

**ИМИТАТОРЫ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ТЕРМОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**Р. О. Асланян^{1,2}, Д. И. Анисимов^{1,2}, И. А. Марченко¹, В. И. Пантелеев²¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26а
E-mail: roksana_a@list.ru

Надежность космического аппарата подтверждается на этапе проведения наземной экспериментальной отработки. Следовательно, вероятность безотказной работы космического аппарата зависит от качества экспериментальной отработки. Термовакuumные испытания являются одним из главных этапов наземной отработки системы терморегулирования и космического аппарата в целом.

Целью термовакuumных испытаний является подтверждение теплового состояния аппарата и расчетных теплофизических характеристик системы терморегулирования в условиях, близких к эксплуатационным, а также подтверждение соответствия разработанной тепловой математической модели космического изделия.

Основным требованием к термовакuumным испытаниям является имитация условий штатного функционирования аппарата. При анализе результатов испытаний регистрируемые температурные параметры проверяются на соответствие с допустимыми значениями. Термовакuumные испытания проводятся на специально оборудованных испытательных комплексах, обеспечивающих имитацию внешних тепловых факторов, воздействующих на космический аппарат при орбитальном функционировании.

Одним из базовых и наиболее сложных элементов таких комплексов является имитатор солнечного излучения, имитирующий солнечное воздействие на космический аппарат при орбитальном функционировании.

Солнечные имитаторы создают поток непрерывного оптического излучения, спектральные характеристики которого должны быть близки к спектральным характеристикам солнечного излучения.

Представлен анализ некоторых существующих имитаторов солнечного излучения для выбора оптимальной базовой конструкции с целью дальнейшего совершенствования, направленного на снижение энергозатратности эксплуатации имитатора солнечного излучения для испытаний космических аппаратов и улучшения качества термовакuumных испытаний.

Описаны основные требования, предъявляемые к имитаторам солнечного излучения, наиболее соответствующие характеристикам солнечного спектра и интенсивности в космическом пространстве.

Было проведено сравнительное описание пяти образцов имитаторов солнечного излучения отечественного и зарубежного производства по четырем ключевым параметрам.

Рассмотрен вопрос о возможности создания и применения компактных трансформируемых источников теплового излучения солнечного спектра с целью повышения качества термовакuumных испытаний для космических аппаратов различных классов.

Ключевые слова: имитатор солнечного излучения, космический аппарат, термовакuumные испытания, наземные испытания, световое пятно.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 323–327

SOLAR SIMULATORS FOR THERMAL VACUUM TESTS OF SPACECRAFTR. O. Aslanyan^{1,2}, D. I. Anisimov^{1,2}, I. A. Marchenko¹, V. I. Panteleev²¹JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation²Siberian Federal University
26a, Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
E-mail: roksana_a@list.ru

The reliability of spacecraft is supported on the stage of the ground experimental testing. Therefore, the probability of no-failure operation of spacecraft depends on the test quality. Thermal vacuum tests are one of the main stages of the thermal control system and the spacecraft as a whole.

The purpose of thermal vacuum tests is to confirm the thermal state of the spacecraft and thermal characteristics of thermal control system in the conditions near to operational.

The main requirement for thermal vacuum tests is imitation of normal operation conditions of spacecraft. Thermal vacuum tests are carried out on special test complexes providing simulation of the external thermal factors, which influences spacecraft at orbital operation. The solar simulator is one of the basic and important elements of these complexes. The solar simulator imitates solar impact on spacecraft at orbital operation.

One of the basic and most complex elements of these complexes is a solar simulator that simulates a solar impact on the spacecraft at the orbital operation. Solar simulators provide a continuous stream of optical radiation. The spectral characteristics simulator must be close to the spectral characteristics of the solar radiation.

The purpose of this article is to analyze some solar simulators to select the best construction for further improvements aimed at reducing energy consumption exploitation of solar simulator for testing spacecraft and improve the quality of thermal vacuum testing.

