

С. А. Крат, А. А. Филатов, В. В. Христинч

ТЕПЛОВАКУУМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА: ОПЫТ СОЗДАНИЯ ИМИТАТОРА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Рассмотрен вопрос о возможности применения серийно выпускаемых ксеноновых ламп семейства ХВО для создания излучательной системы в имитаторах Солнца.

Проведены экспериментальные исследования светоптических характеристик лампы.

Ключевые слова: тепловакуумные испытания, имитатор солнечного излучения, источник излучения, световой поток, ХВО-лампы.

Одним из основных этапов наземной экспериментальной отработки КА считаются тепловакуумные испытания.

Объектом испытаний является теплофизическая модель КА или его составных частей.

На теплофизической модели платформы вместо штатных приборов и блоков установлены их тепловые имитаторы – секции электрообогрева, имитирующие тепловыделение оборудования при штатной эксплуатации. Для снятия температурной информации в процессе проведения тепловакуумных испытаний на элементах модели установлены термометры сопротивления.

Целью ТВИ является экспериментальная отработка теплового режима и тепловых схем вновь разрабатываемых внешних элементов изделия, приборов и оборудования при имитации условий выведения и орбитального функционирования (штатной эксплуатации).

К задачам, решаемым в ходе испытаний относятся: верификация математической модели кондуктивного теплообмена между элементами конструкции платформы; проверка соответствия температур элементов конструкции изделия и приборов заданным требованиям к системе терморегулирования, а также требованиям к внешним элементам при имитации предельных значений внешних и внутренних тепловых нагрузок; определение температурных полей по внешним элементам конструкции фрагментов изделия; проверка достаточности мощности электрообогревателей внешних приборов и оборудования фрагментов изделия; определение необходимости и разработка рекомендаций по корректировке технической документации на тепловые схемы внешних элементов изделия.

При анализе результатов испытаний регистрируемые и контролируемые в ходе испытаний обрабатываемые температурные параметры оцениваются на соответствие допустимым значениям. При необходимости в отчете даются рекомендации по доработке или изменению тепловых схем.

Тепловакуумные испытания проводятся на специально оборудованных стендах – вакуумных установках, оснащенных криогенными экранами и имитаторами внешних тепловых и световых потоков. Условия испытаний максимально приближены к условиям штатного функционирования КА. В состав стендов для тепловакуумных испытаний входят: термобарокамера; система вакуумной откачки; криогенная система; панели имитатора тепловых потоков; имитатор солнечного излучения.

Система вакуумной откачки обеспечивает давление в камере не выше $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

Охлаждаемые криогенные экраны создают имитацию черного космического пространства с температурой не выше -180 °С.

Ключевым и наиболее сложным элементом стенда для тепловакуумных испытаний является имитатор солнечного излучения.

Требования, предъявляемые к имитатору Солнца: спектральное распределение энергии излучения в диапазоне длин волн (0,2...2,5) мкм, близкое к распределению солнечного излучения; плотность потока излучения на уровне $1\ 340 \dots 1\ 440$ Вт/м² с погрешностью имитации не более 10 % от номинальных значений; размеры светового пятна, соответствующие размерам рабочего поля; равномерность светового потока не более 10 %.

Имитатор Солнца представляет собой источник излучения и оптическую формирующую систему, направляющую поток в рабочую зону.

В данной публикации рассмотрена возможность применения газоразрядных ламп высокого давления ХВО в качестве источника излучения для имитатора Солнца на базе термобарокамеры ТБК-120 (уникальный стенд для наземной экспериментальной отработки КА).

