

Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 6. С. 283–292
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 6, pp. 283–292

Научная статья
УДК 629.7:620.22:536.2

Экспериментально-теоретическое исследование пространственного распределения облученности, создаваемой инфракрасным облучателем ИЭТ-29 в условиях тепловакуумных испытаний изделий космической техники

Б.Ю. Ященко 

Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, Химки, Россия

 IAshchenkoBIU@laspace.ru

Аннотация. Работа посвящена экспериментально-теоретическим исследованиям распределения поверхностной плотности мощности теплового излучения от модуля теплового излучения типа ИЭТ-29, используемого для имитации внешнего теплового воздействия при проведении тепловакуумных испытаний изделий космической техники. По результатам экспериментальных исследований выявлены особенности в работе излучателя типа ИЭТ-29, связанные с изменением положения излучающего элемента в отражателе при нагреве до рабочих температур. С помощью численного моделирования с использованием методики, базирующейся на применении конечно-элементной модели теплового излучателя ИЭТ-29, определены условия, при которых воспроизводятся отмеченные в ходе экспериментальных исследований особенности. Экспериментальные исследования подтвердили наличие теоретически предсказанной существенной зависимости облученности, создаваемой модулем ИЭТ-29, от положения излучателя в его отражателе.

Ключевые слова: тепловакуумные испытания, датчик тепловых потоков, модуль инфракрасного излучения, тепловое излучение, вакуумная камера

Для цитирования. Ященко Б.Ю. Экспериментально-теоретическое исследование пространственного распределения облученности, создаваемой инфракрасным облучателем ИЭТ-29 в условиях тепловакуумных испытаний изделий космической техники // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 6. С. 283–292. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=182463>

Original article

Experimental and theoretical study of the spatial distribution of irradiance created by the infrared irradiator IET-29 under conditions of heat-vacuum testing of space equipment products

B.Yu. Yashchenko 

Lavochkin Science and Production Association, Khimki, Russia

 IAshchenkoBIU@laspace.ru

Abstract. The work is devoted to experimental and theoretical studies of the distribution of surface power density of thermal radiation from the thermal radiation module of IET-29 type used for simula-

tion of external thermal impact during thermal vacuum testing of space technology products. According to the results of experimental studies, the peculiarities in the operation of the IET-29 type radiator related to the change of the position of the radiating element in the reflector during heating to operating temperatures have been revealed. By means of numerical modeling, using the methodology based on the finite element model of the IET-29 thermal radiator, the conditions under which the peculiarities noted in the course of experimental studies are reproduced have been determined. Experimental studies have confirmed the existence of the theoretically predicted significant dependence of irradiance created by the IET-29 module on the position of the radiator in its reflector.

Keywords: thermal vacuum testing, thermal flux sensor, infrared radiation module, thermal radiation, vacuum chamber

For citation. Yashchenko B.Yu. Experimental and theoretical study of the spatial distribution of irradiance created by the infrared irradiator IET-29 under conditions of heat-vacuum testing of space equipment products. *Thermal processes in engineering*, 2024, vol. 16, no. 6, pp. 283–292. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=182463>

Введение

Для вновь создаваемых и модернизируемых космических аппаратов (КА) в обязательном порядке (ГОСТ 56519-2015) проводятся тепловакуумные испытания (ТВИ) [1]. В результате ТВИ проводится исследование тепловых режимов, технических характеристик системы обеспечения теплового режима, характеристик теплообмена КА при возможных режимах эксплуатации [1, 2, 3]. Исходя из условий эксплуатации КА его опытный (штатный) образец или тепловой макет при проведении ТВИ подвергается внешним тепловым нагрузкам в условиях вакуумной камеры (ВК). Внешние тепловые нагрузки могут создаваться с помощью различных нагревательных элементов, расположенных на поверхности вокруг объекта испытаний или на его поверхности. Достоинства и недостатки каждого из методов создания внешних тепловых нагрузок приведены в работе [4]. Наиболее универсальным методом имитации внешних тепловых нагрузок является комбинированный метод, включающий воспроизведение подводимого к объекту испытаний прямого солнечного излучения и имитацию с помощью инфракрасных (тепловых) источников излучения распределения по его поверхности суммарных поглощенных потоков излучения [4]. Таким образом, при проведении ТВИ одним из основных элементов для воспроизведения внешних является источник инфракрасного излучения (ИКИ), в частности инфракрасный имитатор, используемый в тепловакуумной камере ВК 600/300

ФКП «НИЦ РКП». Основным модулем ИКИ является инфракрасный облучатель типа ИЭТ-29. Расчетные модели по определению некоторых оптических характеристик модуля ИКИ (ε – степени черноты излучающего элемента, внутренней и тыльной сторон отражателя) были проведены в работах [5, 6, 7]. Среди результатов исследований по распределению теплового излучения, создаваемого модулем ИКИ на нескольких контрольных поверхностях [5, 6, 7], были выявлены существенные зависимости пространственного распределения плотности лучистого потока, создаваемого модулем ИКИ, от положения излучающего элемента в отражателе. Особенности конструкции облучателя ИЭТ-29, не предусматривающие жесткую фиксацию положения излучающего элемента в отражателе, специализированный профиль отражающего элемента и большая продольная вытянутость всей конструкции потребовали проведения дополнительных исследований по уточнению индикатрисы излучения модуля ИКИ. В данной работе проведены экспериментальные и теоретические исследования этих особенностей для их последующего учета при имитации внешних тепловых нагрузок при проведении ТВИ изделий космической техники.