We describe the basic requirements for solar simulators, the most relevant characteristics of the solar spectrum and intensity in outer space.

We made comparative description of the five solar simulators home and foreign production by four key parameters.

In this work the possibility of creation and application of the compact solar simulator is being considered. The research objective is to develop a compact solar spectrum simulator for increasing the quality of spacecraft thermal vacuum tests.

Keywords: solar simulators, spacecrafts, thermal vacuum tests, ground tests, light spot.

Введение. Одной из актуальных проблем в области освоения космического пространства является адекватное моделирование условий космического полета для испытаний космических аппаратов (КА) на Земле [1]. Важным фактором термовакuumных испытаний (ТВИ) является имитация солнечного излучения (ИСИ) [2]. Целью данной статьи является анализ некоторых существующих ИСИ для выбора оптимальной базовой конструкции с целью дальнейшего совершенствования, направленного на снижение энергозатратности эксплуатации имитатора солнечного излучения для испытаний КА и улучшения качества ТВИ. В статье рассмотрено несколько имитаторов промышленного производства с целью выявления наиболее оптимальных конструкций и схем, а также рассмотрена возможность создания и последующего применения компактных трансформируемых источников теплового излучения солнечного спектра.

Задачей исследования является сравнительный анализ вышеперечисленных параметров различных имитаторов с целью определения наиболее оптимальных их значений. В данной статье представлено сравнительное описание пяти ИСИ по четырем ключевым параметрам.

Испытания. При комплексных термовакuumных испытаниях испытываются теплофизические модели или штатные изделия с имитацией внешних тепловых условий окружающего пространства и внутренних тепловыделений приборов и оборудования КА [3]. В этом случае отрабатываются тепловые режимы как внешнего, так и внутреннего оборудования, конструкции КА, СТР [4]. Термовакuumная отработка КА и его систем терморегулирования (СТР) проводится в термобарокамерах, имитирующих условия реальной эксплуатации КА с применением специального испытательного оборудования, стендов и систем.

Проведение ТВИ возможно только в термобарокамере, имеющей в своем составе:

- систему вакуумирования;
- имитатор «черного», «холодного» космоса;
- имитатор солнечного излучения;

- источники инфракрасного излучения;
- систему обеспечения ориентации обрабатываемого КА (специальные стенды, поворотные устройства и т. п.);
- систему регистрации температурных параметров;
- систему управления тепловыми имитаторами, электрообогревателями и оборудованием КА.

Имитатор солнечного излучения предназначен для имитации прямого солнечного излучения, действующего при орбитальном функционировании на КА [5]. Имитируются следующие характеристики излучения: удельная мощность падающего теплового потока, равномерность облучения, параллельность лучей, спектральный состав по длинам волн.

Требования к ИСИ для околоземной орбиты:

- удельная тепловая мощность падающего теплового потока 1340–1440 Вт/м²;
- равномерность облучения до $\pm 15\%$;
- непараллельность лучей до 4 угловых градусов;
- спектральный диапазон имитируемого солнечного потока, близкий к диапазону солнечного излучения ($200 \text{ нм} \leq \lambda \leq 2000 \text{ нм}$) [6; 7].

ИСИ состоят из оптических систем (зеркал, линз), источников излучения (дуговых или высокочастотных ксеноновых ламп), систем управления и замера параметров. Эти элементы могут применяться в различных сочетаниях между собой, а также сочетаться с различными источниками излучения.

Общая схема имитатора солнечного излучения показана на рис. 1.

Для анализа выбраны ИСИ, применяемые в термобарокамерах АО «ИСС имени академика М. Ф. Решетнева» (г. Железногорск) и ИС-500, применяемые в испытательном центре Роскосмоса НИЦ РКП (пос. Пересвет, Московская область), LSS (Large Space Simulator), расположенный в ESTEC – центре Европейского космического агентства на побережье Северного моря в Шипхолье близ Амстердама (рис. 2.), SPF (Space Power Facility), расположенный в Исследовательском центре имени Гленна (НАСА) в Кливленде (штат Огайо, США) [8].

