

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 4. С. 179–187
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 4, pp. 179–187

Научная статья
УДК 629.78
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185066>
EDN: <https://www.elibrary.ru/KPDHVA>

Методика верификации излучательной модели инфракрасного облучателя ИЭТ-29 по результатам его тепловакуумных испытаний

В.А. Ульянов¹, А.Д. Поляхов², П.Н. Савчук³

^{1,2,3}Федеральное казенное предприятие «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности», Пересвет, Российская Федерация
¹osduka@rambler.ru, ²alekdmtrpol@gmail.com

Аннотация. По результатам обработки экспериментальных данных, полученных в процессе тепловакуумных испытаний имитатора инфракрасного излучения тепловакуумной камеры ВК600/300 ФКП «НИЦ РКП», разработана методика и проведена верификация излучательной модели единичного облучателя ИЭТ-29.

Рассогласование рассчитанных по верифицированной модели и экспериментальных данных составляет примерно 5 %, что свидетельствует об адекватности построенной излучательной модели облучателя.

В процессе работ по верификации излучательной модели облучателя определены следующие искомые характеристики облучателя:

- высота подвеса излучающего элемента над выступом отражателя составила 13 мм;
- рассеиваемая излучающим элементом мощность и КПД облучателя, которые составляют примерно 1200–1300 Вт и 76,4 % соответственно, что практически совпадает со значениями, полученными по результатам теплового моделирования облучателя.

Ключевые слова: имитатор инфракрасного излучения, облучатель, излучающий элемент, отражатель, излучательная модель, пространственное распределение лучистых потоков, тепловакуумные испытания

Для цитирования. Ульянов В.А., Поляхов А.Д., Савчук П.Н. Методика верификации излучательной модели инфракрасного облучателя ИЭТ-29 по результатам его тепловакуумных испытаний // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 4. С. 179–187. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185066>

Original article

Experimental studies and verification of the radiative model of the infrared irradiator IET-29 based on the results of its thermal vacuum tests

V.A. Ulyanov¹, A.D. Polyakhov², P.N. Savchuk³^{1,2,3}Federal State Enterprise “Research and Testing Center for the Rocket and Space Industry”, Peresvet, Russian Federation¹osduka@rambler.ru[✉], ²alekmitrpol@gmail.com[✉]

Abstract. A technique has been developed and verification of the radiative model of the IET-29 irradiator has been carried out, on the basis of which the infrared radiation simulator of the VK600/300 thermal vacuum chamber of the Federal State Enterprise “Research Center of the Russian Communist Party” has been built.

The height of the suspension of the radiating element above the reflector protrusion determined by the results of thermal vacuum tests of the infrared radiation simulator of the VK600/300 thermal vacuum chamber and equal to about 13 mm best ensures the reproduction of the actual spatial distribution of the radiant flux from the irradiator.

The maximum average mismatch of the calculated model and experimental data is within 5 %, which allows us to conclude that the constructed radiative model of the IET-29 irradiator is adequate.

The design power dissipated by the radiating element at the power supplied to the irradiator at 1634 W is in the range of 1200 W ÷ 1300 W, which corresponds to the results of thermal simulation of the IET-29 irradiator.

The mutual angular mismatch of the irradiator No 33 and the reference plane determined by the surface of the receiving platforms of the radiant flux sensors relative to the nominal position was approximately 2 degrees.

The efficiency of the IET-29 irradiator was approximately 76,4 %, which practically coincides with the efficiency value obtained from the results of thermal modeling of the irradiator, which is 74,7 %.

The illumination zone of the irradiator is within the boundaries of ±1060 mm along the main transverse plane and ±2020 mm along the main longitudinal plane.

It is shown that even a slight discrepancy between the specified and actual angular positions of the rotary support device relative to the involved simulator struts can lead to an insufficiently accurate reproduction of the thermal load specified in the program and method of thermal vacuum tests.

The constructed and verified thermal and radiative models of the irradiator make it possible to solve methodological issues of simulating the external heat load at the stages of developing programs and methods for thermal vacuum testing of products, conducting technological modes for adjusting the simulator to the test object, adjusting the simulator operating modes during testing, as well as during the analysis of their results.