Постановка задачи и предмет исследований

Имитатор инфракрасного излучения тепловакуумной камеры ВК 600/300 ФКП «НИЦ РКП» представляет собой совокупность отдельных модулей ИКИ, размещенных на цилиндрическом

каркасе внутри объема ВК. Каркас имеет приваренные кронштейны и платы для прокладки, фиксации и подсоединения модулей ИКИ, а также держатели модулей ИКИ с механизмами юстировки. Цилиндрический каркас размещается в рабочем объеме ВК 600/300 перед азотными экранами таким образом, что модули ИКИ условно располагаются вдоль образующих поверхности кругового цилиндра диаметром 4,95 м, соосного с цилиндрическим корпусом ВК 600/300 [4].

Штатные модули ИКИ по высоте размещаются в восьми ярусах. На каждом ярусе по 24 равномерно расположенных по окружности модуля ИКИ (рис. 1). Нижние концы модулей 1-го яруса возвышаются над плоскостью опорно-поворотного устройства на 1 м. ИКИ имеет два исполнения: первое – модули ИКИ образуют условно замкнутую цилиндрическую поверхность, второе – модули ИКИ не устанавливаются в зоне оптического отсека ВК 600/300, когда в процессе ТВИ предусмотрено включение имитатора солнечного излучения. Модули ИКИ установлены на каркасе ВК таким образом, чтобы их оптические оси пересекали вертикальную ось ВК (рис. 1). Для обеспечения равномерности излучения по высоте ВК модули ИКИ имеют вытянутую форму, типичная длина стандартного модуля составляет 960 мм.

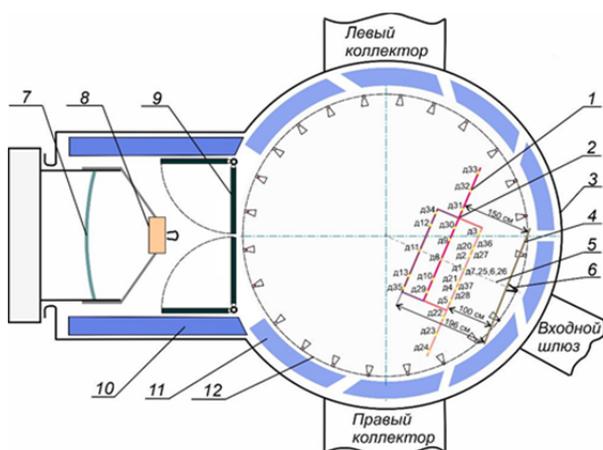


Рис. 1. Схематическое расположения модулей ИКИ в рабочем объеме ВК 600/300: 1 – датчики тепловых потоков (ДТП); 2 – элементы алюминиевого каркаса, используемого для установки ДТП; 3 – корпус ВК; 4 – условная плоскость среза отражателя модуля ИКИ № 9; 5 – оптическая ось модуля ИКИ; 6 – штатные модули ИКИ; 7 – зеркальный отражатель имитатора солнечного излучения (ИСИ); 8 – излучатель ИСИ; 9 – створки ИСИ; 10 – экраны модуля ИСИ; 11 – азотные экраны ВК; 12 – круговая поверхность закрепления модулей ИКИ.

Модуль инфракрасного излучателя типа ИЭТ-29 состоит из двух основных частей (рис. 2): отражателя корытообразного сечения, изготовленного из алюминиевого сплава АМЦ, и нагревателя в виде токопроводящей графитированной вискозной ленты $1 \times 20 \times 1210 \pm 5$ мм, натянутой вдоль алюминиевого отражателя (рис. 2). В инфракрасной области спектра такие излучатели модуля ИКИ можно считать серыми с интегральной степенью черноты, приблизительно равной $\epsilon \approx 0,86$.