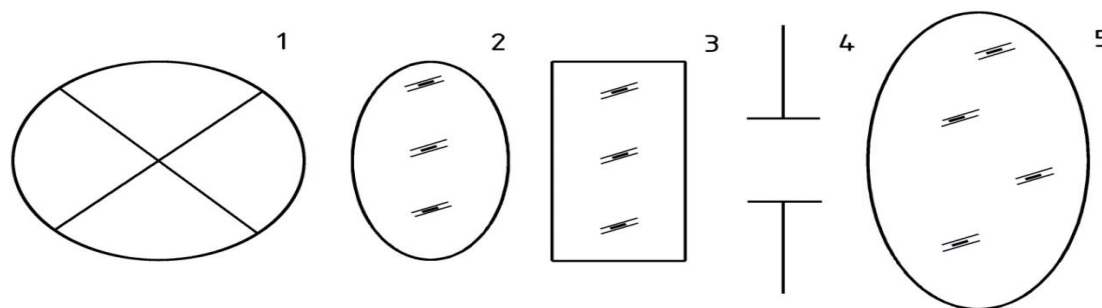


Рис. 1. Общая схема ИСИ: 1 – источник излучения; 2 – конденсатор; 3 – корректирующий светофильтр; 4 – регулируемая апертура; 5 – линза

Fig. 1. General pattern of sunlight simulation: 1 – emission source; 2 – condenser; 3 – correcting filter; 4 – adjustable aperture; 5 – lens element

ТБК-120, ГВУ-600 и ВК 600/300 – полноразмерные испытательные криокамеры, оснащенные ИСИ и предназначенные для проведения ТВИ крупногабаритных изделий.

На основе сравнения проведем анализ и выявим достоинства и недостатки каждого имитатора. В таблице приведены значения этих параметров для характеристик ИСИ.

Рассмотрим некоторые ИСИ по следующим параметрам:

1. Источник излучения – определяет спектральный диапазон ИСИ и его близость к спектру излучения Солнца. Основная часть энергии электромагнитного излучения Солнца, непосредственно влияющая на освещенность и тепловой режим КА, заключена в интервале 0,3–2,5 мкм [9; 10].

2. Площадь облучаемой поверхности – определяет возможность применения имитатора излучения для испытаний КА различного размера.

3. Неоднородность уровней плотностей падающего потока излучения – не должна превышать $\pm 15\%$, так как в условиях космоса излучение, испускаемое Солнцем, имеет высокую степень однородности потока.

4. Максимальная интенсивность солнечного излучения – удельная тепловая мощность на уровне 1340–1440 Вт/м².

Сравнительный анализ ИСИ. Для сравнительного анализа были выбраны следующие модели ИСИ и присвоены соответствующие номера:

ИСИ ТБК-120 – № 1;

ИСИ ГВУ-600 – № 2;

ИС-500 ВК 600/300 – № 3;

ИСИ LSS (Large Space Simulator) – № 4;

ИСИ SPF (Space Power Facility) – № 5.

В рассматриваемых имитаторах в качестве источника света используются ксеноновые лампы. В ИСИ № 1, 2, 3, 4 применяются газоразрядные ксеноновые лампы, а в ИСИ № 5 – дуговые ксеноновые лампы.

