

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 11. С. 514–525
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 11, pp. 514–525

Научная статья
УДК 629.78
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186739>
EDN: <https://www.elibrary.ru/CNIBFC>

Построение и верификация по результатам тепловакуумных испытаний математической модели пространственного распределения лучистых потоков, генерируемых инфракрасным облучателем ИЭТ-29 тепловакуумной камеры ВК600/300

В.А. Ульянов¹✉, П.Н. Савчук², А.Д. Поляхов³✉

^{1,2,3}Федеральное казенное предприятие «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности», Пересвет, Российская Федерация

¹osduka@rambler.ru[✉], ³alekdmirpol@gmail.com[✉]

Аннотация. Разработаны методика и алгоритм построения математической модели пространственного распределения излучения, генерируемого источником инфракрасного излучения ИЭТ-29 тепловакуумной камеры ВК600/300 ФКП «НИЦ РКП».

Определено значение телесного угла, в котором распространяется излучение облучателя.

Получены аналитические зависимости теплового потока, удельной силы излучения, генерируемых облучателем, и его КПД от подводимой к облучателю электрической мощности.

Построены аналитические зависимости углового распределения излучения в главных поперечной и продольной плоскостях – индикаторис излучения.

Методика и алгоритм построения индикаторис излучения представляются универсальными и могут быть применены при проектировании различных источников инфракрасного излучения в обеспечение тепловакуумных испытаний ракетно-космической техники.

Ключевые слова: имитатор инфракрасного излучения, инфракрасный облучатель, математическая модель, пространственное распределение лучистых потоков, тепловакуумные испытания, электрическая мощность, тепловой поток, сила излучения, телесный угол, осевая облученность

Для цитирования. Ульянов В.А., Савчук П.Н., Поляхов А.Д. Построение и верификация по результатам тепловакуумных испытаний математической модели пространственного распределения лучистых потоков, генерируемых инфракрасным облучателем ИЭТ-29 тепловакуумной камеры ВК600/300 // Термовые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 11. С. 514–525. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186739>

Original article

Construction and verification of a mathematical model of the spatial distribution of radiant fluxes generated by the infrared irradiator IET-29 of the VK600/300 thermal vacuum chamber based on the results of thermal vacuum tests

V.A. Ulyanov^{1✉}, P.N. Savchuk², A.D. Polyakhov^{3✉}

^{1,2,3}*Federal State Enterprise “Scientific and Testing Center of the Rocket and Space Industry”, Peresvet, Russian Federation*

¹*osduka@rambler.ru✉*, ³*alekdmtrpol@gmail.com✉*

Abstract. As part of the modernization of the infrared radiation simulator of the VK600/300 thermal vacuum chamber of the Federal State Enterprise “Research Center of the Russian Communist Party” in order to clarify its operating characteristics, full-fledged thermal and vacuum tests of the simulator were carried out.

In the course of these tests, experimental studies of the energy and radiative characteristics of single and group radiation sources consisting of IET-29 irradiators were carried out.

Based on the results of these studies, a method was developed for determining the energy and radiative characteristics of infrared radiation sources in conditions of limited capabilities of measuring instruments during thermal vacuum tests, such as the heat flux generated by the irradiator, the solid angle in which the radiation propagates and the specific radiation strength in the direction of the optical axis of the irradiator.

A complex mathematical model of the irradiator has been constructed, including thermal, radiation, energy models, as well as a mathematical model of the spatial distribution of radiation generated by the irradiator.

A light model of the irradiator has been developed in the representation of the radiator emitting element in the form of an emitting tape located in the irradiator shear plane with polynomial models of radiation propagation in the main longitudinal and transverse planes, the coefficients of which are determined in the process of processing the test results.

On the basis of this model, an analytical dependence was obtained for calculating irradiation at any given design point.

The analytical dependence of the heat flux generated by the irradiator on the electric power supplied to it is obtained, and the value of the solid angle in which its radiation propagates is determined.

An analytical dependence of the specific radiation intensity of the irradiator and its LP on the electric power supplied to it is obtained.

Analytical dependencies of the angular distribution of radiation in the main, transverse and longitudinal planes are constructed - radiation indications;

A methodological and algorithmic apparatus has been developed that provides the solution of any methodological problems when using IET-29 infrared radiation sources in the process of thermal vacuum testing of objects of any complexity.

Keywords: infrared radiation simulator, infrared irradiator, mathematical model, spatial distribution of radiant fluxes, electric power, heat flux, radiation strength, solid angle, axial irradiation

For citation. Ulyanov V.A., Savchuk P.N., Polyakhov A.D. Construction and verification of a mathematical model of the spatial distribution of radiant fluxes generated by the infrared irradiator IET-29 of the VK600/300 thermal vacuum chamber based on the results of thermal vacuum tests. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 11, pp. 514–525. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186739>