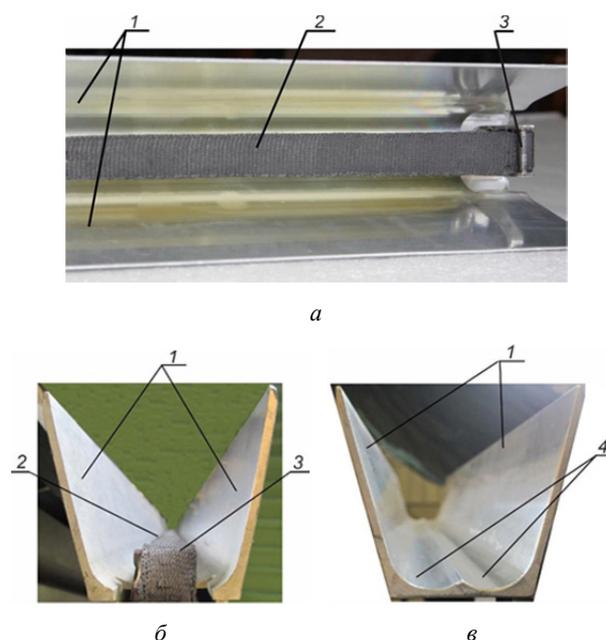


Рис. 2. Модуль ИКИ типа ИЭТ-29: а – вид спереди на фрагмент модуля ИКИ, б – вид сбоку, в – профиль отражателя без излучающего элемента (1 – боковые поверхности отражателя, 2 – излучающий элемент, 3 – опоры токопроводящей ленты, 4 – донная часть отражателя)

Отражатель состоит из двух боковых поверхностей в виде равнобедренной трапеции с углом наклона боковых поверхностей, составляющим 15° (рис. 11). Максимальное расстояние между поверхностями в выходном срезе отражателя составляет 84 мм. Поверхность отражателя модуля ИКИ, обращенная к внутренней стороне излучателя модуля ИКИ, выполнена в виде двух пересекающихся цилиндрических поверхностей, центральные оси которых совпадают с кромками излучателя (рис. 2).

Внутренняя поверхность отражателя модуля ИКИ полирована и имеет коэффициент отражения $\rho \approx 0,94$. Наружная поверхность для снижения температуры отражателя модуля ИКИ

и доли его собственного излучения в индикатрисе модуля ИКИ покрыта окисью никрома со степенью черноты $\epsilon \approx 0,86$.

Ввиду больших линейных удлинений, связанных с большими линейными размерами и высоким перепадом температур, излучающий элемент имеет только одну жесткую фиксацию между токоподводами. Продольное натяжение излучающего элемента для компенсации влияния тепловых деформаций осуществляется с помощью дугообразной плоской пружины из бронзы (рис. 3).

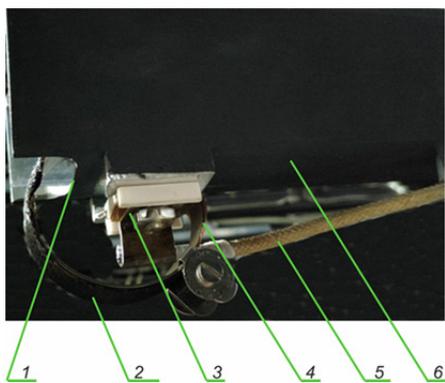


Рис. 3. Фрагмент элемента модуля ИКИ с подвижным узлом фиксации: 1 – вырез в донной части отражателя, 2 – токопроводящая лента (излучатель), зафиксированная на подвижной опоре, 3 – крепление контакта, 4 – дугообразная латунная пружина, 5 – токоподвод, 6 – наружная поверхность отражателя

Наличие отражателя позволяет существенно поднять КПД модуля излучения по сравнению с модулями излучения без отражателя и существенно снизить тепловую нагрузку от излучателя на азотные экраны ВК. Но для постоянства индикатрисы излучения модуля ИКИ на всех уровнях электрической мощности в его конструкции должно обеспечиваться стабильное (неизменное) взаимное расположение излучателя и отражателя.

Условия проведения исследований и экспериментальное оборудование

В калибровочных экспериментальных исследованиях индикатрисы излучения модулей ИКИ типа ИЭ-29 был задействован модуль ИКИ № 9 (рис. 1), имеющий индивидуальный канал управления и источник питания.

При определении энергетических характеристик модулей ИКИ исследовалось поле облученности контрольных плоскостей, расположенных

в рабочем объеме ВК 600/300 по нормали к оси симметрии модулей ИКИ № 9, 33, 57 на расстояниях 1 м, 1,5 м и 1,96 м от среза отражателей модулей ИКИ (рис. 1). Экспериментальные исследования были проведены в следующих условиях, соответствующих условиям проведения ТВИ:

- для имитации разреженности среды космического пространства остаточное давление внутри ВК 600/300 составляло $(4,0 \times 10^{-6} \dots 1,8 \times 10^{-6})$ мм рт. ст.;

- для уменьшения температурного влияния стенок ВК на результаты исследований температура азотных экранов поддерживалась в диапазоне от минус 190 до минус 170 °С;

- снижение влияния стенок ВК на переотражение излучения достигалось покрытием отражающих поверхностей, обеспечивающим степень черноты ϵ не менее 0,9.

В контрольных плоскостях с определенным угловым шагом относительно модулей ИКИ были размещены датчики теплового потока (ДТП). ДТП представляют собой тонкую квадратную поверхность размером 60×60 мм². Внешняя рабочая поверхность ДТП зачернена (полусферическая степень черноты близка к единице) с целью минимизации тепловой связи с изделием тыльная сторона ДТП закрыта экранно-вакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ).