До недавнего момента (2005 г.) при проведении тепловакуумных испытаний схема имитатора солнечного излучения ТБК-120 была построена на базе ламп ДКсРМ-55000 российского производства. Лампа типа ДКсРМ-55000-УХЛ-4-дуговая, ксеноновая сверхвысокого давления разборная мощностью 55 000 Вт. Лампа имеет металлический водоохлаждаемый корпус с внутренней зеркальной оптикой и купольным выходным кварцевым окном, охлаждаемым дистиллированной водой. Подвижный водоохлаждаемый катод и медный анод с щелевой системой водяного охлаждения. Спектр лампы (рис. 1) близок к солнечному [1], однако в настоящее время она снята с производства по причине нерентабельности. Поскольку ресурс лампы ограничен (200 часов) и имеющиеся лампы свой ресурс выработали, возникла необходимость замены источника излучения.

Анализ рынка показал, что конкурентоспособной альтернативой могут выступать лампы семейства ХВО. Эти лампы также довольно доступны по цене (поскольку серийно производятся), наиболее широко их применение в кинопромышленности.

Лампы ХВО принадлежат к семейству газоразрядных ламп. В данных лампах свет генерируется разрядной ду-

гой, свободно воспламеняющейся в чистом ксеноне между двумя электродами. Длина дуги такая же, как расстояние между двумя электродами и составляет всего лишь несколько миллиметров [2].

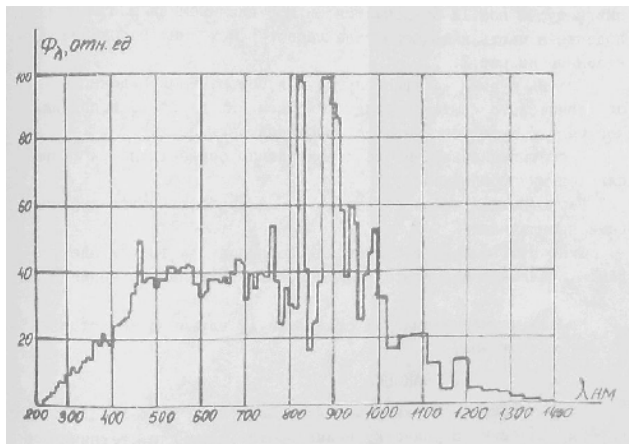


Рис. 1. Спектральное распределение лучистой энергии лампы ДКСРМ-55000-УХЛ-4

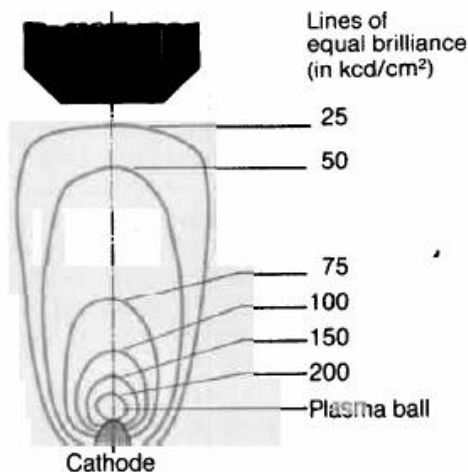


Рис. 2. Распределение яркости в дуге лампы XBO

Основная часть энергии в дуге лампы сосредоточена внутри плазменного шарика размером 2...3 мм (рис. 2). Это означает, что лампы очень близки к идеальному точечному источнику света, что особенно важно для применения их в имитаторах солнца: размещение лампы в фокусах оптических элементов позволяет с наибольшей точностью создавать и направлять световой поток в необходимое поле.

Сравнение спектральной интенсивности излучения лампы XBO с излучением абсолютно черного тела при заданной цветовой температуре (рис. 3) показывает, что лампа XBO имеет сплошной спектр в видимом диапазоне излучения, по интенсивности совпадающий с солнечным [2].

Подтверждение характеристик и возможность применения ламп типа XBO для имитации солнечного излучения при тепловвакуумных испытаниях была отработана на экспериментальном стенде (рис. 4).

В состав стенда вошли: кинопроекторный аппарат Kinoton с лампой XBO 10000 W/HS OFR (рис. 5) [3]; датчик мощности светового потока КФЛП (кремниевый фо-

топреобразователь лучистого потока), закрепленный на передвижном устройстве (рис. 6); экран для формирования светового пятна.