Введение

Практика тепловакуумной отработки крупногабаритных космических аппаратов, таких как орбитальная станция «МИР», фрагменты многоразового корабля «Буран», раскладывающихся солнечных батарей и других изделий, на тепловакуумной установке КВИ показала, что тепловые макеты указанных выше изделий имели не только сложные формы, но и значительные отклонения от штатных конструкций вследствие исключения отдельных внешних выносных элементов и элементов конструкции, не вписывающихся в рабочий объем тепловакуумной камеры. При подготовке к испытаниям подобных тепловых макетов выяснилось, что имитатор инфракрасного излучения должен был решать такие задачи, которые его проектом не предусматривались. К ним относятся: имитация теплового влияния планеты; проведение испытаний без имитации солнечного излучения; компенсация влияния отличий параметров поля лучистых потоков, создаваемых имитатором солнечного излучения, от параметров поля солнечного потока; компенсация теплового влияния элементов конструкции, не вошедших в состав объектов испытаний. Наряду с указанными задачами методики и алгоритмы управления имитатором должны были учитывать эффекты, возникающие при улавливании излучения в полостях, образуемых элементами конструкции, а также эффекты экранирования и переотражения подводимых к объекту лучистых потоков. С точки зрения методики тепловакуумных испытаний все указанные выше задачи сводились к задаче оптимального управления имитатором инфракрасного излучения, суть которого заключалась в минимизации погрешности воспроизведения расчетной суммарной внешней тепловой нагрузки, картина которой была обусловлена особенностями объектов испытаний и характеризовалась термином «лоскутное одеяло». Указанные методики и алгоритмы для расчета плотности лучистых потоков, подводимых к поверхности объектов испытаний от облучателей ИЭТ-29, использовали процедуру прямого интегрирования по длине каждого задействованного облучателя, включая расчеты эффектов экранирования и переотражения падающего излучения. Очевидно, что данные алгоритмы не могли быть реализованы без математического описания энергетических и излучательных характеристик облучателя, включая пространственное распределение генерируемого им лучистого потока в главных поперечной и продольной плоскостях – индикатрис излучения, которые для облучателя ИЭТ-29 установки КВИ были определены экспериментально. Применительно к испытаниям на установке ВК600/300 аналогичную задачу следует решить для облучателя ИЭТ-29 этой установки. При решении данной задачи использовались результаты исследований, приведенные в работах [1, 11, 12], а также на результатах построения и верификации тепловой и излучательной моделей облучателя ИЭТ-29 [2, 3, 4, 5]. На стадии предварительных исследований при построении индикатрис излучения облучателя ИЭТ-29 установки ВК600/300 использовались классические методический и математический аппараты, а также расчетные схемы, рисунок 1 *a, b, в*, приведенные в работах [6, 7, 8, 9].

При этом расчет облученности поверхности объекта в расчетной точке «А» в этих работах предложено производить по следующей формуле

$$dq_A = \frac{dI_{\gamma, \alpha_i} \cos \beta_A}{l_{A,i}^2}, \quad (1)$$

где

dI_{γ, α_i} – сила излучения *i*-го элемента излучающей линии в направлении расчетной точки «А»;

$l_{A,i}$ – расстояние от элемента излучающей линии до расчетной точки «А»;

$\beta_{A,i}$ – угол между направлением силы излучения в расчетную точку «А» и нормалью к тепловоспринимающему элементу в этой точке;

γ – угол в поперечной плоскости;

α – угол в продольной плоскости.

Если обозначить силу излучения с единицы длины излучающей линии как I_0 и принять во внимание, что в продольной плоскости излучающей линии распределение лучистого потока подчиняется закону косинуса, то для dI_{γ, α_i} будет справедливо следующее соотношение

$$dI_{\gamma, \alpha_i} = I_0 dL_i \cos \alpha_i. \quad (2)$$

В соответствии с рисунком 1 *a, в* очевидны следующие соотношения

$$\begin{aligned} \cos \beta_i &= \frac{h_A}{l_{A,i}} = \\ &= \frac{h_A \times \cos \gamma \times \cos \alpha_i}{h_A} = \cos \gamma \times \cos \alpha_i, \end{aligned} \quad (3)$$

$$l_i = \frac{h_A}{(\cos\gamma \times \cos\alpha_i)}, \quad (4)$$

$$dL_i = \frac{l_i}{\cos\alpha_i} d\alpha_i = \frac{h_A}{\cos\gamma \times \cos^2\alpha_i} d\alpha_i, \quad (5)$$

$$\varphi = \arctg \frac{L}{\sqrt{a^2 + h_A^2}}. \quad (6)$$

С учетом выражений (2), (3), (4), (5) соотношение (1) примет вид

$$dq_A = \frac{I_0}{h_A} \cos^2\gamma \times \cos^2\alpha_i d\alpha_i. \quad (7)$$

Тогда облученность в расчетной точке «А» от всей излучающей линии может быть определена по соотношению (8)

$$q_A = \frac{I_0}{h_A} \cos^2\gamma \times \int_0^\phi \cos^2\alpha_i d\alpha_i. \quad (8)$$

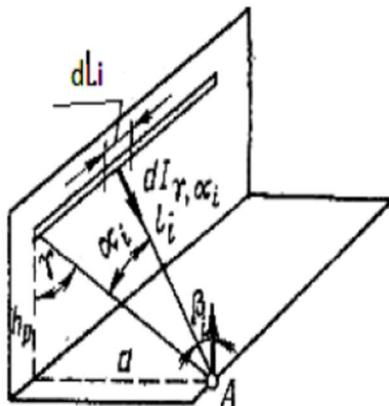


Рис. 1 а. Схема и геометрические характеристики, необходимые для расчета облученности от излучающей линии, приведенные в работах [6, 7] и [8].

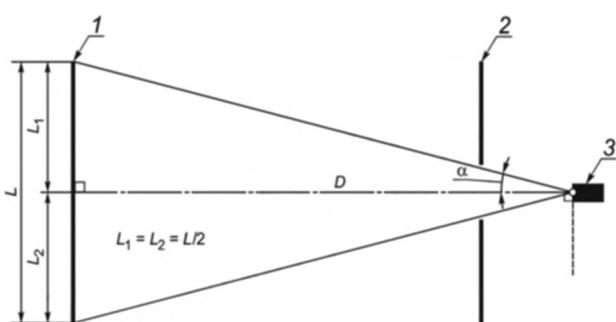


Рис. 1 б. Схема измерений осевой облученности, создаваемой излучающей линией в точке, расположенной на оси излучающей линии, приведенная в работе [8].