Keywords: infrared radiation simulator, irradiator, emitting element, reflector, radiative model, spatial distribution of radiant fluxes, thermal vacuum tests

For citation. Ulyanov V.A., Polyakhov A.D., Savchuk P.N. Experimental studies and verification of the radiative model of the infrared irradiator IET-29 based on the results of its thermal vacuum tests. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 4, pp. 179–187. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185066>

Введение

Проведенные тепловакуумные испытания имитатора инфракрасного излучения тепловакуумной камеры ВК600/300 ФКП «НИЦ РКП» [1] позволили по их результатам разработать и верифицировать конечно-элементную тепловую модель единичного источника инфракрасного излучения ИЭТ-29 [2], который является основой имитатора инфракрасного излучения упомянутой камеры. Необходимо отметить, что, решая задачи тепловакуумной отработки орбитального корабля «Буран», орбитальной станции «Мир», раскладываемых солнечных батарей и других крупногабаритных космических аппаратов, которые характеризуются сложными геометрическими формами наличием габаритных внешних элементов, образующими улавливающие падающее солнечное и планетное излучение, а также затенение ими элементов поверхности изделий. Одновременно тепловые макеты указанных изделий, предназначенных для испытаний, ввиду больших габаритов исключались из объектов испытаний, что вносило существенные отклонения от картины подводимых к объекту испытаний тепловых потоков в процессе испытаний по сравнению с орбитальными условиями. В связи с чем распределение по поверхности объекта испытаний подводимой к ней внешней тепловой нагрузки принимало вид лоскутного одеяла. Поскольку имитатор инфракрасного излучения тепловакуумной камеры вертикальных испытаний (КВИ) проектировался для воспроизведения внешней тепловой нагрузки на поверхности круговых цилиндров, поэтому пришлось решать нетривиальную задачу управления имитатором, который был для этого не предназначен. Эта задача была положительно решена [7], [8], [9], [10]. Предложенная в работе [6] методика проектирования перспективных источников инфракрасного излучения для применения в условиях тепловакуумных испытаний носит ограниченный характер, поскольку получаемые облучатели не могут обеспечить воспроизведение приведенной выше картины распределения подводимой к объекту испытаний тепловых потоков внешней тепловой нагрузки. Они могут использоваться для облучения гладких поверхностей простой формы. В работе [5] предложена методика проектирования и приведены результаты исследований и испытаний перспективных источников инфракрасного излучения на базе гало-

генных ламп, обеспечивающих наиболее точное воспроизведение сложных картин внешних тепловых нагрузок. Эта методика и легла в основу исследований излучательных характеристик облучателя ИЭТ-29.

Используя наработки по верификации тепловой модели, была построена излучательная модель облучателя [3], на которой проведены исследования особенностей пространственного распределения генерируемого им излучения в зависимости от положения излучающего элемента в отражателе. Показано, что основными факторами, определяющими пространственное распределение лучистых потоков, генерируемых облучателем, являются форма отражающей поверхности форма и положение излучающего элемента в отражателе. Поскольку при проведении тепловакуумных испытаний применяются облучатели в штатном исполнении, то основными параметрами, требующими уточнения, то есть верификации излучательной модели, являются высота подвеса излучающего элемента относительно выступа отражателя и мощность, рассеиваемая излучающим элементом.

Обработка экспериментальных данных по методике [4] обеспечила получение следующей информации, необходимой для осуществления верификации излучательной модели облучателя:

- определен перечень и условия проведения экспериментов, обеспечивающих получение достоверной информации, необходимой для осуществления верификации излучательной модели облучателя;
- рекомендовано использовать результаты измерения распределения лучистых потоков, полученных при работе облучателей на максимальных значениях подводимой к ним электрической мощности;
- рекомендовано при анализе экспериментальных данных не использовать результаты измерений плотности лучистых потоков датчиками, находящимися за пределами ± 1060 мм в главной поперечной плоскости, и за пределами ± 2000 мм – в главной продольной плоскости облучателя;
- рекомендовано для осуществления верификации излучательной модели облучателя использовать результаты экспериментов с облучателем № 33;
- установлено, что зависимость плотности теплового потока от подводимой к облучателю электрической мощности носит нелинейный характер;

– установлено, что пространственное распределение лучистых потоков не зависит от подводимой к облучателю электрической мощности и характеризуется отсутствием взаимозависимости распределения излучения в продольной и поперечной плоскостях облучателя.

Очевидно, что полученная информация является необходимым и достаточным условием для проведения верификации излучательной модели облучателя.

