

## СЕКЦИЯ 4

### ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС. ВАКУУМНО-ЛЕВИТАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

#### Точность воспроизведения параметров солнечного излучения как действующего фактора космического пространства при проведении тепловвакуумных испытаний с использованием имитатора солнечного излучения

*С.Б. Нестеров, А.А. Филатов*

*Российское научно-техническое вакуумное общество им. академика С.А.Векшинского  
anthonyfilatov@gmail.com*

*Рассмотрение ведется на основе метода трассировки лучей для моделирования эффектов лучевого теплопереноса. Моделирование строится на возможности импортирования 3D-модели вакуумной установки и упрощенной 3D-модели испытуемого космического аппарата в лучевую модель. Учет оптических свойств поверхностей вакуумной установки и КА (поглощение, рассеяние, зеркальное отражение) позволяет с хорошей точностью смоделировать лучистые потоки на интересующих поверхностях. Данный подход позволяет оптимизировать проведение ТВИ с точки зрения расположения КА внутри ВУ, режимов испытаний и предъявления требований к точности воспроизведения факторов космического пространства. Рассматриваются вопросы повышения точности воспроизведения действующих факторов космического пространства в крупногабаритных стендах ТВИ с имитаторами солнца. Обсуждается способ оптимальных взаимных компоновок вакуумной камеры и имитатора солнца.*

*Accuracy of the reproduction of solar radiation parameters as an active factor in outer space by thermal vacuum tests with a solar radiation simulator. S.B.Nesterov, A.A.Filatov. Consideration is based on the ray tracing method to simulate the effects of radiation heat transfer. The simulation is based on the ability to import a 3D vacuum model. installation and simplified 3D-model of the test spacecraft in the radial model. Consideration of optical properties of the vacuum installation surfaces and spacecraft (absorption, scattering, specular reflection) allows one to simulate radiant surfaces fluxes with good accuracy. This approach allows one to optimize the performance of heat vacuum tests in terms of the location of the spacecraft inside the vacuum installation, test modes and requirements for accuracy factors of outer space. Issues of increasing accuracy reproduction of acting factors of outer space in large-sized heat vacuum installation stands with sun simulators are viewed. The method of optimal mutual arrangements in vacuum chamber and sun simulator is discussed.*

Точность воспроизведения перечисленных факторов не является постоянной величиной для имитаторов солнечного излучения. В каждом конкретном случае она зависит от конструктивных решений, особенностей совместной компоновки ИСИ и вакуумной камеры, используемых компонентов. Однако, применительно к проектируемым стендам ТВИ, можно сформулировать ряд рекомендаций, направленных на повышение точности имитации облучения космического аппарата Солнцем.

Точность воспроизведения таких факторов, как уровень энергетической освещенности и ее неравномерность обеспечивается рациональным построением светооптической схемы имитатора, корректным выбором источников излучения и их количества. Более сложными с точки зрения точности воспроизведения являются такие параметры как угол непараллельности и спектр излучения.

Имитатор солнечного излучения предназначен для создания в объеме вакуумной камеры параллельного пучка лучей с равномерным распределением энергетической освещенности в его поперечном сечении, с минимальной расходимостью (непараллельностью), и со спектром, близким к внеатмосферному спектру солнечного излучения. Таким образом, к параметрам, определяющим точность воздействия факторов космического пространства, применительно к имитатору солнечного излучения, следует отнести следующие параметры:

- величина энергетической освещенности (плотности мощности);
- неравномерность энергетической освещенности в плоскости;
- неравномерность энергетической освещенности в объеме;
- непараллельность;
- отклонение от спектра внеатмосферного солнца.