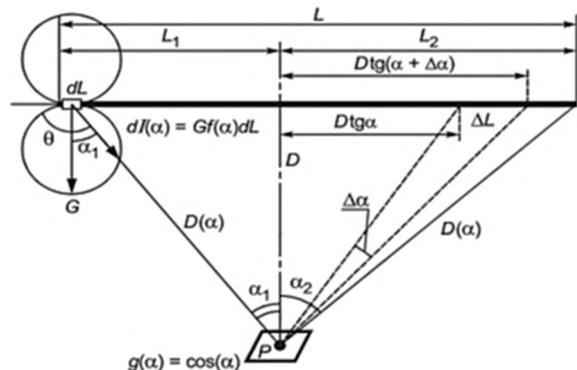


Рис. 1 в. Схема и геометрические характеристики, необходимые для расчета облученности от излучающей линии в точке, расположенной на оптической оси облучателя, приведенные в работе [8].

Или окончательно после интегрирования по длине излучающей линии расчет облученности в точке «А» может быть произведен по следующей формуле

$$q_A = \frac{I_0}{2h_A} \cos^2\gamma \times \left(\alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right). \quad (9)$$

Следует напомнить, что данное соотношение получено для излучающей линии с косинусным распределением излучения в ее продольной плоскости при безусловной независимости пространственного распределения лучистых потоков в главных продольной и поперечной плоскостях.

Применительно к облучателю ИЭТ-29 для условий его эксплуатации в камере ВК600/300 ФКП «НИЦ РКП» соотношение (9) не может быть применено по следующим причинам:

– в силу геометрических характеристик системы облучатель ИЭТ-29–объект испытаний представлять облучатель в виде излучающей линии не корректно;

– наличие зеркального отражателя сложной геометрической формы предполагает наличие сложных геометрических функций, описывающих пространственное распределение лучистых потоков в главных продольной и поперечной плоскостях облучателя.

Кроме того, применительно к условиям тепловакуумной камеры отсутствуют методы и средства измерения таких энергетических характеристик облучателя как:

- тепловой поток, генерируемый облучателем;
- телесный угол, в котором распространяется излучение;
- удельная сила излучения в направлении оптической оси облучателя.

Предмет исследований

С учетом вышеизложенного и опыта эксплуатации облучателя ИЭТ-29 в условиях теплово-кумной камеры КВИ, а также подходов, предложенных в работах [7, 8], были приняты следующие допущения:

- облучатель представляется излучающей лентой;
- излучающая лента расположена в плоскости среза облучателя параллельно его продольной оси, центр излучающей ленты совпадает с излучательным центром облучателя;
- за излучательный центр облучателя принят центр симметрии плоскости его среза;
- лучистые потоки, генерируемые облучателем, распространяются в пределах фактических углов расходности в главных продольной и поперечной плоскостях.

Зависимость удельной силы излучения в направлении оптической оси облучателя от подводимой к облучателю электрической мощности в первом приближении [9] (выражение Г3, стр. 17) может быть представлена выражением (10), смотри рисунок 1 в, применимым для излучающей линии

$$I_0(P) = \Phi(P) / (\Omega \times L), \quad (10)$$

где

Ω – эквивалентный телесный угол, в котором распространяется генерируемый излучающей линией поток излучения, который в соответствии с [9] (выражение 10, стр. 9) может быть представлен выражением (11)

$$\Omega = \frac{\Phi \times \left[\sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{L}{2D} \right) \right) + 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{L}{2D} \right) \right]}{2q_{\text{осевая}} \times L \times D}, \quad (11)$$

Φ – поток излучения, генерируемый излучающей линией, может быть определен по формуле

$$\Phi = \frac{2q_{\text{осевая}} \times \Omega \times L \times D}{\sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{L}{2D} \right) \right) + 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{L}{2D} \right)}, \quad (12)$$

где

L – длина излучающей линии;

$q_{\text{осевая}}$ – облученность в точке, расположенной на оптической оси излучающей линии;

P – электрическая мощность, подводимая к облучателю;

D – расстояние от излучающей линии до приемника излучения.

Представим угловое распределение силы излучения в главной продольной плоскости уравнением (13)

$$f_1(\phi) = \sum_{i=1}^3 b_i \cos^{(2i-1)}(\alpha). \quad (13)$$

А угловое распределение силы излучения в главной поперечной плоскости – уравнением (14)

$$f_2(\alpha) = \sum_{i=1}^3 c_i \cos^{(2i-1)}(\gamma). \quad (14)$$

Тогда сила излучения в направлении от элемента излучающей ленты в расчетную точку «А» примет вид

$$dI_{\alpha, \phi, i} = I_0(P) \times f_1(\alpha) \times f_2(\gamma) \times \cos \gamma \times \cos \alpha_i dL_i. \quad (15)$$

Одновременно выражение (8) примет вид

$$q_A = \frac{I_0(P)}{h_A} \times f_2(\gamma) \times \cos^3 \gamma \times \int_0^\phi f_1(\alpha) \times \cos \alpha_i d\alpha_i. \quad (16)$$