Предмет исследований

В соответствии с вышеизложенным и, учитывая рекомендации [3] и [4], предметом исследований являются определение:

- высоты подвеса излучающего элемента над выступом отражателя;
- энергетических характеристик облучателя;
- действительного взаимного расположения облучателей и средств измерения лучистых потоков при проведении экспериментов.

Методика верификации излучательной модели облучателя ИЭТ-29

В качестве исходных данных для проведения верификации излучательной модели облучателя, рисунок 1, [4] использовались результаты теплового моделирования облучателя ИЭТ-29 [2], приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Результаты теплового моделирования облучателя ИЭТ-29

Тепловой режим излучателя ИЭТ-29 № 33						
$\epsilon_{\text{зеркала}}$	$\epsilon_{\text{ленты}}$	Температура ленты в целом [°C]	Температура тыльной стороны ленты [°C]	Температура лицевой стороны ленты [°C]	Лучистый поток [Вт]	Мощность [Вт]
0,0175	0,74	859,42	814,13	781,77	1224,89	1634
0,018	0,75	778,85	743,08	715	837,37	1289
0,016	0,775	693,38	667,03	644	541,89	985
0,015	0,795	620,52	601,09	581	357,63	762

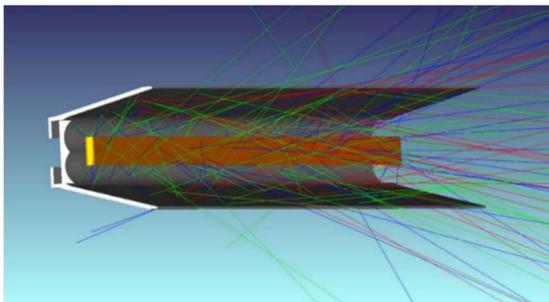


Рис. 1. Излучательная модель облучателя ИЭТ-29

Сущность принятой методики проведения верификации заключается в следующем:

1. В виду ограниченного количества средств измерений [1] и технической невозможности осуществить сканирование поля излучения облучателя ИЭТ-29 в условиях тепловакуумной камеры, не представляется возможным определить реальную картину пространственного распределения излучения, генерируемого облучателем.

2. Соответственно не могут быть определены и энергетические характеристики облучателя, а значит и не может быть решена задача верификации излучательной модели облучателя ИЭТ-29.

3. В связи с этим для определения энергетических характеристик облучателя и решения перечисленных выше задач по верификации излучательной модели использовался комбинированный метод исследования, заключающийся в сочетании расчетно-теоретического исследования с использованием построенной излучательной модели облучателя [3] с результатами обработки экспериментальных данных [1].

На первом этапе с учетом результатов теплового моделирования и рекомендаций [4] в качестве опорных значений использовались результаты измерения плотности теплового потока при работе облучателя № 33 на режиме подведенной к нему электрической мощности 1634 Вт [1], а также расчетное значение рассеиваемой излучающим элементом электрической мощности таблица 1.

Определение искомым высоты подвеса излучающего элемента над выступом отражателя и мощности, рассеиваемой излучающим элементом, осуществлялось методом последовательных приближений путем сравнения опорных значений плотности тепловых потоков и результатов расчетов, проводимых методом Монте-Карло, по разработанной излучательной модели [3].

Расчеты проводились для контрольной плоскости, расположенной на расстоянии 1000 мм от среза облучателя, при подведении к нему экспериментального значения электрической мощности равной 1634 Вт, что соответствовало условиям проведения тепловакуумных испытаний облучателей.

На втором этапе, используя результаты, полученные на первом этапе, аналогичным методом уточнялось взаимное расположение облучателя и датчиков лучистых с одновременной корректировкой высоты подвеса излучающего элемента и мощности, рассеиваемой излучающим элементом.

Результаты верификации излучательной модели по завершению этапов 1 и 2 приведены на рисунке 2 (а, б) и в таблице 2.

На третьем этапе осуществлялась проверка адекватности излучательной модели, верифицированной по результатам экспериментов с облучателем № 33.