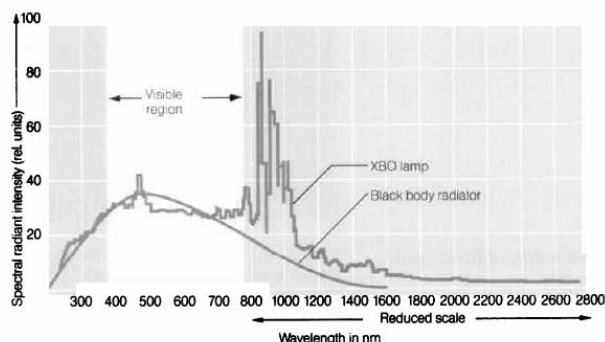


Рис. 3. Спектральная интенсивность излучения лампы XBO

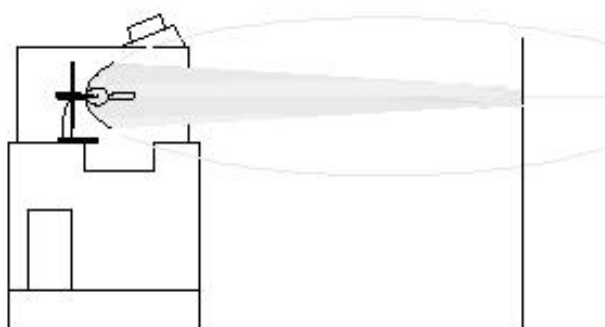


Рис. 4. Схема экспериментального стенда для проверки характеристик лампы XBO 10000 W/HS OFR



Рис. 5. Кинопроекторный аппарат Kinoton с лампой XBO

Датчик КФЛП представляет собой набор кремниевых пластинок, преобразующий поступающую на него солнечную энергию в электрический ток. По уровню электрического сигнала и определяется мощность светового потока, падающего на пластину. Для сбора излучаемых

лампой во все стороны лучей используется эллипсоидный рефлектор. Лампа ХВО, установленная в первом фокусе рефлектора, излучает световой поток, который далее, отражаясь от зеркальных стенок рефлектора, должен собраться во втором фокусе. Это выполняется при условии идеально точечного источника. Поскольку реальный источник имеет конечные размеры, в задачу эксперимента входило выяснить, насколько лампа ХВО применима в качестве источника излучения и какое количество ламп необходимо для создания требуемой освещенности в рабочем объеме термобарокамеры.

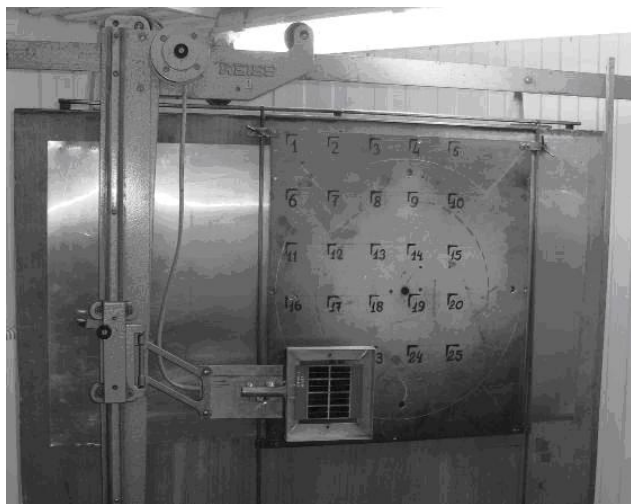


Рис. 6. Экран с разметкой для сканирования плотности потока

Экран представляет собой плоскую металлическую поверхность с нанесенной разметкой, соответствующей габаритным размерам рабочей поверхности фотопреобразователя и соответственно разбит на 25 участков. Размещается экран вертикально во втором фокусе эллипсоидного рефлектора. Центральная зона экрана, дуга лампы и рефлектор расположены на одной оптической оси.