Для имитаторов солнечного излучения важны такие характеристики ксеноновых ламп, как мощность и идентичность спектрального состава излучения солнечному [11; 12]. Спектр ксеноновой лампы – приблизительно равномерный по всей области видимого света, близкий к дневному свету. Излучение чистого ксенона в процессе электрического газового разряда при сверхвысоком давлении имеет спектраль-

ное распределение с цветовой температурой около 6000 К, наиболее совпадающее с распределением солнечного излучения. При этом размеры излучающей поверхности при очень высокой яркости небольшие, что позволяет рассматривать их как точечные источники излучения и, соответственно, с большей точностью проектировать оптические системы. Но негативным моментом, если посмотреть на спектр, является отличие излучения по спектральному составу от солнечного в области длин волн 800, 1050 нм, где наблюдаются значительные выбросы энергии, более чем в два раза превышающей величину энергии излучения Солнца в этой полосе спектра [13]. В этом интервале содержится приблизительно 15 % от интегральной энергии излучения Солнца, а у ксеноновой лампы – более 30 % от общей энергии излучения.

Одним из важных параметров ИСИ является площадь облучаемой поверхности с равномерной плотностью излучения [14; 15]. Имитаторы № 3, 4 и 5 имеют наибольший размер светового пятна, что позволяет проводить испытания более крупногабаритных КА и их узлов, чем имитаторы № 1 и 2.

Критерий равномерности плотности падающего потока энергии имитатора солнечного излучения является ключевым при определении эффективной площади облучаемой поверхности, которая может быть использована для испытаний солнечных элементов и их модулей [16; 17]. Максимальную интенсивность солнечного излучения имеет ИСИ № 5.

Анализируя все вышерассмотренные параметры имитаторов в комплексе, можно сделать вывод, что все рассматриваемые ИСИ удовлетворяют предъявляемым требованиям. Имитатор № 5 имеет наибольший размер светового пятна и максимальную интенсивность солнечного излучения. Имитатор № 4 может предложить наибольшее соответствие по неоднородности уровней плотностей падающего потока излучения. Имитаторы № 1 и 2 имеют небольшую площадь светового пятна.

Наиболее оптимальной базовой конструкцией для ИСИ являются конструкции № 4 и 5, имеющие наибольшие размеры светового пятна, которые позволяют проводить ТВИ крупногабаритных КА. В качестве источника излучения рекомендуется использовать газоразрядные и дуговые ксеноновые лампы как наиболее соответствующие по спектральному составу солнечному излучению.

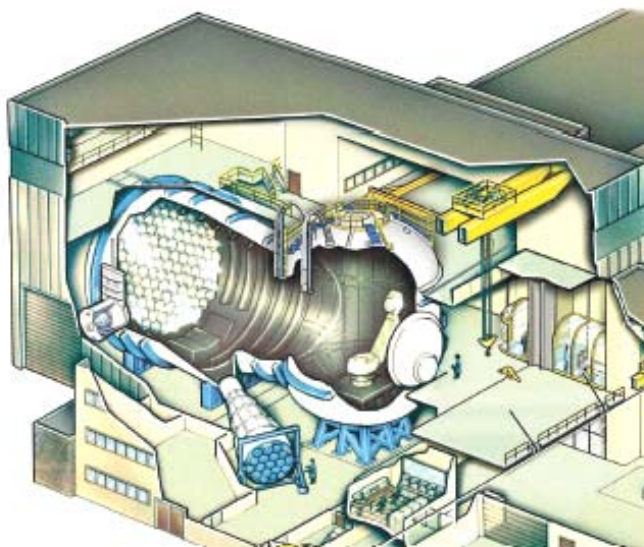


Рис. 2. Большой имитатор космического пространства Европейского космического агентства

Fig. 2. Big space simulator of European space agency

Сравнительная характеристика ИСИ

Имитатор	Источник излучения	Площадь облучаемой поверхности, м Максимальный диаметр пятна ИСИ	Неоднородность уровней плотностей падающего потока излучения, %	Максимальная интенсивность солнечного излучения
№ 1. ИСИ ТБК-120	Газоразрядные ксеноновые лампы	2×2	< 10	1600
№ 2. ИСИ ГВУ-600	Газоразрядные ксеноновые лампы	4×4	< 10	1600
№ 3. ИС-500	Газоразрядные ксеноновые лампы	3×8	< 10	1500
№ 4. ИСИ LSS	Газоразрядные ксеноновые лампы	6×5	0,5	2600
№ 5. ИСИ SPF	Дуговые ксеноновые лампы	$D = 15$	1	4200

Заключение. В статье были рассмотрены 5 образцов современных ИСИ, среди них 2 – зарубежных. Проведен анализ этих установок по 4 ключевым параметрам, сделаны выводы о достоинствах и недостатках каждого имитатора, выбрана оптимальная базовая конструкция ИСИ.