Таблица 2. Сравнительный анализ результатов расчетных данных и данных экспериментов с облучателем ИЭТ-29 № 33 по распределению плотности теплового потока в главной поперечной плоскости на расстоянии 1000 мм от его среза

Наименование параметра	ДТП24	ДТП23	ДТП22	ДТП5	ДТП4	ДТП21	ДТП1	ДТП2	ДТП20	ДТП3	Мощность электрическая
Эксперимент Вт/м ²	2,17	3,11	10,66	76,88	273,54	395,50	473,39	411,95	336,13	170,34	На облучателе 1634 Вт
Расчет Вт/м ²	0,67	1,14	10,54	56,70	260,20	382,60	482,60	420,70	328,50	170,20	На излучающем элементе 1210 Вт
Разность «δ» Вт/м ²	1,50	1,97	0,12	20,18	13,34	12,90	-9,21	-8,75	7,63	0,14	
Среднее значение разности = 4,54 Вт/м ²						Среднеквадратическое отклонение разности $\sigma = 10,73$ Вт/м ²					
$\frac{\delta \times 100 \%}{\text{эксперимент}}$	69,21	63,38	1,10	26,24	4,88	3,26	-1,95	-2,12	2,27	0,08	Средняя разность в процентах $\bar{\delta} = 4,22 \%$ $\delta = 9,22 \%$
Примечание	Результаты измерений датчиками ДТП23 и ДТП24 исключены из рассмотрения ввиду нахождения значений измеряемых характеристик в пределах установленных погрешностей измерений										

Проверка адекватности излучательной модели по распределению плотности теплового потока в главной поперечной плоскости излучателя № 33 на расстоянии от его среза 1000 мм при подвешенной к нему электрической мощности 1634 Вт

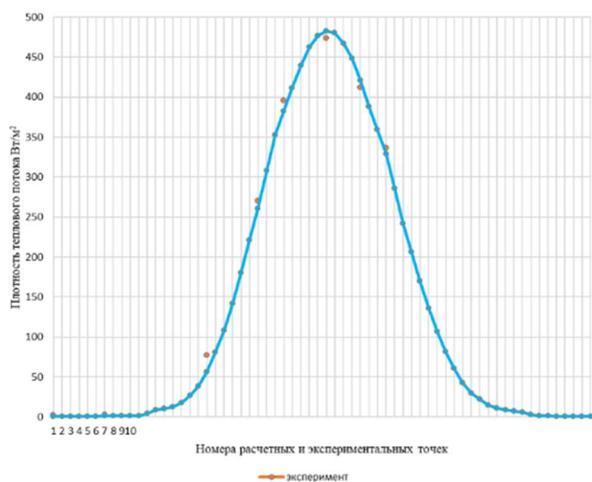


Рис. 2 а. Результаты сравнения экспериментальных данных по распределению плотности теплового потока в главной поперечной плоскости на расстоянии от среза облучателя 1000 мм, полученных по результатам экспериментов с облучателем № 33 при подвешенной к нему электрической мощности 1634 Вт, с результатами расчетов по модели с высотой подвеса излучающего элемента над выступом отражателя 13 мм, электрической мощностью, рассеиваемой излучающим элементом 1210 Вт, при угле разворота облучателя на 2,0 градуса вправо от номинального положения.

Проверка адекватности излучательной модели по распределению плотности теплового потока в главной продольной плоскости облучателя № 33 на расстоянии от его среза 1000 мм при подвешенной к нему электрической мощности 1634 Вт

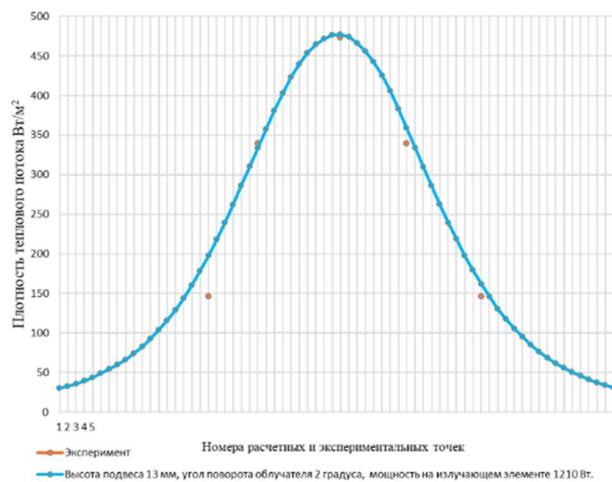


Рис. 2 б. Результаты сравнения экспериментальных данных по распределению плотности теплового потока в главной продольной плоскости на расстоянии от среза облучателя 1000 мм, полученных по результатам экспериментов с облучателем № 33 при подвешенной к нему электрической мощности 1634 Вт, с результатами расчетов по модели с высотой подвеса излучающего элемента над выступом отражателя 13 мм, электрической мощностью, рассеиваемой излучающим элементом 1210 Вт, при угле разворота облучателя на 2 градуса вправо от номинального положения

Методика проверки адекватности излучающей модели облучателя

Методика проверки адекватности верифицированной излучательной модели заключается в следующем:

- верифицированная по результатам экспериментов с облучателем № 33 с использованием показаний датчиков лучистых потоков, расположенных на расстоянии 1000 мм от его среза, излучательная модель положена в основу для проведения расчетов, как для датчиков, расположенных на расстоянии 1500 мм от среза облучателя, так и для результатов испытаний облучателя № 9.