В целях проверки соответствия диапазону допустимых значений КФЛП произведена грубая оценка мощности, попадающей на этот датчик:

$$P = P_{л} \cdot K_{кплд} \cdot K_{охв} \cdot K_{отр} \cdot K_{плд},$$

где $P_{л}$ – мощность, установленная на лампе; $K_{кплд}$ – КПД лампы; $K_{охв}$ – коэффициент угла охвата поверхностью рефлектора лучей от лампы; $K_{отр}$ – коэффициент отражения рефлектора; $K_{плд} = 125$ из учета соотношения размерности выходной величины КФЛП ($Вт/м^2$) и его собственной площади ($0,008 м^2$).

Принимая $P_{л} = 2560 Вт$, $K_{кплд} = 0,6$, $K_{охв} = 0,6$, $K_{отр} = 0,85$, получаем $P = 97920 (Вт/м^2)$.

Учитывая диапазон измерения датчика КФЛП ($0...3000 Вт/м^2$), принято решение изготовить ослабляющую сетку из латуни с ослаблением примерно в $97920/3000 = 32,6$ раз.

Далее в ходе эксперимента включалась лампа на уровне 2560 Вт, на экране формировалось световое пятно и последовательным перемещением датчика КФЛП по участкам экрана производилось сканирование поля размерами $400 \times 500 мм$. Усредненные данные (значения освещенности в $Вт/м^2$) по шести замерам сведены в таблицу.

По полученным данным построено распределение мощности внутри сформированного пятна (рис. 7).

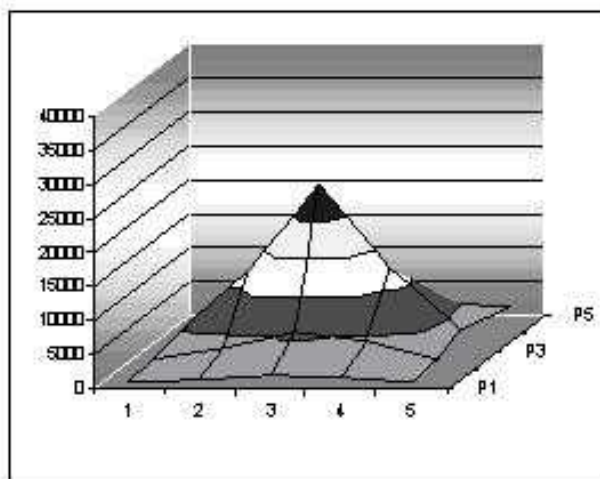


Рис. 7. Распределение мощности внутри светового пятна

Анализ данных замеров показал, что в центральной зоне ($240 \times 300 мм$ – 9 средних элементов таблицы) сосредоточено 74 % световой энергии, падающей на экран, а на периферию попадает 26 % энергии.

Учитывая диаметр входного блока термобарокамеры (блока, через который вводится световой поток внутрь камеры) – 350 мм, для последующего расчета принято, что на входной блок попадает энергия, приходящаяся на 9 средних элементов.

Суммарная мощность света, поступающая на входной блок, рассчитана по формуле

$$P_{сумм} = (\sum_{i=1}^9 P_{КФЛП}) / K_{плд}.$$

Таким образом

$$P_{сумм} = 677 (Вт).$$

Если рассмотреть световой поток на пути через входной блок и далее – в термобарокамере ТБК-120 он также несет определенные потери.

Входной блок состоит из смесителя и иллюминатора, обеспечивающего герметичность в барокамере при испытаниях. Здесь имеются четыре кварцевые поверхнос-

Освещенность экрана по зонам ($Вт/м^2$)

984	1 599	1 968	1 722	1 107
1 722	3 321	5 658	4 428	1 845
2 644,5	11 931	24 600	12 423	3 444
2 263,2	6 519	11 070	4 674	2 337
1 107	1 845	2 214	1 845	1 230

сумма

114 500

ти. Принимая потери на одной кварцевой поверхности за 4 % [4], получим потери на входном блоке 16 %.