С учетом (3), (4), (5), (6) после интегрирования по длине облучателя облученность в расчетной точке от излучающей ленты может быть определена по следующей формуле

$$q_A = \frac{I_0(P) \times \left(c_1 \times \frac{h_A}{\sqrt{a^2 + h_A^2}} + \right.}{\left. + c_2 \times \left(\frac{h_A}{\sqrt{a^2 + h_A^2}} \right)^3 + c_3 \times \left(\frac{h_A}{\sqrt{a^2 + h_A^2}} \right)^5 \right) \times h_A^2 \times \frac{b_1 \times}{2 \times \left(a^2 + h_A^2 \right)^{\frac{2}{3}}} \times \left(\arctg \frac{L}{\sqrt{a^2 + h_A^2}} + \frac{1}{2} \sin \left(2 \operatorname{arctg} \frac{L}{\sqrt{a^2 + h_A^2}} \right) \right) + \left. + b_2 \times \left(\frac{3}{4} \operatorname{arctg} \frac{L}{\sqrt{a^2 + h_A^2}} + \frac{1}{2} \sin \left(2 \operatorname{arctg} \frac{L}{\sqrt{a^2 + h_A^2}} \right) \right) + \frac{1}{16} \sin \left(4 \operatorname{arctg} \frac{L}{\sqrt{a^2 + h_A^2}} \right) \right) +} \quad (17)$$

$$+b_3 \times \left(\frac{5}{8} \operatorname{arctg} \frac{L}{\sqrt{a^2 + h_A^2}} + \frac{15}{32} \sin \left(2 \operatorname{arctg} \frac{L}{\sqrt{a^2 + h_A^2}} \right) + \right. \\ \left. + \frac{3}{32} \sin \left(4 \operatorname{arctg} \frac{L}{\sqrt{a^2 + h_A^2}} \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{96} \sin \left(6 \operatorname{arctg} \frac{L}{\sqrt{a^2 + h_A^2}} \right) \right).$$

Данное уравнение содержит следующие неизвестные:

- $I_0(P)$ – удельная сила излучения в направлении оптической оси облучателя;
- коэффициенты c_i функции $f_2(y)$;
- коэффициенты b_i функции $f_1(a)$.

С учетом вышеизложенного основными направлениями исследований при построении математической модели пространственного распределения лучистых потоков, генерируемых облучателем ИЭТ-29, для условий его применения в тепловакуумной камере ВК600/300 являются:

- оценка степени взаимозависимости функций пространственного распределения лучистых потоков $f_1(a)$ и $f_2(y)$ и подтверждение правомочности применения выражения (15);
- определение удельной силы излучения в направлении оптической оси облучателя в зависимости от подводимой к облучателю электрической мощности $I_0(P)$;
- определение коэффициентов b_i функции $f_1(a)$;
- определение коэффициентов c_i функции $f_2(y)$;
- построение аналитических зависимостей $f_2(y)$, $f_1(a)$, и $I_0(P)$, КПД (P);
- проверка адекватности и подтверждение возможности использования соотношений (13), (14), (15), (17) применительно к условиям тепловакуумной камеры ВК600/300 ФКП «НИЦ РКП».

Методика проведения исследований

Сущность принятой методики проведения исследований заключается в следующем:

1. Ввиду ограниченного количества средств измерений [10] и технической невозможности осуществить сканирование поля излучения облучателя ИЭТ-29 в условиях тепловакуумной камеры, не представляется возможным опреде-

лить величину генерируемого облучателем теплового потока $\Phi(P)$, а также величину телесного угла Ω , в котором этот поток распространяется.

2. Соответственно не может быть определено значение удельной силы излучения облучателя в направлении его оптической оси $I_0(P)$, а значит и не может быть решена задача построения искомой математической модели пространственного распределения излучения облучателя ИЭТ-29.

3. В связи с этим для определения энергетических характеристик облучателя было принято решение об использовании комбинированного метода исследования, заключающегося в сочетании расчетно-теоретического исследования с использованием верифицированной излучательной модели облучателя [4, 5] и результатов обработки экспериментальных данных [10].

Исследования проводились в четыре этапа

На первом этапе по результатам верификации излучательной модели облучателя [4, 5] оценивалась степень взаимозависимости функций пространственного распределения лучистых потоков $f_1(a)$ и $f_2(y)$, а также их зависимость от подводимой к облучателю электрической мощности и геометрических характеристик системы облучатель – точки контроля параметров создаваемого облучателем поля лучистых потоков.

На втором этапе с использованием верифицированной излучательной модели облучателя методом Монте-Карло проводились расчеты облученности контрольной плоскости при различных значениях электрической мощности на облучателе, по результатам которых определялись:

- телесный угол Ω , в котором распространяется генерируемое облучателем излучение, величина теплового потока $\Phi(P)$, КПД (P) и удельная сила излучения в направлении оптической оси облучателя $I_0(P)$;

- полученные значения энергетических характеристик облучателя корректировались с использованием экспериментальных данных.

На третьем этапе по результатам расчетов облученности контрольной плоскости, рассчитанной по верифицированной излучательной модели облучателя № 33, [4, 5] при подведенной к нему электрической мощности $P = 1634$ Вт [14] определялись аналитические зависимости для

составляющих математической модели излучения облучателя ИЭТ-29 $f_1(\alpha)$, $f_2(\gamma)$.

На четвертом этапе осуществлялась проверка адекватности построенной математической модели пространственного распределения потока излучения облучателя ИЭТ-29.

Решение задач первого этапа исследований

Задачи первого этапа были решены в процессе верификации излучательной модели единичного облучателя ИЭТ-29 [4, 5] при этом было установлено следующее:

– адекватная результатам экспериментальных данных высота подвеса излучающего элемента над выступом отражателя составила примерно 13 мм;

– пространственное распределение лучистых потоков не зависит от подводимой к облучателю электрической мощности и характеризуется отсутствием взаимозависимости функций $f_1(\alpha)$ и $f_2(\gamma)$, описывающих распределение излучения в главных продольной и поперечной плоскостях;

– распределение лучистых потоков в поперечной плоскости не изменяется в пределах перемещения вдоль продольной оси облучателя на расстояние ± 2000 мм от его оптической оси.