В обоих случаях расчеты проводились методом Монте–Карло.

Проверка адекватности излучательной модели проводилась по результатам сравнения расчетных и экспериментальных значений плотности теплового потока, создаваемых облучателем № 33 в контрольной плоскости, расположенной на расстоянии 1500 мм от его среза.

Аналогично проводилась проверка адекватности излучательной модели применительно к результатам экспериментов с облучателем № 9.

Критерием для завершения верификации модели было принято среднее значение разности расчетных и экспериментальных данных, не превышающее 5 %.

Результаты проверки адекватности верифицированной излучательной модели облучателя приведены в таблицах 3, 4 и 5, а также на рисунке 3 (а, б, в).

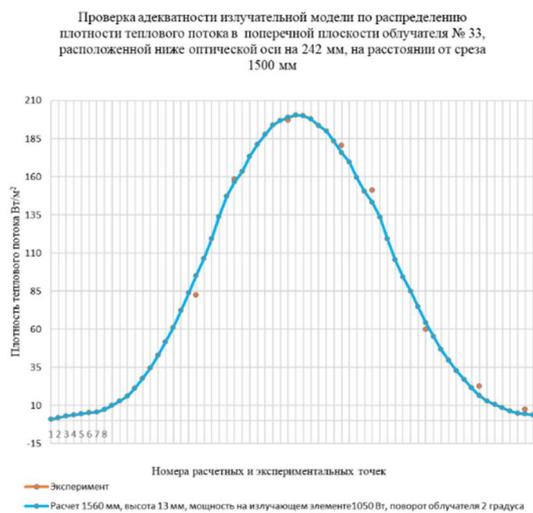


Рис. 3 а. Результаты сравнения экспериментальных данных по распределению плотности теплового потока в поперечной плоскости, расположенной ниже оптической оси облучателя на 242 мм, на расстоянии от среза облучателя 1500 мм, полу-

ченных по результатам экспериментов с облучателем № 33 при подведенной к нему электрической мощности 1634 Вт, с результатами расчетов по модели с высотой подвеса излучающего элемента над выступом отражателя 13 мм, электрической мощностью, рассеиваемой излучающим элементом 1050 Вт, при угле разворота облучателя на 2 градуса вправо от номинального положения

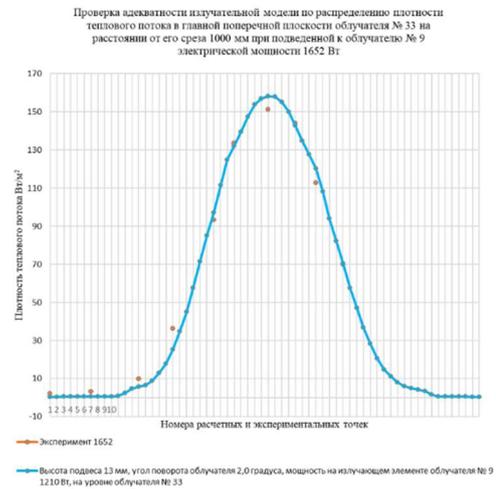


Рис. 3 б. Результаты сравнения экспериментальных данных по распределению плотности теплового потока в главной поперечной плоскости облучателя № 33 на расстоянии от его среза 1000 мм, полученному по результатам экспериментов с облучателем № 9 при подведенной к нему электрической мощности 1652 Вт, с результатами расчетов по модели с высотой подвеса излучающего элемента над выступом отражателя 13 мм, электрической мощностью, рассеиваемой излучающим элементом 1210 Вт, при угле разворота облучателя на 2,0 градуса вправо от номинального положения