В ДТП вмонтирован датчик температуры, который регистрирует равновесную температуру ДТП в процессе проведения ТВИ. Для пересчета зарегистрированных ДТП температур в значения плотности приходящего потока теплового излучения (облученности) Q использовалась кривая (рис. 4).

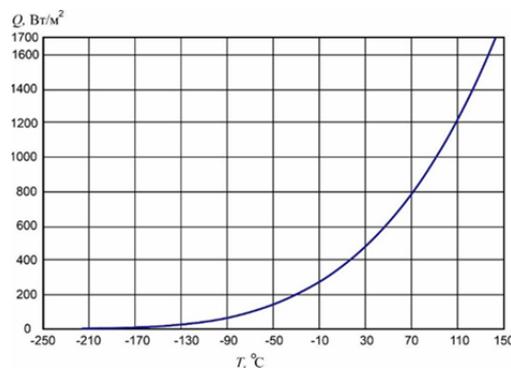


Рис. 4. Зависимость температуры T ДТП от величины плотности потока приходящего (падающего на его поверхность) излучения Q

ДТП были смонтированы на специальном каркасе, который представлял собой сваренную из алюминиевых труб прямоугольную конструкцию. Общий вид каркаса с ДТП вне ВК 600/300 представлен на рис. 5.



Рис. 5. Вид собранной конструкции с установленными на траверсах ДТП перед ее установкой в вакуумную камеру ВК-600/300

Каркас с ДТП устанавливался на опорно-поворотном устройстве ВК таким образом, чтобы плоскость ДТП была параллельна плоскости среза отражателя модуля ИКИ (рис. 1). На рис. 6 показана схема каркаса экспериментальной установки с указанием основных геометрических характеристик и положение датчиков относительно исследуемого модуля ИКИ № 9.

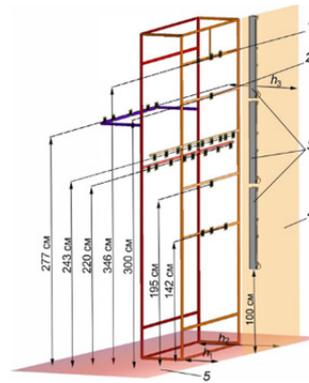


Рис. 6. Расположение конструкции каркаса с ДТП по отношению к модулям ИКИ: 1 – элементы конструкции; 2 – ДТП; 3 – модули ИКИ; 4 – условная плоскость среза отражателя модуля ИКИ; 5 – плоскость крепления конструкции к опорно-поворотному устройству ВК

С использованием средств измерений ВК 600/300 была проведена регистрация и первичная обработка с отображением следующих параметров:

- температур по температурным датчикам, установленным на конструкции ВК 600/300;
- температур по термопарам, установленным на излучателях и отражателях модулей ИКИ;
- температур по ДТП;
- давления в рабочем объеме ВК 600/300;

Результаты измерений в режиме реального времени фиксировались с помощью программного обеспечения контрольно-проверочной аппаратуры установки ВК600/300 (рис. 7).

Погрешность измерения температуры не превышала $\pm 2\%$ от диапазона измерения.

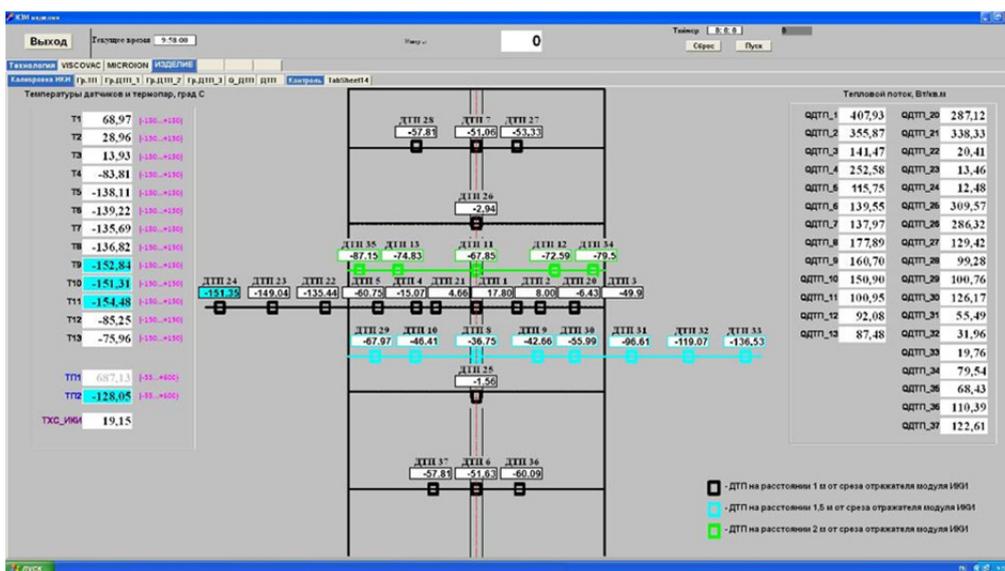


Рис. 7. Мнемосхема данных, полученных во время эксперимента

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 8 показана схема расположения ДТП в проекции на плоскость среза отражателя исследуемого модуля ИКИ с указанием расстояния центра ДПП от продольной оси симметрии излучателя и номера датчика. Цветовым спектром отображается величина облученности Q поверхности ДТП.