Внутри барокамеры расположено коллимирующее зеркало. После смесителя световой поток поступает на это зеркало, отражается и направляется внутрь термобарокамеры, образуя световой поток в сечении $2 \times 1 \text{ м}^2$.

Принимая коэффициент отражения коллимирующего зеркала 0,85, имеем потери внутри камеры 31 %.

Так, по экспериментальным данным, на площадь 2 м^2 приходится 467,13 Вт световой мощности от одной лампы (при установленной мощности на лампе 2 560 Вт). Или в рабочей зоне термобарокамеры имеем плотность светового потока $467,13 / 2 = 233,6 \text{ (Вт/м}^2\text{)}$.

Исходя из требований, предъявляемых к имитатору солнца (плотность потока 1 340...1 440 Вт/м²), рассчитано количество ламп, необходимое для формирования необходимой плотности потока:

$$N = 1440 / 233,6 = 6,2 \text{ (шт.)}$$

Следовательно, для создания светового потока необходимой плотности при тепловакуумных испытаниях достаточно суммировать потоки от семи ламп.

Учитывая, что эксперимент проведен для мощности лампы 2 560 Вт, а максимальная мощность лампы составляет 10 000 Вт, можно говорить о запасном ресурсе ламп. Это позволяет эксплуатировать их в самом щадящем режиме, что в свою очередь может обеспечить более долгий срок их эксплуатации.

Таким образом, результаты эксперимента подтверждают возможность и желательность использования ламп OSRAM XBO 10 000OFR в имитаторах солнечного излучения. При этом необходимо произвести расчет и построение светооптической схемы суммирования потоков от семи ламп XBO.

Если провести сравнение эксплуатационных характеристик используемых ранее в имитаторе солнца ламп ДКсРМ-55 000 и ламп OSRAM XBO 10 000OFR, можно обозначить следующее: лампа ДКсРМ-55 000 имеет электрическую мощность 55 кВт, оптическую мощность примерно 15 кВт, при этом требуется водяное охлаждение лампы (что довольно затратно), средний ресурс лампы составляет 200 часов. Лампа OSRAM XBO 10000 XBO при электрической мощности 10 кВт обеспечивает оптическую мощность приблизительно 6 кВт, требуется лишь воздушное принудительное охлаждение и средний ресурс лампы составляет 500 часов.

Учитывая также другие характеристики ламп (стабильную световую дугу; работу от постоянного тока; возможность повторного зажигания из горячего состояния; полный световой поток практически сразу после зажигания), можно утверждать, что лампы довольно удобны в эксплуатации.

Кроме того, широкое применение ламп XBO в медицине и кинопромышленности делает их доступными по цене, поскольку налажен их серийный выпуск.

Библиографические ссылки

1. Лампа ДКсРМ-55 000-УХЛ-4 : техн. описание ИКБЖ 675 637. 004 ГО.
2. XBO Theatre Lamps. Technology and Applications [Electronic resource] // Osram Sylvania Inc. URL: www.osram.com (data of visit 13.04.2010).
3. Kinoton. Operating Manual // Lamphouse. 2003. № 12.
4. Прикладная оптика : учеб. пособие для приборостроит. специальностей вузов / Л. Г. Бибчук, Ю. В. Богачев, Н. П. Заказнов и др. ; под общ. ред. Н. П. Заказнова. М. : Машиностроение, 1988.

S. A. Krat, A. A. Filatov, V. V. Hristich

SPACECRAFT THERMAL VACUUM TESTING: AN EXPERIENCE OF CREATION OF SUNLIGHT SIMULATOR BASED ON THE HIGH-PRESSURE GAS-DISCHARGE LAMPS

This work considers a possibility to use the commercial xenon lamps of XBO-series for creation of a Radiation source integrated into Sunlight Simulators. The experimental studies of lamp photonic characteristics have been performed.

Keywords: thermal vacuum test, sunlight simulator, radiation source, light flux, XBO-lamp.

© Крат С. А., Филатов А. А., Христич В. В., 2010