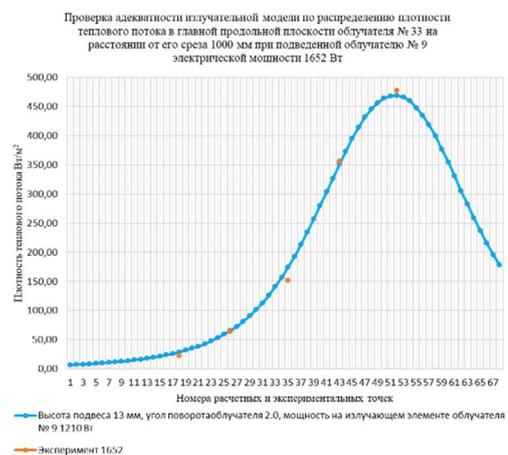


Рис. 3 в. Результаты сравнения экспериментальных данных по распределению плотности теплового потока в главной продольной плоскости облучателя № 33 на расстоянии от его среза 1000 мм, полученных по результатам экспериментов с облучателем № 9 при подведенной к нему электрической мощности 1652 Вт, с результатами расчетов по модели с высотой подвеса излучающего элемента над выступом отражателя 13 мм, электрической мощностью, рассеиваемой излучающим элементом 1210 Вт, при угле разворота облучателя на 2,0 градуса вправо от номинального положения

Таблица 3. Сравнительный анализ результатов расчетных данных и данных экспериментов с облучателем ИЭТ-29 № 33 по распределению плотности теплового потока в поперечной плоскости, расположенной ниже оптической оси облучателя на 242 мм, на расстоянии 1500 мм от его среза

Наименование параметра	ДТП 29	ДТП10	ДТП 8	ДТП 9	ДТП 30	ДТП 31	ДТП 32	ДТП 33	Мощность электрическая
Эксперимент Вт/м ²	82,24	158,31	197,08	180,49	151,28	59,93	22,56	7,44	На облучателе 1634 Вт
Расчет Вт/м ²	94,93	156,60	198,90	175,60	143,20	64,28	16,50	4,36	На излучающем элементе 1050 Вт
Разность «δ» Вт/м ²	-12,69	1,71	-1,82	4,89	8,08	-4,35	6,06	3,08	
Среднее значение разности = 0,62 Вт/м ²					Среднеквадратическое отклонение разности $\sigma = 6,75$ Вт/м ²				
$\frac{\delta}{\text{эксперимент}} \times 100 \%$	-15,43	1,08	-0,92	2,71	5,34	-7,26	26,86	41,37	Средняя разность в процентах $\bar{\delta} = 6,72 \%$ $\delta = 18,52 \%$

Таблица 4. Сравнительный анализ результатов расчетных данных и данных экспериментов с облучателем ИЭТ-29 № 33 по распределению плотности теплового потока в его главной продольной плоскости на расстоянии 1000 мм от его среза

Наименование параметра	ДТП7	ДТП26	ДТП1	ДТП25	ДТП6	Мощность электрическая
Эксперимент Вт/м ²	146,24	339,1	473,39	339,6	146,29	На облучателе 1634 Вт
Расчет Вт/м ²	161,90	334,10	476,80	358,80	161,90	На излучающем элементе 1210 Вт
Разность «δ» Вт/м ²	-15,66	5,00	-3,41	-19,20	-15,51	
Среднее значение разности = -9,78 Вт/м ²			Среднеквадратическое отклонение разности $\sigma = 20,4$ Вт/м ²			
$\frac{\delta}{\text{эксперимент}} \times 100 \%$	-10,71	1,47	-0,72	-5,65	-10,67	Средняя разность в процентах $\bar{\delta} = -5,26 \%$ $\delta = 11,18 \%$

Таблица 5. Сравнительный анализ результатов расчетных данных и данных экспериментов с облучателем ИЭТ-29 № 33 по распределению плотности теплового потока в главной поперечной плоскости на расстоянии 1000 мм от его среза