Результаты измерений плотности тепловых потоков излучения Q (Вт/м²) датчиками ДПП, полученные в ходе проведения экспериментальных исследований, показаны на рис. 9. Цифрами обозначены номера ДПП. Расстояние от плоскости среза отражателя до поверхности ДПП: $h_1=1$ м, $h_2=1,5$ м, $h_3=1,96$ м (рис. 8). Данные приведены для двух режимов. Режим № 1 (рис. 9 а) соответствует средней температуре токопроводящей графитированной вязкой ленты 926 К при мощности излучателя 1634 Вт. Режим № 2 (рис. 9 б) соответствует температуре токопроводящей ленты 864 К при мощности излучателя 1293 Вт.

Сопоставление результатов эксперимента с расчетными моделями

Согласно полученным результатам экспериментальных данных наблюдается разница в плотности тепловых потоков Q (Вт/м²) для ДПП, находящихся на одинаковом расстоянии от плоскости среза отражателя модуля ИКИ и равноудаленных от продольной оси симметрии отражателя. Это указывает на нарушение симметричности в системе излучатель-отражатель в модуле ИКИ типа ИЭТ-29. В табл. 1 приведены данные по отклонениям в показаниях для симметрично расположенных ДПП, рассчитанные по формуле:

$$N = \frac{Q_1}{Q_2} \times 100 - 100,$$

где Q_1 (Вт/м²) – значение плотности теплового потока, приходящего на датчик 1,

Q_2 (Вт/м²) – значение плотности теплового потока излучения, приходящего на датчик 2. Оба датчика расположены на одной высоте и симметрично относительно проекции продольной оси симметрии отражателя модуля ИКИ на плоскость, в которой расположены датчики (табл. 1).

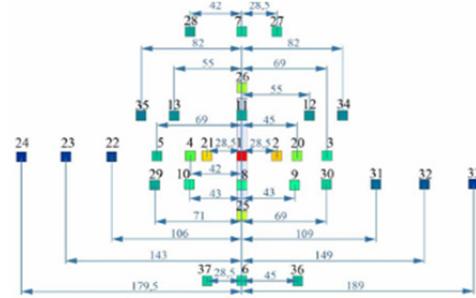
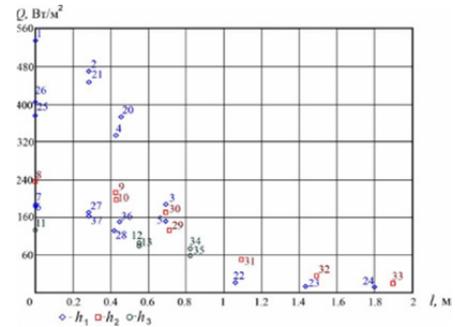
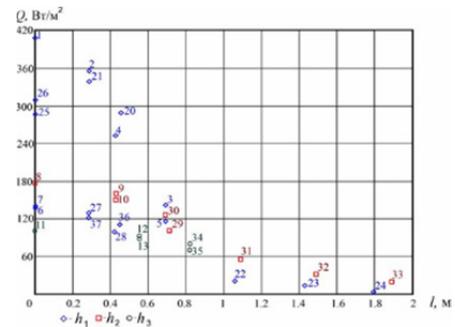


Рис. 8. Схема расположения ДПП



а



б

Рис. 9. Значения плотности тепловых потоков Q в зависимости от расстояния l до проекции продольной оси симметрии отражателя модуля ИКИ на контрольную плоскость: а – режим № 1, б – режим № 2

Таблица 1. Значения отклонений измеренной плотности потока теплового излучения для симметрично расположенных датчиков

Расстояние от среза модуля ИКИ		1 метр		1,5 метра	1,96 метра	
Номер ДПП 1, Номер ДПП 2		ДТП № 2, ДТП № 21	ДТП № 3, ДТП № 5	ДТП № 9, ДТП № 10	ДТП № 12, ДТП № 13	ДТП № 34, ДТП № 35
Превышение плотности теплового потока, N %	Режим № 1	+5,06	+23,8	+7,07	+4,95	+18,05
	Режим № 2	+4,9	+22,06	+6,79	+4,58	+17,45

По результатам испытаний (табл. 1) видно, что несимметричность плотности потока излучения, создаваемого модулем ИКИ на режиме № 1, мало отличается от результатов, полученных при испытании на режиме № 2 (в пределах 2 %). С использованием методики [8, 9] и разработанного программного комплекса [10] было проведено численное моделирование различных возможных вариантов расположения излучателя относительно отражателя модуля ИКИ. При проведении расчетных исследований максимально воссоздавались условия эксперимента. Расчетная модель модуля ИКИ (все участвующие в теплообмене излучением поверхности) разбивалась на 218316 конечных треугольных элементов (рис. 10). Размер треугольной ячейки выбран из условия возможности получения результатов с достаточной точностью при оптимальном машинном времени расчета. Средний размер ячейки (максимальное расстояние между вершинами треугольного элемента) составил 2,6 мм.