То есть, с точки зрения решения задач первого этапа, можно сделать следующие выводы:

– применение соотношений (15), (16), (17) для описания пространственного распределения излучения, генерируемого облучателем ИЭТ-29, является правомерным;

– дальнейшие расчетно-экспериментальные исследования должны производиться с применением верифицированной излучательной модели облучателя с высотой подвеса излучающего элемента над выступом отражателя 13 мм.

Решение задач второго этапа исследований

Перед проведением исследований второго этапа с целью минимизации погрешности определения величин телесного угла и генерируемого облучателем теплового потока $\Phi(P)$ с использованием верифицированной излучательной модели облучателя ИЭТ-29 методом Монте-Карло были проведены расчеты по определению размеров контрольной плоскости, гарантирующих практически полное экранирование генерируе-

мого облучателем теплового потока. Применительно к условиям тепловакуумных испытаний имитатора инфракрасного излучения в камере ВК600/300 ФКП «НИЦ РКП» данная задача была решена для контрольной плоскости, расположенной на расстоянии 1500 мм от среза облучателя. Решение осуществлялось методом последовательных приближений, заключающимся в проведении расчетов облученности контрольной плоскости при подводимой к облучателю электрической мощности 1634 Вт и пошаговом изменении ее размеров. Критерием окончания расчетов являлась неизменность величины потока излучения при очередном изменении размеров контрольной плоскости. По результатам проведенных расчетов минимально допустимые размеры контрольной плоскости относительно оптической оси облучателя составили: в главной поперечной плоскости ± 1590 мм, а в главной продольной плоскости ± 3750 мм.

Следующим шагом расчетных исследований явилось проведение серии расчетов методом Монте-Карло с использованием верифицированной излучательной модели облучателя с целью определения величины теплового потока $\Phi(P)$ и осевой облученности $q_{\text{осевая}}$ при подведении к облучателю экспериментальных значений электрической мощности [10]. При этом контрольная плоскость разбивалась на элементы размером 60×60 мм, что соответствует размерам приемных площадок датчиков лучистых потоков, применяемых при проведении экспериментов [10].

Используя полученные расчетные значения $\Phi(P)$ и $q_{\text{осевая}}$, по формуле (11) рассчитывались предварительные значения эквивалентных телесных углов $\Omega_{\text{расчет №9}}$, $\Omega_{\text{расчет №33}}$, $\Omega_{\text{расчет №57}}$, в которых распространяется излучение, генерируемое облучателями № 9, № 33 и № 57. Результаты расчетов приведены на рисунках 2 а, б и в таблице 1.

Поскольку облучатели № 9, № 33 и № 57 не имеют конструктивных различий, за величину телесного угла было принято его среднее расчетное значение $\Omega_{\text{расчет}}$.

Затем по формуле (10), используя значение $\Omega_{\text{расчет}}$ и экспериментальные значения $q_{\text{осевая, эксп.}}$ для облучателей № 9, № 33 и № 57, были полу-

чены значения теплового потока $\Phi(P)$ и удельной силы излучения I_0 эксп. №9(P), I_0 эксп. №33(P), I_0 эксп. №57(P) соответствующие экспериментальным данным. Результаты расчетов приведены на рисунке 3 и в таблице 2.

При решении задач второго этапа получены необходимые для проведения дальнейших исследований значение телесного угла Ω , в котором распространяется генерируемый облучателем поток излучения, и аналитические зависимости энергетических характеристик облучателей.

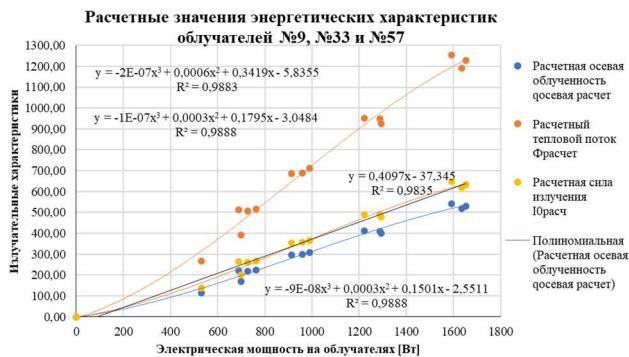


Рис. 3 а. Расчетные значения и аналитические зависимости энергетических характеристик облучателей №9, №33 и №57 от подводимой к ним электрической мощности

Таблица 1. Расчетные значения энергетических характеристик облучателей №9, №33 и №57

Электрические мощности на облучателях [Вт]	Электрические мощности на лентах облучателей [Вт]	Расчетный тепловой поток Φ расчет [Вт]	Расчетная осевая облученность q осевая расчет [Вт/м ²]	Эквивалентный телесный угол Ω расчет [стериadian]	Расчетная удельная сила излучения I_0 расчет [Вт/(стР×м)]	КПД облучателей [%]
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0
530	300,0000	266,8800	115,3600	2,0192	137,6800	50,3547
688	575,0000	511,5500	221,1500	2,0189	263,8400	74,6134
700	440,0000	391,4400	169,3000	2,0180	202,0600	55,92
728	570,0000	507,1000	218,9100	2,0218	261,6400	69,6566
762	580,0000	516,0200	222,9900	2,0197	266,1400	67,7192
914	770,0000	685,0400	296,0300	2,0197	353,3200	74,9497
958	775,0000	689,4500	298,4900	2,0160	355,7300	71,9676
989	800,0000	711,7300	307,3700	2,0210	366,8400	71,9646
1222	1070,0000	951,9500	410,8300	2,0224	490,9800	77,901
1289	1065,0000	947,4900	409,9200	2,0174	488,8700	73,5058
1292	1040,0000	925,2400	400,2000	2,0178	477,6400	71,613
1592	1410,0000	1254,4000	542,5900	2,0178	646,9700	78,794
1634	1350,0000	1190,7000	519,7900	1,9993	620,3700	72,8703
1652	1380,0000	1227,7000	530,3500	2,0204	633,4500	74,4885