Перспективным в области термовакuumных испытаний является возможность создания и последующего применения компактных трансформируемых источников теплового излучения солнечного спектра с целью повышения качества ТВИ для КА различных классов.

Конструктивно трансформируемый источник солнечного излучения (ТИСИ) будет представлять собой набор отдельных блоков, из которых будет собираться цельный имитатор солнечного излучения, исходя из требований к термовакuumной отработке каждого конкретного КА. В состав каждого отдельного блока будут входить источники света, собирающая оптика (для фокусирования и смешения света, генерируемого источниками), устройства для когеренции света и система термостабилизации. Конструкция устройства

ТИСИ будет выполнена таким образом, чтобы обеспечивать возможность проведения ТВИ в термобарокамерах, спроектированных без специально отведенного места для имитатора солнечного излучения (возможность межцехового транспортирования).

Преимуществом таких компактных источников также является и их способность подстраиваться под любые размеры и формы испытуемого изделия, что приведет к рациональному использованию термобарокамеры и её ресурсов. С помощью ТИСИ станет возможна имитация витковой засветки КА от Солнца, как при орбитальном функционировании (невозможно осуществить при помощи стационарных ИСИ). Компактные трансформируемые источники солнечного излучения позволят увеличить размеры светового пятна и, как следствие, размеры рабочего поля.

Библиографические ссылки

1. Андрейчук О. Б., Малахов Н. Н. Тепловые испытания космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1982. 107 с.