Наименование параметра	ДТП24	ДТП23	ДТП22	ДТП5	ДТП4	ДТП21	ДТП1	ДТП2	ДТП20	ДТП3	Мощность Электрическая
Эксперимент Вт/м ²	2,17	3,11	10,66	76,88	273,54	395,50	473,39	411,95	336,13	170,34	На облучателе 1634 Вт
Расчет Вт/м ²	0,67	1,14	10,54	56,70	260,20	382,60	482,60	420,70	328,50	170,20	На излучающем элементе 1210 Вт
Разность «δ» Вт/м ²	1,50	1,97	0,12	20,18	13,34	12,90	-9,21	-8,75	7,63	0,14	
Среднее значение разности = 4,54 Вт/м ²						Среднеквадратическое отклонение разности $\sigma = 10,73$ Вт/м ²					
$\frac{\delta \times 100 \%}{\text{эксперимент}}$	69,21	63,38	1,10	26,24	4,88	3,26	-1,95	-2,12	2,27	0,08	Средняя разность в процентах $\bar{\delta} = 4,22 \%$ $\delta = 9,22 \%$
Примечание	Результаты измерений датчиками ДТП23 и ДТП24 исключены из рассмотрения ввиду нахождения значений измеряемых характеристик в пределах установленных погрешностей измерений										

По результатам оценки адекватности излучательной модели облучателя ИЭТ-29, верифицированной по результатам экспериментов с облучателем № 33, можно сделать следующие выводы:

– для данных условий и результатов тепловакуумных испытаний имитатора инфракрасного излучения тепловакуумной камеры ВК600/300

ФКП «НИЦ РКП» наилучшие результаты продемонстрировала излучательная модель с высокой подвеса излучающего элемента над выступом отражателя 13 мм;

– расчетная мощность, рассеиваемая излучающим элементом при подведенной к облучателю мощности 1634 Вт, находится в пределах

1200 Вт ÷ 1300 Вт, что соответствует результатам теплового моделирования облучателя ИЭТ-29, приведенным в таблице 1;

– взаимное угловое рассогласование облучателя № 33 и контрольной плоскости, определенной поверхностью приемных площадок датчиков лучистых потоков, относительно номинального положения составило примерно 2 градуса.

Из приведенных в таблицах 2, 3, 4, 5 данных следует, что максимальное среднее рассогласование расчетных и экспериментальных данных находится в пределах 5 %. Это означает, что можно утверждать об адекватности построенной излучательной модели облучателя ИЭТ-29. При этом определенная по результатам верификации высота подвеса излучающего элемента над выступом отражателя, составляющая 13 мм обеспечивает воспроизведение действительного пространственного распределения лучистого потока от облучателя.

КПД облучателя ИЭТ-29 составил примерно 76,4 %, что практически совпадает со значением КПД, полученным по результатам теплового моделирования облучателя, составляющим 74,7 %.

Необходимость определения зон засветки облучателя определяется габаритами объекта испытаний, но в первом приближении допускается их ограничить в пределах ± 1060 мм по главной поперечной плоскости и ± 2020 мм по главной продольной плоскости.

Заключение

Разработана методика и проведена верификация излучательной модели облучателя ИЭТ-29, на основе которого построен имитатор инфракрасного излучения тепловакуумной камеры ВК600/300 ФКП «НИЦ РКП».

Определенная по результатам тепловакуумных испытаний имитатора инфракрасного излучения тепловакуумной камеры ВК600/300 ФКП «НИЦ РКП» высота подвеса излучающего элемента над выступом отражателя, составляющая 13 мм, наилучшим образом обеспечивает воспроизведение действительного пространственного распределения лучистого потока от облучателя.

Максимальное среднее рассогласование расчетных и экспериментальных данных находится в пределах 5 %, что позволяет сделать вывод об адекватности построенной излучательной модели облучателя ИЭТ-29.

Расчетная мощность, рассеиваемая излучающим элементом при подведенной к облучателю мощности 1634 Вт, находится в пределах 1200 Вт ÷ 1300 Вт, что соответствует результатам теплового моделирования облучателя ИЭТ-29.

Взаимное угловое рассогласование облучателя № 33 и контрольной плоскости, определенной поверхностью приемных площадок датчиков лучистых потоков, относительно номинального положения составило примерно 2 градуса.

КПД облучателя ИЭТ-29 составил примерно 76,4 %, что практически совпадает со значением КПД, полученным по результатам теплового моделирования облучателя и составляющим 74,7 %.

Зона засветки облучателя находится в границах ± 1060 мм по главной поперечной плоскости и ± 2020 мм по главной продольной плоскости.

Показано, что даже незначительное несоответствие заданного и действительного углового положения опорно-поворотного устройства относительно задействованных стоек имитатора может приводить к недостаточно точному воспроизведению заданной в программе и методике тепловакуумных испытаний тепловой нагрузки.

