] Балджиев Р.С., Просунцов П.В., Резник С.В. и др. Разработка стендов радиационного нагрева для испытания образцов керамических материалов с уровнем температур до 2000 К. *Ключевые тренды в композитах: наука и технологии. Межд. науч.-практ. конф.* Москва, Диона, 2019, с. 68–73.
- [11] Коротких А.Г., Кузнецов В.Т., Архипов В.А. Влияние спектрального состава излучения на характеристики зажигания гетерогенных конденсированных систем. *Химическая физика и мезоскопия*, 2012, № 2, с. 181–187.
- [12] Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. *Теплообмен излучением*. Москва, Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
- [13] *Find minimum of function using genetic algorithm*. mathworks.com: веб-сайт. URL: <https://docs.exponenta.ru/gads/ga.html> (дата обращения: 02.03.2023).
- [14] *Галогенные лампы OSRAM*. osram.ru: веб-сайт. URL: http://glavsvet.kz/lamps/halogen.html?custom_parent_id=1&напряжение=24%20V%7C12%20V&start=24 (дата обращения: 02.03.2023).
- [15] *Программные продукты COMSOL*. comsol.ru: веб-сайт. URL: <https://technet.spbstu.ru/news/8669> (дата обращения: 21.02.2023).
- [16] *Отражатели и рассеиватели аэродромных прожекторов*. технологиya.ru: веб-сайт. URL: <https://web.archive.org/web/20220520070158/https://technologiya.ru/ru/447> (дата обращения: 02.03.2023).

References

- [1] Hannah B., Weihs H., Elsässer H. Hot structure flight data of a faceted atmospheric reentry thermal protection system. *Int. J. Aerosp. Eng.*, 2019, pp. 1–16, doi: <https://doi.org/10.1155/2019/9754739>
- [2] Suzdaltsev E.I. Ceramic radio-transparent materials yesterday, today and tomorrow. *Novye ognepory* [New Refractories], 2014, no. 10, с. 5–18, doi: <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2014-10-5-18> (in Russ.).
- [3] Abyzov A.M. Aluminium oxide and alumina ceramics (review). Part 2. Foreign manufacturers. Technologies and research in the field of alumina ceramics. *Novye ognepory* [New Refractories], 2019, no. 2, с. 13–22, doi: <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-2-13-22> (in Russ.).
- [4] Evdokimov S.A., Shchegoleva N.E., Sorokin O.Yu. Ceramic materials in aviation engineering (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2018, no. 12, с. 54–61, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-12-54-61> (in Russ.).
- [5] François J.J., Jankowiak A., Guérineau V. et al. Ultra-high temperature ceramics developments for hypersonic applications. *CEAS Aeronaut. J.*, 2020, vol. 11, no. 3, pp. 651–664, doi: <https://doi.org/10.1007/s13272-020-00445-y>
- [6] Baranov A.N., Belozero L.G., Ilin Yu.S. et al. *Sticheskie ispytaniya na prochnost sverkhzvukovykh samoletov* [Static strength testing of supersonic airplanes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 344 p. (In Russ.).
- [7] Gordeev A.N., Chaplygin A.V. Heat transfer in HF induction plasmatron VGU-4 with the use of slit nozzles. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2020, no. 2, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-2-1953> (in Russ.).
- [8] Polezhaev Yu.V., Reznik S.V., Baranov A.N. et al. *Materialy i pokrytiya v ekstremalnykh usloviyakh*. Т. 3. Eksperimentalnye issledovaniya [Materials and coatings in extreme

- environments. Vol. 3. Experimental studies.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 264 p. (In Russ.).
- [9] Eliseev V.N., Tovstonog V.A. *Teploobmen i teplovye ispytaniya materialov i konstruktsiy aerokosmicheskoy tekhniki pri radiatsionnom nagreve* [Heat transfer and thermal testing of materials and structures of aerospace engineering under radiation heating.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 400 p. (In Russ.).
- [10] Baldzhiev R.S., Prosuntsov P.V., Reznik S.V. et al. [Development of the radiating heating facilities for testing ceramic materials with operating temperatures up to 2000 K]. *Klyuchevye trendy v kompozitakh: nauka i tekhnologii. Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Key Trends in Composites: Science and Technology. Int. Sci.-Pract. Conf.] Moscow, Diona Publ., 2019, с. 68–73. (In Russ.).
- [11] Korotkikh A.G., Kuznetsov V.T., Arkhipov V.A. The influence of spectral composition of radiation on the ignition characteristics of composite solid propellants. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2012, no. 2, с. 181–187. (In Russ.).
- [12] Blokh A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. *Teploobmen izlucheniem* [Heat transfer by radiation]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 432 p. (In Russ.).
- [13] *Find minimum of function using genetic algorithm.* mathworks.com: website. URL: <https://docs.exponenta.ru/gads/ga.html> (accessed: 02.03.2023).
- [14] *Galogennye lampy OSRAM.* osram.ru: veb-sayt. URL: http://glavsvet.kz/lamps/halogen.html?custom_parent_id=1&напряжение=24%20V%7C12%20V&start=24 (data brashcheniya: 02.03.2023).
- [15] *Programmnye produkty COMSOL.* comsol.ru: veb-sayt. URL: <https://technet.spbstu.ru/news/8669> (data brashcheniya: 21.02.2023).
- [16] *Otrazhateli i rasseivateli aerodromnykh prozhektorov.* technologiya.ru: veb-sayt. URL: <https://web.archive.org/web/20220520070158/https://technologiya.ru/ru/447> (data brashcheniya: 02.03.2023).

Статья поступила в редакцию 29.01.2025

Информация об авторах

ХУДОРОЖКО Михаил Викторович — аспирант кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: khudorozko.mixa@gmail.com).

ПРОСУНЦОВ Павел Викторович — доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: prosuntsov@tochka.ru).

Information about the authors

KHUDOROZHKO Mikhail Viktorovich — Postgraduate, Department of Aerospace Composite Structures. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: khudorozko.mixa@gmail.com).

PROSUNTSOV Pavel Viktorovich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Space-Rocket Composite Design. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: prosuntsov@tochka.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Худорожко М.В., Просунцов П.В. Разработка установки концентрированного радиационного нагрева для испытаний образцов высокотемпературных композиционных материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 8, с. 144–154.

Please cite this article in English as:

Khudorozhko M.V., Prosuntsov P.V. Development of a concentrated radiation heating facility for testing the high-temperature composite materials. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 8, pp. 144–154.