Типичными значениями приведенных параметров, принятыми в практике тепловакуумных испытаний, являются следующие:

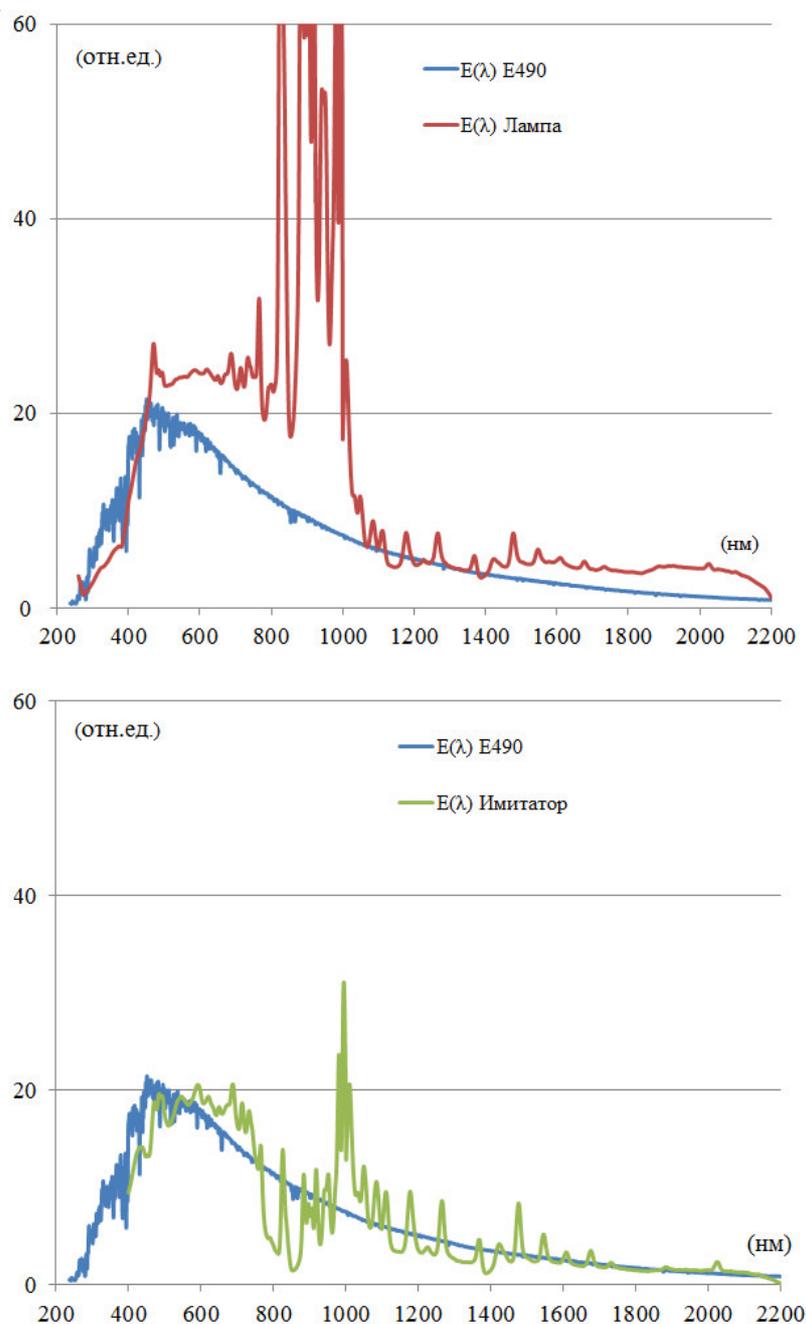
- величина энергетической освещенности (плотности мощности) 1440...2880 Вт/м<sup>2</sup>;
- неравномерность энергетической освещенности в плоскости 5...10%;
- неравномерность энергетической освещенности в объеме 10...20%;
- непараллельность 2...4 град. (полный угол);
- отклонение от спектра внеатмосферного солнца 5...10%.

