

УДК 629.78+536.33

Определение оптимальных параметров конструктивно-компоновочной схемы установки для проведения тепловых испытаний сверхзвуковых летательных аппаратов

Худорожко Михаил Викторович^(*)

khudorozko.mixa@gmail.com

Просунцов Павел Викторович

pavel.prosuntsov@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассматривается задача проектирования установки концентрированного радиационного нагрева, предназначенной для достижения уровня температур до 2300 К. Для достижения заданного распределения плотности теплового потока по поверхности объекта испытаний параметры определялись путем решения соответствующей задачи оптимизации. Получено аналитическое выражение для компонентов градиента минимизируемого функционала. В результате решения задачи оптимизации обоснован вариант конструктивно-компоновочной схемы установки позволяющей достичь равномерного распределения 2300 К на поверхности плоского образца диаметром 100 мм при потреблении 100 кВт энергии.

Ключевые слова: стенд высокотемпературного нагрева, моделирование радиационного теплообмена, концентрация излучения, галогенная лампа, криволинейный зеркальный отражатель, задача оптимизации

Введение. Обеспечение теплового режима конструкции является одной из ключевых задач при разработке летательного аппарата. В результате нагрева потоком высокоэнтальпийного газа температура на наиболее теплонагруженных элементах может достигать 2500 К [1]. Соответственно, возникает необходимость в разработке нового поколения испытательного оборудования способного осуществлять нагрев образцов материалов и элементов конструкции до указанных значений температуры. В настоящее время в качестве источников излучения для подобных установок рассматриваются шаровые галогенные лампы [2]. Концепция и основные достоинства предлагаемого инженерного решения представлены в [3].

Материалы и методы; результаты. Метод определения параметров конструктивно-компоновочной схемы (ККС) основан на численном решении задачи оптимизации плотности падающего потока, подводимого к объекту испытаний. Для вычисления минимизируемого функционала использовалась следующая формула:

$$S(\mathbf{u}) = \int_{A_{\text{ои}}} (q_{\text{пад}} - q_z)^2 dA, \quad (1)$$

где q_z — заданное распределение потока, Вт/м²; $q_{\text{пад}}$ — плотность падающего потока, Вт/м²; $A_{\text{ои}}$ — поверхность объекта испытаний. Значение $q_{\text{пад}}$ вычисляется как

$$q_{\text{пад}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} q_{ij}(x', y'); \quad \begin{Bmatrix} x' \\ y' \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix}; \quad n_i(R_i) = \left[\frac{\pi}{\arctg(D/((2R_i \cdot \sin \theta_i)))} \right], \quad (2)$$

где k — количество уровней круговой формы; n_i — количество ламп на i -м уровне; q_{ij} — плотность потока от единичной лампы, Вт/м².

Для определения отраженного от рефлектора потока, создаваемого j -й лампой на i -м уровне, использовалась формула

$$q_{ij}(x, y) = \int_0^{2\pi} \int_{D_0/2}^{D/2} \rho_{\text{зер}} \cdot I \cdot \text{Ind}(r, \varphi) \frac{\cos \alpha \cos \beta}{S^2} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial r}{\partial z} \right)^2} r dr d\varphi, \quad (3)$$

где Ind — индикаторная функция, указывающая на попадание луча на поверхность излучающей спирали. При этом производная выражения (3) по произвольному параметру p определялась как:

$$\frac{\partial q_{ij}}{\partial p} = \int_0^{2\pi} \int_{D_0/2}^{D/2} \frac{\partial F}{\partial p} \text{Ind}(r, \varphi) r dr d\varphi + \int_{\partial \text{Ind}} F \frac{\partial V}{\partial p} \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^{-1} dl,$$

где ∂Ind — граница области, где происходит смена значения индикаторной функции.

В результате решения задачи оптимизации были определены параметры ККС установки позволяющие достичь уровня температур 2300 К при неравномерности не более 6 % на поверхности плоского образца диаметром 100 мм при потреблении 100 кВт энергии.

Заключение. Таким образом, представленный метод решения задачи оптимизации позволяет определить оптимальные параметры ККС и форму отражателя установки концентрированного радиационного нагрева для заданного распределения падающего потока излучения по поверхности объекта испытаний.

Список источников

- [1] Аронов Д.И., Клягин В.А. Перспективные методы организации тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз–Антей»*, 2021, № 1(36), с. 52–66.
- [2] Райлян В.С., Русин М.Ю., Фокин В.И. и др. Исследование возможности создания установки радиационного нагрева на основе инфракрасных направленных излучателей. *Тепловые процессы в технике*, 2021, т. 13, № 1, с. 24–29.
- [3] Худорожко М.В., Просунцов П.В. Определение параметров вариантов конструктивно-компоновочных схем рабочей зоны установки концентрированного радиационного нагрева для испытаний высокотемпературных композиционных материалов. *XLVIII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства: сб. тез.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024, т. 1, с. 52–54.