Примечания:

- Строки, помеченные желтым цветом, относятся к облучателю №33, помеченные зеленым цветом к облучателю №9 и коричневым – к облучателю №57.
- Значение телесного угла равно среднеарифметическому значению и составляет 2,0178 стериadian.

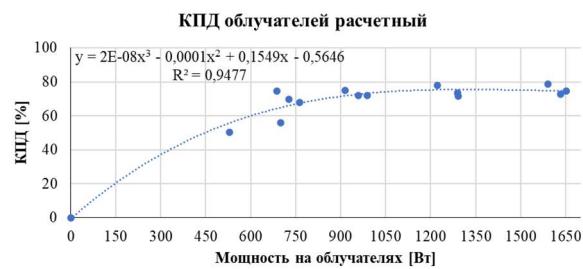


Рис. 3 б. Расчетные значения и аналитическая зависимость КПД облучателей №9, №33 и №57 от подводимой к ним электрической мощности



Рис. 4. Уточненные по экспериментальным данным значения и аналитические зависимости энергетических характеристик облучателей №9, №33 и №57 от подводимой к ним электрической мощности

Таблица 2. Уточненные значения энергетических характеристик облучателей № 9, № 33 и № 57

Электрические мощности на облучателях [Вт]	Экспериментальная осевая облученность $q_{\text{осевая, эксп.}}$ по датчикам ДТП1, ДТП6, ДТП7 [Вт/м ²]	Эквивалентный телесный угол $\Omega_{\text{расчет}}$ [стериadian]	Экспериментальный тепловой поток $\Phi_{\text{эксп}}$ [Вт]	Экспериментальная удельная сила излучения $I_{0\text{эксп}}$ [Вт/(стр ² м)]	КПД облучателей [%]
0	0,00	2,0178	0,00	0,00	0
530	118,8600		274,79 25	141,8585	51,8476
688	222,0424		513,3399	265,0060	74,6134
700	172,6700		399,1958	206,0804	57,028
728	221,8510		512,8974	264,7775	70,4529
762	222,0700		513,4037	265,0389	67,3758
914	299,0658		691,4103	356,9328	75,6466
958	296,5290		685,5455	353,9052	71,5601
989	298,2700		689,5705	355,9831	69,724
1222	409,3963		946,4834	488,6115	77,4536
1289	406,5060		939,8014	485,1619	72,9093
1292	404,2800		934,6551	482,5052	72,3417
1592	542,3460		1253,8499	647,2860	78,7594
1634	527,3100		1219,0882	629,3406	74,6076
1652	532,2680		1230,5506	635,2580	74,4885

Решение задач третьего этапа исследований

Построение аналитических зависимостей распределения потока излучения в главных продольной и поперечной плоскостях $f_1(\alpha)$ и $f_2(\gamma)$ проводилось по следующему алгоритму:

– по верифицированной излучательной модели облучателя ИЭТ-29 при подводимой к облучателю электрической мощности 1634 Вт методом Монте-Карло (эталонная модель) был проведен расчет облученности контрольной плоскости, расположенной на расстоянии 1000 мм от среза облучателя, при этом размеры контрольной плоскости и ее разбивка на элементы были аналогичны значениям, приведенным в описании работ на шаге 2;

– по результатам расчета для каждого элемента, расположенного в главных продольной и поперечной плоскостях, были получены значения облученности, принятые за измеренные $q_{Ai,\text{изм}}$;

– для тех же элементов по соотношению (17) для осевой силы излучения $I_{0\text{изм}}$ (1634) получили расчетные значения облученности $q_{Ai,\text{расчет}}$;

– записав уравнение функции невязки (18) и, проведя ее минимизацию, получили значения коэффициентов $b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$, которые обеспечили возможность построения и аппроксима-

ции функций $f_1(\alpha)$ и $f_2(\gamma)$, результаты которых приведены на рисунках 5 а, б;

$$S_{\text{цел}} = \min \sum_{i=1}^n (q_{Ai,\text{изм}} - I_{0\text{изм}}(1634) \times \sum_{j=1}^3 c_j \cos^{(2j-1)}(\gamma_i) \times \times \int_0^L \frac{\cos \beta_{Ai} \times \sum_{k=1}^3 b_k \cos^{(2k-1)}(\alpha_{Ai})}{l_{Ai}^2} dL)^2, \quad (18)$$

где

$q_{Ai,\text{изм}}$ – измеренное значение облученности элемента 60×60 мм;

n – количество элементов 60×60 мм вдоль продольной и поперечной осей облучателя.

Графические и аналитические зависимости $f_1(\alpha)$ и $f_2(\gamma)$ приведены на рисунках 5 а, б.

Полученные в результате решения задач третьего этапа аналитические описания функций $f_1(\alpha)$, $f_2(\gamma)$, $I_0(P)$ и КПД в сочетании с выражением (7) представляют собой основные компоненты математической модели пространственного распределения излучения, генерируемого облучателем ИЭТ-29.