Так, говоря о непараллельности светового пучка в ИСИ, следует отметить следующие моменты. Во-первых, имитаторы, как правило, не оснащаются средствами для измерения непараллельности светового потока, поэтому оперировать приходится лишь данными модели трассировки лучей через светооптическую модель имитатора. Во-вторых, практически невозможно построить крупногабаритный имитатор, который обеспечивал бы непараллельность в 32 угл.мин., соответствующую угловому размеру Солнца; при самой рациональной светооптической схеме эту величину удастся сохранить в диапазоне 2-4 град. (полный угол). В-третьих, учесть характер взаимодействия непараллельного пучка с реальной поверхностью КА (особенно, негерметичного, с многочисленными участками затенения одного герметичного объема другим) можно только путем предварительного моделирования, когда 3D-модель КА импортируется в модель трассировки лучей солнечного имитатора и на интересующих поверхностях КА вычисляется угловое и линейные распределения энергетической освещенности, а также суммарный лучистый поток.

Точность воспроизведения спектра излучения, в первую очередь, определяется соответствием спектра короткодуговой ксеноновой лампы внеатмосферному спектру Солнца. За эталонный спектр принимается спектр внеатмосферного солнца, приведенный в стандарте E490 [1]. При сравнении эталонного спектра со спектром излучения ксеноновой лампы, было выявлено, что при идентичности спектров в целом, в области длин волн от 800 до 1000 нм мощность излучения ксеноновой лампы в 2,5 – 3 раза превышает мощность излучения солнца.

Регистрация спектра ксеноновой лампы и спектра имитатора солнечного излучения в диапазоне длин волн от 400 до 2500 нм производилась системой из двух монохроматоров МДР-206. Первый монохроматор оснащался дифракционной решеткой 1200 лин./мм и кремниевым фотоприемником для регистрации длин волн короче 1100 нм, а второй монохроматор решеткой 300 лин./мм и германиевым фотоприемником для регистрации длин волн длиннее 1100 нм.

Регистрация ультрафиолетового излучения производилась комбинированным УФ-радиометром ТКА ПКМ-12. Спектры ксеноновой лампы и скорректированный спектр имитатора в сравнении с эталонным спектром приведены на рисунке, доля мощности излучения на разных участках спектра приведена в таблице 1.



*Рис. 1. Спектр ксеноновой лампы в сравнении со спектром внеатмосферного солнца (сверху) и спектр имитатора в сравнении со спектром внеатмосферного солнца (снизу).*

Таблица 1. Сравнение доли излучения имитатора солнца и внеатмосферного солнца на различных участках спектра в процентах от общей мощности.

Диапазон	Длины волн (нм)	ASTM E490 (%)	Имитатор (%)	Расхождение (%)
УФ-С	200-280	0,49	0,97	0,48
УФ-В	280-320	1,46	0,98	0,48
УФ-А	320-400	5,79	6,58	0,79
Видимый	400-450	6,34	4,96	1,38
	450-500	7,28	6,61	0,67
	500-550	6,86	6,81	0,05
	550-600	6,69	7,41	0,72
	600-650	6,32	7,08	0,76
	650-700	5,27	7,07	1,80
ИК	700-800	9,30	9,45	0,15
	800-900	7,51	4,08	3,43
	900-1000	6,08	8,80	2,72
	1000-1100	4,86	7,88	3,02
	1100-1500	12,48	10,31	2,17
	1500-2000	7,08	8,66	1,58
	2000-2500	2,85	2,34	0,51

Весомым основанием для точного воспроизведения факторов облучения является корректная постановка задачи, как имитируется облучение объекта испытаний при проведении наземных испытаний. Для этого на этапе эскизного и технического проектов имеет смысл создать лучевую модель будущего имитатора и в процессе моделирования установить достижимую расчетную точность облучения КА. Кроме того, создав модель, имитирующее реальное Солнце, можно на стадии моделирования установить степень соответствия облучения КА в ИСИ облучению реальным Солнцем при заданных положениях КА на орбите.