Как и в эксперименте, напротив облучателя на расстоянии h_1 , h_2 и h_3 от среза отражателя модуля ИКИ (рис. 6) задавались квадратные поверхности размером 60×60 мм, геометрически совпадающие с положением регистрирующих поверхностей ДТП относительно модуля ИКИ (рис. 8). Поскольку эти площадки являлись поверхностями суммирования, то есть определялось все тепловое излучение, пришедшее на данную площадку, то и разделялись они только на две равные треугольные площадки (по диагонали). По известным оптическим, геометрическим и энергетическим характери-

кам определялась плотность потока излучения модуля ИКИ, приходящего на эти площадки.

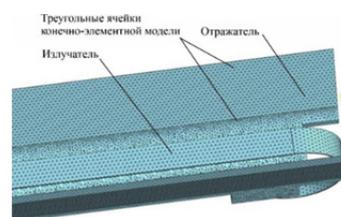


Рис. 10. Фрагмент конечно-элементной модели модуля ИКИ, используемой в расчете теплового излучения

Расчеты проводились для разных возможных положений излучающей графитированной вискозной ленты внутри отражателя. В соответствии с конструкцией излучателя только один край ленты крепился на токоподвод с жесткой конструкцией фиксации (рис. 2 а). Полученный массив данных по облученности поверхностей суммирования сравнивался с экспериментальными данными по облученности ДТП. В табл. 2 представлены полученные данные для двух режимов излучения, которые максимально коррелируют с результатами экспериментальных исследований. Соответствующее рассчитанное распределение плотности потока излучения получалось при смещении излучателя относительно начального положения до 1,2 мм вправо по ширине профиля отражателя и до 2 мм вниз по высоте отражателя (рис. 11). Кроме того, излучающая лента поворачивалась вдоль продольной оси на угол до 3°. Расхождение экспериментальных данных и расчетных (с указанными параметрами положения излучателя) не превышала 2,2 %.

Таблица 2. Плотность потока теплового излучения при смещении излучающего элемента

Расстояние от среза модуля ИКИ 1 метр										
Номер датчика		1	2	3	4	5	20	21	22	23
Облученность, Q Вт/м ²	№ 1	536,2	468,0	179,4	329,3	150,6	367,5	450,6	22,8	14,4
	№ 2	408,8	359,5	141,0	250,3	114,3	290,1	339,5	20,6	13,4
Номер датчика		24	25	6	7	26	27	28	36	37
Облученность, Q Вт/м ²	№1	13,1	405,5	181,8	184,8	371,2	168,9	129,8	149,3	164,3
	№ 2	12,6	306,0	140,6	137,3	288,6	130,9	98,2	109,9	121,8
Расстояние от среза модуля ИКИ 1,5 метра										
Номер датчика		8	9	10	29	30	31	32	33	
Облученность, Q Вт/м ²	№1	233,8	206,6	195,0	130,3	169,6	71,5	37,3	21,4	
	№2	177,0	159,1	151,5	100,8	126,0	55,5	31,7	19,8	
Расстояние от среза модуля ИКИ 1,96 метра										
Номер датчика		11	12	13	34	35				
Облученность, Q Вт/м ²	№ 1	133,0	120,3	116,2	106,5	89,1				
	№ 2	102,4	91,2	86,7	79,0	67,7				

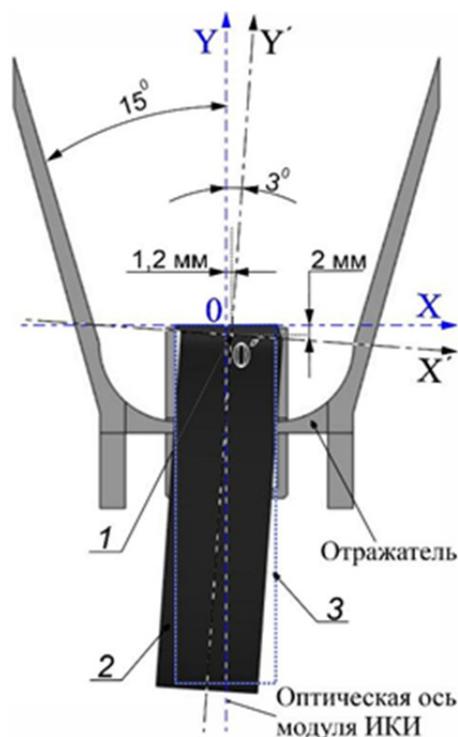


Рис. 11. Изменение положения излучающего элемента внутри отражателя: 1 – максимальное смещение продольной оси симметрии излучателя (графитированной ленты) относительно начального положения; 2 – смещение излучателя в результате теплового расширения; 3 – положение излучателя до нагрева