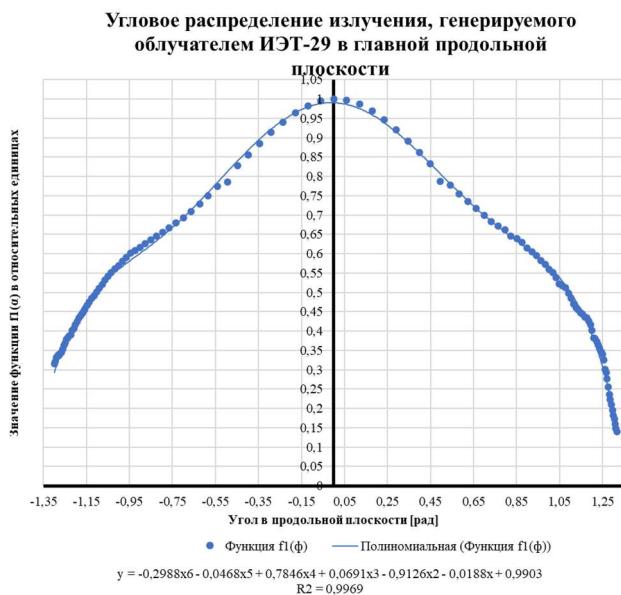


Рис. 5 а. График и аналитическая зависимость углового распределения потока излучения в главной продольной плоскости облучателя ИЭТ-29.

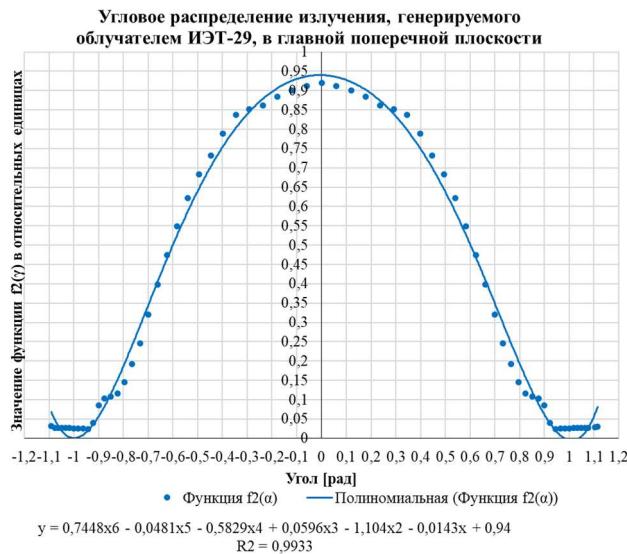


Рис. 5 б. График и аналитическая зависимость функции углового распределения потока излучения в главной поперечной плоскости облучателя ИЭТ-29.

Резюмируя вышеизложенное, математическая модель пространственного распределения генерируемого облучателем ИЭТ-29 лучистого потока представляет собой совокупность следующих взаимосвязанных компонентов:

— представление облучателя ИЭТ-29 излучающей лентой, расположенной в плоскости среза облучателя, и соответствующего соотношения, предназначенного для расчета облученности в заданной контрольной точке,

$$q_A = \frac{I_0(P)}{h_A} \times f_2(\alpha) \times \cos^3 \alpha \times \int_0^\phi f_1(\phi) \times \cos \phi_i d\phi_i;$$

— аналитической зависимостью удельной силы излучения от подводимой к облучателю электрической мощности

$$I_0(P) = 0,4107 \times P - 37,4;$$

— аналитическими зависимостями углового распределения излучения в главных продольной и поперечной плоскостях

$$f_1(\phi) = -0,2988 \times \phi^6 - 0,0468 \times \phi^5 + 0,7846 \times \phi^4 + 0,0691 \times \phi^3 - 0,9126 \times \phi^2 - 0,0188 \times \phi + 0,9903;$$

$$f_2(\alpha) = 0,7448 \times \alpha^6 - 0,0481 \times \alpha^5 - 0,5829 \times \alpha^4 + 0,059 \times \alpha^3 - 1,104 \times \alpha^2 - 0,0143 \times \alpha + 0,94;$$

— аналитической зависимостью КПД облучателя от подводимой к нему электрической мощности

$$KPD(P < 1000) = 2 \times 10^{-8} \times P^3 - 0,0001 \times P^2 + 0,1549 \times P - 0,5646;$$

$$KPD(P > 1000) = 0,75445.$$

Заключение

По результатам проведенных исследований разработана методика определения энергетических и излучательных характеристик источников инфракрасного излучения в условиях ограниченных возможностей средств измерения при проведении тепловакуумных испытаний, таких как тепловой поток, генерируемый облучателем, телесный угол, в котором распространяется излучение и удельная сила излучения в направлении оптической оси облучателя.

Разработана математическая модель облучателя в представлении излучающего элемента облучателя в виде излучающей ленты, расположенной в плоскости среза облучателя, полиномиальными моделями распространения излучения в главных продольной и поперечной плоскостях.

Получена аналитическая зависимость для расчета облученности в любой заданной расчетной точке.

Получены аналитические зависимости генерируемого облучателем теплового потока, КПД

облучателя и удельной силы излучения от подводимой к нему электрической мощности, включая значение телесного угла, в котором распространяется его излучение.

Построены аналитические зависимости углового распределения излучения в главных попечечной и продольной плоскостях – индикатрисы излучения.