Поясним сказанное рассмотрев типичные стадии проектирования имитатора солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов:

- выбор типа светооптической схемы (осевая или внеосевая) в зависимости от компоновки вакуумной установки
- габаритный расчет светооптической схемы с учетом компоновки вакуумной установки и компоновки имитатора солнечного излучения относительно нее
- упрощенная лучевая модель светооптической схемы (точечные источники излучения, оптические поверхности заданы встроенными в программу проектирования примитивами, минимальный набор детекторов, основные компоненты вакуумной установки также могут быть заданы встроенными примитивами)
- уточненная лучевая модель (модель источника, основанная на измерениях реальной ксеноновой лампы, учет спектральных характеристик покрытий, учет френелевских потерь на преломляющих поверхностях, задание коллимирующего зеркала составляющими его сегментами)
- полная лучевая модель (добавление в предыдущую модель 3D-моделей корпуса вакуумной установки, криоэкранов, элементов поворотных механизмов и задание на них оптических свойств – спектральных коэффициентов зеркального/диффузного рассеяния и поглощения, учет рассеянного света на зеркальных покрытиях)

Следующим шагом объединения лучевой и тепловой моделей может быть отладка интерфейса передачи данных из лучевой модели (например, из ZEMAX® или LightTools®) о величинах и распределениях теплопритоков, обусловленных излучением имитатора солнца и излучением нагретых тел в вакуумной установке, дающих вклад в радиационный теплообмен, в

тепловую модель (например, ANSYS ®) для расчета и моделирования эффектов тепло- и массопереноса.

## **Выводы**

Использование современных короткодуговых ламп вместе с рациональным построением светооптической схемы имитатора солнца позволяет с высокой точностью воспроизводить облучение КА. В дополнение к этому, программные средства для расчета хода лучей позволяют на стадии проектирования создавать точные расчетные модели, позволяющие установить степень соответствия облучения КА в планируемом тепло-вакуумном эксперименте его реальному облучению на орбите. Кроме того, такие модели позволяют более точно смоделировать величины радиационных теплопритоков к криогенным панелям, что, в свою очередь, позволяет более точно сформулировать требования к криогенной системе.

## **Литература**

1. Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables, ASTM standard, Designation E 490 - 00a

## **Распределение концентрации в собственной атмосфере космического аппарата при наличии течи**

*Л.Н. Розанов, А.Ю. Скрябнев*

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая д.29*

*Рассматривается теоретическое и экспериментальное определение распределение концентрации остаточных газов в собственной атмосфере космического аппарата при наличии точечной течи. Внешняя поверхность корпуса считается свободной от дополнительной аппаратуры. Экспериментальное исследование проводится при помощи вычислительного эксперимента методом статистических испытаний. Показано, что распределение концентраций зависит от четвёртой степени расстояния до места течи. Теоретические результаты хорошо совпадают с вычислительным экспериментом.*

***Concentration distribution in the own atmosphere of the space apparatus with a leak.**  
L.N.Rozanov, A.Y.Scrybnev. Theoretical and experimental investigation of the concentration distribution in the own atmosphere of the space apparatus with a point leak is presented. The experimental investigation was made with the Monte-Carlo method. It is stated that concentration distribution depends on the fourth degree of the distance to the place of the leak. Theoretical results coincide with calculation experiment.*

## **Введение**

Теоретическое определение распределения концентрации газа в собственной атмосфере космического аппарата (КА) при различных режимах течения газа рассматривалось в работах [3,4]. Мониторингу герметичности Международной космической станции (МКС) посвящены работы [1,2,5,6]. При возникновении течи в КА происходит истечение газа из внутреннего объема КА в космос. Давление в собственной атмосфере КА составляет для МКС  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  Па. При таких давлениях течение газа, выходящего из КА в космос, будет осуществляться в молекулярном режиме.

В данной работе теоретические результаты определения распределения концентрации газа в собственной атмосфере КА при истечении газа из точечной течи в молекулярном режиме