На рис. 12 показано расположение поверхностей ДТП относительно модуля ИК и ВК. Углы расположения ДТП 5 и ДТП 3, составляющие $34,6^\circ$ от центра датчика до оптической оси модуля ИКИ (рис. 12), для которых была экспериментально установлена максимальная несимметричность плотности потока излучения $N = 23,8\%$ (табл. 1), приблизительно соответствуют углу 38° между оптической осью модуля ИКИ и ограничением рабочей зоны ВК (рис. 12). В связи с этим дальнейшее возможное несоответствие (несимметричность) тепловых потоков от модуля ИКИ не оказывает прямого воздействия на объект испытаний. Установленная в ходе экспериментальных исследований погрешность не превышает $5,1\%$ в угле раствора плоских стенок отражателя, составляющем 30° (соответственно 15° от оптической оси), и быстро увеличивается. Так, на угле расположения ДТП 35 и ДТП 34, составляющем $22,7^\circ$ с осью симметрии модуля ИКИ, превышение облученности ДТП 34 над облученностью ДТП 35 составляет $17...18\%$ (табл. 1).

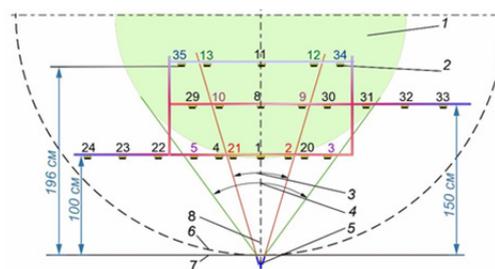


Рис. 12. Расположение ДТП относительно модуля ИКИ: 1 – стандартная рабочая зона ВК; 2 – ДТП (с указанием номера); 3 – угол, ограниченный стенками боковых отражателей; 4 – угол, ограниченный рабочей зоной ВК; 5 – модуль ИКИ; 6 – круговая поверхность закрепления модулей ИКИ; 7 – плоскость среза отражателя; 8 – оптическая ось модуля ИКИ

Заключение

Для имитации внешней тепловой нагрузки при проведении ТВИ изделий ракетно-космической техники в ВК 600/300 ФКП «НИЦ РКП» широкое применение получили модули ИКИ типа ИЭТ-29. Проведенные ранее расчетно-теоретические исследования по определению оптических и энергетических характеристик данного типа модулей теплового излучения [6, 7] выявили существенную зависимость характеристик распределения излучения от положения излучателя модуля относительно его отражателя.

В данной работе для определения поля облученности, создаваемой модулем ИКИ при его штатной эксплуатации, были проведены испытания по измерению плотности потока излучения, создаваемого модулем ИКИ.

В ходе экспериментальных исследований была выявлена несимметричность создаваемого модулем ИКИ излучения (табл. 1), что указывает на сдвиг излучающего элемента относительно симметричного отражателя. Существующий сдвиг объясняется конструкцией модуля ИКИ, в котором для компенсации существенного теплового расширения излучающего элемента используется в качестве подвижной опоры натяжитель в виде дугообразной латунной пружины.

Численное моделирование различных возможных вариантов расположения излучателя относительно отражателя модуля ИКИ с использованием программного комплекса [10] подтвердило, что полученные экспериментальные данные соответствуют небольшому сдвигу излучающего элемента (рис. 11). Установленная в ходе экспериментальных исследований несимметричность облученности, создаваемая модулем ИКИ,

не превышает 5,1 % в угле раствора плоских стенок отражателя, составляющем 30°, и существенно увеличивается (до 24 %) при больших значениях углов облучения модулем ИКИ объекта испытаний.

Таким образом, экспериментально-теоретические исследования подтвердили наличие теоретически предсказанной [6] существенной зависимости облученности, создаваемой модулем ИЭТ-29, от положения излучателя в его отражателе. Частично это негативное явление компенсируется быстрым уменьшением плотности потока излучения при увеличении угла более 30° от оптической оси модуля ИКИ, а на углах более 38° излучение от модуля ИКИ не попадает напрямую на объект испытаний, так как излучение выходит за пределы рабочей зоны ВК (рис. 12).

Полученные результаты могут быть использованы для построения математической модели пространственного распределения лучистых потоков, создаваемых облучателем ИЭТ-29 при проведении ТВИ изделий космической техники.