Список источников

1. Ульянов В.А., Соловьев М.В. Оптимизация тепловакуумных испытаний космических комплексов на установке ВК 600/300 // Полет. 2009. С. 82–93.
2. Ульянов В.А., Сизяков Н.П., Поляхов А.Д. Конечно-элементная тепловая модель инфракрасного излучателя ИЭТ-29 и ее верификация по результатам тепловакуумных испытаний // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2022. № 4. С. 3–21.
3. Ульянов В.А., Сизяков Н.П., Поляхов А.Д. и т.д. Построение и исследование излучательной модели инфракрасного излучателя ИЭТ-29 в условиях тепловакуумных испытаний изделий космической техники // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2023. № 1–2. С. 81–94.
4. Ульянов В.А., Поляхов А.Д., П.Н. Савчук. Экспериментальные исследования и верификация излучательной модели инфракрасного облучателя ИЭТ-29 по результатам его тепловакуумных испытаний // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 12. С. 568–595.
5. Ульянов В.А., Поляхов А.Д., Савчук Н.П. Методика верификации излучательной модели инфракрасного облучателя ИЭТ-29 по результатам его тепловакуумных испытаний // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 4. С. 179–187.
6. Мешков В.В., Епанешников М.М. Осветительные установки // Энергия. 1972. С. 152–153.
7. Методическое пособие «Проектирование искусственного освещения общественных и жилых зданий», Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве» // Москва. 2016. раздел 1.6.1. С. 29–30.
8. Лабораторный практикум «Расчет освещенности от источников различного типа», Министерство образования республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, кафедра «Лазерная техника и технология» // Минск. БНТУ. 2020. раздел 3.1.1. С. 28–29.
9. ГОСТ Р 70380-2022. Лампы ультрафиолетовые бактерицидные низкого давления. Методы измерений энергетических характеристик ультрафиолетового излучения и электрических параметров. М.: Российский институт стандартизации, 2022. С. 8–9.
10. Шабарчин А.Ф., Зайцев А.Н., Ушакова А.А. и др. Изделие Э2. Программа и методика калибровочных испытаний модулей ИКИ ВК 600/300 // Пересвет. ФКП «НИЦ РКП». инвентарный номер Э2-2400-0 ПМ-7. 2014.
11. Палешкин А.В., Мамедова К.И. Моделирование расчетных внешних тепловых нагрузок к поверхности космического аппарата с помощью инфракрасных нагревателей // Труды МАИ. 2016. № 85.
12. Добрынина Д.Б., Ушакова А.А., Шабарчин А.Ф. и др. Моделирование внешних тепловых воздействий от инфракрасных источников излучения при испытаниях ракетно-космической техники в ВК-600/300 // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. № 3. С. 27–38.

References

1. Ulyanov VA, Solovyov MV. Optimization of Thermal Vacuum Tests of Space Complexes at the VK 600/300 Facility. *Polet*. 2009;82–93. (In Russ.).
2. Ulyanov VA, Sizyakov NP, Polyakhov AD. Finite element thermal model of the IET-29 infrared emitter and its verification based on the results of thermal vacuum tests. *Polet*. 2022;(4):3–21. (In Russ.).
3. Ulyanov VA, Sizyakov NP, Polyakhov AD et al. Construction and study of the radiative model of the IET-29 infrared emitter in the conditions of thermal vacuum testing of space technology products. *Polet*. 2023;(1–2): 81–94. (In Russ.).
4. Ulyanov VA, Polyakhov AD, Savchuk PN. Experimental studies and verification of the radiative model of the IET-29 infrared radiator based on the results of its thermal vacuum tests. *Thermal Processes in Engineering*. 2024;16:(12):568–595. (In Russ.).
5. Ulyanov VA, Polyakhov AD, Savchuk NP. Verification Methodology of the Radiative Model of the Infrared Irradiator IET-29 Based on the Results of Its Thermal Vacuum Tests. *Thermal Processes in Engineering*. 2025; 17(4):179–187. (In Russ.).
6. Meshkov VV, Epaneshnikov MM. Lighting installations. *Energiya*. 1979;152–153. (In Russ.).
7. Methodical manual «Design of artificial lighting of public and residential buildings», Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Federal Autonomous Institution «Federal Center for Norming, Standardization and Conformity Assessment in Construction». Moscow. 2016. section 1.6.1. pp. 29–30. (In Russ.).
8. Laboratory Workshop "Calculation of Illumination from Sources of Various Types", Ministry of Education of the Republic of Belarus, Belarusian National Technical University, Department of Laser Engineering and Technology. Minsk. BNTU. 2020. section 3.1.1. pp. 28–29. (In Russ.).

9. *Low-pressure ultraviolet bactericidal lamps. Methods for measuring the energy characteristics of ultraviolet radiation and electrical parameters. State Standart R 70380-2022.* Moscow. Russian Institute of Standardization. 2022. section 6.3. pp. 8–9. appendix G. pp. 17–19. (In Russ.).
10. Shabarchin AF, Zaitsev AN, Ushakova AA. Product E2. *Program and Methodology of Calibration Tests of IKI VK 600/300 Modules.* Peresvet. FKP «NITs rkp». Inventory Number E2-2400-0 PM-7. 2014 (In Russ.).
11. Paleshkin AV, Mamedova KI. Modeling of calculated external thermal loads to the surface of the spacecraft using infrared heaters. *Trudy MAI.* 2016;(85). (In Russ.).
12. Dobrynina DB, Ushakova AA, Shabarchin AF et al. Modeling of external thermal effects from infrared radiation sources during testing of rocket and space technology in VK-600/300. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerospace Engineering, Technology and Mechanical Engineering.* 2017;16(3):27–38. (In Russ.).