Построенные и верифицированные тепловая и излучательная модели облучателя позволяют решать методические вопросы имитации внешней тепловой нагрузки на этапах разработки программ и методик тепловакуумных испытаний изделий, проведения технологических режимов по настройке имитатора на объект испытаний, корректировке режимов работы имитатора в процессе испытаний, а также при анализе их результатов.

Список источников

1. 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», 2014. 47 с.
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 // Полет. 2022. № 4. С. 3–21.
3. Ульянов В.А., Сизяков Н.П., Поляхов А.Д. и др. Построение и исследование излучательной модели инфракрасного излучателя ИЭТ-29 в условиях тепловакуумных испытаний изделий космической техники // Полет. 2023. № 1–2. С. 81–94.
4. Ульянов В.А., Поляхов А.Д., Савчук П.Н. 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., Соловьев М.В. Оптимизация тепловакуумных испытаний космических комплексов на установке ВК 600/300 // Полет. 2009. С. 82–93.
6. Колесников А.В., Палешкин А.В., Шеметова Е.В. Имитаторы тепловых нагрузок с диффузно излучающими модулями в строго ограниченном телесном угле // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 4.
7. Афанасьев И.А., Беляков А.А., Ульянов В.А. и др. Метод оптимизации режимов работы имитатора инфракрасного излучения в процессе комплексных термовакуумных испытаний КА // науч.-техн. сб. РКТ. Серия IV. 1984. № 9. 1984. С. 89–111.
8. Новиков С.Б., Мишин Г.С., Беляков А.А. и др. Авторское свидетельство № 244009. МПК В64G 7/00. Способ тепловакуумных испытаний ЛА. Заявка № 317616 от 31.07.1985. 01.10.1986.
9. Ульянов В.А., Новиков С.Б. и др. Руководство для конструкторов по обеспечению тепловых режимов. Методы и средства экспериментальной отработки систем обеспечения теплового режима летательных аппаратов. Королев: ЦНИИмаш. 1991. Т 5. № 1. 182 с.
10. ОСТ 92-9698-91. Средства орбитальные. Методы испытаний при тепловой отработке. М., 1991.

References

1. Shabarchin AF, Zaitsev AN, Ushakova AA et al. *Product E2. Program and methodology of calibration tests of ICI VK 600/300 modules*. Peresvet: FKP «NITs RKP»; 2014. (In Russ.).
2. Ul'yanov VA, Sizyakov NP, Polyakhov AD. Finite element thermal model of the IET-29 infrared radiator and its verification based on the results of thermal vacuum tests. *Polet*. 2022;(4):3–21. (In Russ.).
3. Ul'yanov VA, Sizyakov NP, Polyakhov AD et al. Construction and research of the radiative model of the IET-29 infrared radiator in the conditions of thermal vacuum tests of space technology products. Moscow. *Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal. Polet*. 2023;(1–2): 81–94. (In Russ.).
4. Ul'yanov VA, Polyakhov AD, Savchuk PN. Experimental studies and verification of the radiative model of the infrared irradiator IET-29 based on the results of its thermal vacuum tests. *Thermal processes in engineering*. 2024;16(12):568–595. (In Russ.).
5. Ul'yanov VA, Solov'ev MV. Optimization of thermal vacuum tests of space complexes at the VK 600/300 installation. *Polet*. 2009;82–93. (In Russ.).
6. Kolesnikov AV, Paleshkin AV, Shemetova EV. Heat load simulators with diffusely emitting modules in a strictly limited thermal angle. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashino-stroenie*. 2018;(4). (In Russ.).
7. Afanas'ev IA, Belyakov AA, Ul'yanov VA et al. Method of optimizing the operating modes of the infrared radiation simulator during complex thermal vacuum tests of the spacecraft. *Scientific and technical Sat RCT. Series IV*. 1984;(9):89–111. (In Russ.).
8. Novikov SB, Mishin GS, Belyakov AA et al. Copyright certificate No. 244009. IPC B64G 7/00. *Method of thermal vacuum tests of aircraft*. Application No. 317616. 01.10.1986. (In Russ.).
9. Ul'yanov VA, Novikov SB et al. *Guide for designers to ensure thermal conditions. Methods and means for experimental testing of systems for ensuring the thermal regime of aircraft*. Korolev: TsNIIImash. 1991. Vol. 5. № 1. 182 p. (In Russ.).
10. OST 92-9698-91. *Orbital means. Test methods for thermal processing*. Moscow, 1991. (In Russ.).