Список источников

1. **Финченко В.С., Котляров Е.Ю., Иванков А.А.** Системы обеспечения тепловых режимов автоматических межпланетных станций / под ред. В.В. Ефанова, В.С. Финченко. Химки. НПО Лавочкина, 2018. 400 с.
2. **Андрейчук О.Б., Малахов Н.Н.** Тепловые испытания космических аппаратов. Москва: Машиностроение, 1982, 143 с.
3. **Залетаев С.В., Румынский Н.А.** и др. Применение обобщенной характеристики лучистого взаимодействия двух тел для оценки температурного влияния термобарокамеры на космический аппарат при проведении тепловакуумных испытаний // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. № 6. С. 282–288. DOI: 10.34759/tpt-2020-12-6-282-288
4. **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.
5. **Ященко Б.Ю., Шабарчин А.Ф., Ушакова А.А.** Развитие программного комплекса и методики расчета распределения теплового излучения от сложного излучателя // XLI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов. Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 430.
6. **Ульянов В.А., Сизяков Н.П.** и др. Построение и исследование излучательной модели инфракрасного облучателя ИЭТ-29 в условиях тепловакуумных испытаний изделий космической техники // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2023. № 1–2. С. 81–94.
7. **Ульянов В.А., Сизяков Н.П., Поляхов А.Д., Бояркин В.В., Юрьев И.А., Якушев А.О.** Верификация тепловой модели излучателя ИЭТ-29 // Вестник научных конференций. 2022. № 6-1 (82). С. 99–108.
8. **Добрица Д.Б., Ушакова А.А., Шабарчин А.Ф., Ященко Б.Ю.** 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. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-27-38
9. **Евдокимов И.Е., Николаенко В.С., Филиппов Г.С., Ященко Б.Ю.** Расчет пространственного распределения энергии сложного излучателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2013. Т. 12. № 1 (39). С. 214–221. DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-1(39)-214-221
10. **Ященко Б.Ю.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011610989. Расчет распределения теплового излучения. Заявка № 2010617495; 30.11.2010; Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ: 27.01.2011.

References

1. **Finchenko V.S., Kotlyarov E.Yu., Ivankov A.A.** Systems of thermal modes of automatic interplanetary stations [Systems for ensuring thermal modes of automatic interplanetary stations]. Ed by V.V. Efanov, V.S. Finchenko. Khimki. NPO Lavochkina, 2018, 400 p. (In Russ.).
2. **Andreichuk O.B., Malakhov N.N.** Teplovye ispytaniya kosmicheskikh apparatov [Thermal tests of spacecraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 143 p. (In Russ.).
3. **Zaletayev S.V., Ruminsky N.A., Basov A.A., Klochkova M.A., Fedoruk G.D.** Application of the generalized two-body radiant interaction characteristic for estimation of the thermal vacuum chamber temperature effect on a space vehicle during thermal vacuum testing. *Thermal Processes in Engineering*, 2020, vol. 12, no. 6, pp. 282–288. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2020-12-6-282-288.
4. **Ulyanov V.A., Sizyakov N.P., Polyakhov A.D.** The final element thermal model of infra-red course IET-29 and its verification by thermal vacuum tests results // All-Russian Scientific-Technical Journal «Polyot» («Flight»), 2022, no. 4, pp. 3–21. (In Russ.).
5. **Yashchenko B.Yu., Shabarchin A.F., Ushakova A.A.** Razvitie programmogo kompleksa i metodiki rascheta raspredeleniya teplovogo izlucheniya ot slozhnogo izluchatelya [Development of a software package and me-

- thodology for calculating the distribution of thermal radiation from a complex radiator]. *XLI Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyashchennye pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh – pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2017, p. 430. (In Russ.).
6. **Ulyanov V.A., Sizyakov N.P., Polyakhov A.D., Yurev I.A.** Construction and Researches of Radiating Model of Infrared Source IET-29 with Reference to Conditions Thermal Vacuum Tests of Products of Space Technics. *All-Russian Scientific-Technical Journal "Polyot" ("Flight")*, 2023, no. 1–2, pp. 81–94. (In Russ.).
 7. **Ulyanov V.A., Sizyakov N.P., Polyakhov A.D., Boyarkin V.V., Yurev I.A., Yakushev A.O.** Verification of the thermal model of the IET-29 radiator. *Bulletin of Scientific Conferences*, 2022, no. 6-1 (82), pp. 81–94. (In Russ.).
 8. **Dobritsa D.B., Ushakova A.A., Shabarchin A.F., Yashchenko B.Yu.** Modeling external thermal influence of infrared radiation sources during tests of rocket and space equipment in VK-600/300. *Vestnik of Samara University. Aero-space and Mechanical Engineering*, 2017, vol. 16, no. 3, pp. 27–38. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-27-38.
 9. **Yevdokimov I.Y., Nikolaenko V.S., Filippov G.S., Yashchenko B.Yu.** Calculation of spatial distribution of energy of a complex radiator. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*, 2013, no. 1 (39), pp. 214–221. (In Russ.).
 10. **Yashchenko B.Yu.** Certificate of state registration of computer program No. 2011610989. Calculation of thermal radiation distribution. Application: No. 2010617495; 30.11.2010; Registered in the Register of computer programs: 27.01.2011.