2. Крат С. А., Филатов А. А., Христич В. В. Тепловакуумные испытания космического аппарата: опыт создания имитатора солнечного излучения на основе современных газоразрядных ламп высокого давления // Вестник СибГАУ. 2010. № 2 (28). С. 73.
3. Тельный А. А. Имитация солнечного излучения в лабораторных условиях // ОМП. 1976. № 5. С. 43–46.
4. Харитонов А. В., Макарова Е. А. Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная. М. : Наука, 1972. 83 с.
5. Бебчук Л. Г., Богачев Ю. В., Заказов Н. П. Прикладная оптика. М. : Машиностроение, 1988. 312 с.
6. Петров В. П. Контроль качества и испытание оптических приборов. Л. : Машиностроение, 1985. 222 с.
7. Дубиновский А. М., Панков Э. Д. Стендовые испытания и регулировка оптико-электронных приборов. Л. : Машиностроение, 1986. 152 с.
8. Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов / С. В. Кравченко [и др.] // Наука и инновации : инженерный журнал. 2013. № 1 (13). С. 50.
9. Крат С. А., Филатов А. А., Христич В. В. Схема суммирования световых потоков от набора газоразрядных ламп для имитатора солнечного излучения // Оптический журнал. 2011. № 11. С. 66–72.
10. Крупногабаритные имитаторы солнечного излучения для тепловакуумных испытаний негерметичных космических аппаратов / С. А. Крат [и др.] // Фотоника. 2014. № 2. С. 12–19.
11. Колесников А. В., Сербин В. И., Моделирование условий внешнего теплообмена космических аппаратов. М. : Информацион – XXI век, 1997. 170 с.
12. Крат С. А., Христич В. В. Тепловакуумная отработка КА : развитие современных тенденций // Вестник СибГАУ. 2010. № 4 (30). С. 123–129.
13. Ланис В. А., Левина Л. Е. Техника вакуумных испытаний. М. : Госэнергоиздат, 1963. 264 с.
14. Беляков И. Т. Технология сборки и испытаний космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1990. 133 с.
15. Цаплин С. В., Бобычев С. А., Романов А. Е. Теплообмен в космосе. Самара : Самарский гос. университет, 2013. 53 с.
16. Гуревич М. М. Введение в фотометрию. М. : Энергия, 1968. 244 с.
17. Колтун М. М. Солнечные элементы. М. : Наука, 1987. 192 с.
3. Tel'nyy A. A. [Sunlight simulation in laboratory conditions]. OMP. 1976, No. 5, P. 43–46 (In Russ.).
4. Kharitonov A. V., Makarova Ye. A. *Raspredeleniye energii v spektre Solntsa i solnechnaya postoyannaya* [The energy distribution in the solar spectrum and the solar constant]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 83 p.
5. Bebchuk L. G., Bogachyov Yu. V., Zakaznov N. P. *Prikladnaya optika* [Applied optics]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1988, 312 p.
6. Petrov V. P. *Kontrol' kachestva i ispytaniye opticheskikh priborov* [Quality control and test of optical devices]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1985, 222 p.
7. Dubinovskiy A. M., Pankov E. D. *Stendovyye ispytaniya i regulirovka optiko-elektronnykh priborov* [Bench tests and control of optical-electronic devices]. Mashinostroyeniye Publ., 1986, 152 p.
8. Kravchenko S. V., Nyestyrov S. B., Roman'ko V. A., Tyestoyedov N. A., Khalimanovich V. I., Khristich V. V. [Approach to creating a complete system for processing and testing of spacecraft]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2013, No. 1 (13), P. 50 (In Russ.).
9. Krat S. A., Khristich V. V., Filatov A. A. [Setup for summing the light fluxes from a set of gas-discharge lamps for a solar – radiation simulator]. *Opticheskiy zhurnal*. 2011, No. 11, P. 66–72 (In Russ.).
10. Krat S. A., Khristich V. V., Sharov A. K., Shlyakhtin M. A., Filatov A. A. [Large solar radiation simulators for thermal vacuum tests on non-container spacecraft]. *Fotonika*. 2014, No. 2, P. 12–19 (In Russ.).
11. Kolyesnikov A. V., Syerbin V. I. *Modelirovaniye usloviy vneshnego teploobmena kosmicheskikh apparatov* [Modeling of external heat exchange conditions of spacecrafts]. Moscow, Informatsiya – XXI vek Publ., 1997, 170 p.
12. Krat S. A., Khristich V. V. [Thermal vacuum testing of spacecraft: the development of modern tendencies]. *Vestnik SibGAU*, 2010, No. 4(30), P. 123–129 (In Russ.).
13. Lanis V. A., Lyevena L. Ye. *Tekhnika vakuumnykh ispytaniy* [Technology of vacuum tests]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1963, 264 p.
14. Belyakov I. T. *Tekhnologiya sborki i ispytaniy kosmicheskikh apparatov* [Technology of assembly and tests of spacecrafts]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990, 133 p.
15. Tsaplin S. V., Bolychev S. A., Romanov A. Ye. *Teploobmen v kosmose* [Heat transfer in space]. Samara, Samarskiy universitet Publ., 2013, 53 p.
16. Gurevich M. M. *Vvedeniye v fotometriyu* [Introduction to photometry]. Moscow, Energiya Publ., 1968, 244 p.
17. Koltun M. M. *Solnechnyye elementy* [Solar elements]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 192 p.

References

1. Andreychuk O. B., Malakhov N. N. *Teplovyye ispytaniya kosmicheskikh apparatov* [Thermal testing of space vehicles]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1982, 107 p.
2. Krat S. A., Filatov A. A., Khristich V. V. [Spacecraft thermal vacuum testing: an experience of creation of sunlight simulator based on the high – pressure gas – discharge lamps]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 2 (28), P. 73 (In Russ.).

© Асланян Р. О., Анисимов Д. И.,
Марченко И. А., Пантелеев В. И., 2017