

задачи (выполнение принципа приоритетности) позволяет получить дополнительный эффект:

$$W_{\text{доп}}^{\text{Э}} = W_{\text{доп}}^{\text{Э}} (A_{\text{ГХ}}^{\text{ДЦА}}). \quad (21)$$

Качество дополнительного выходного эффекта $W_{\text{доп}}^{\text{Э}}^{\text{треб}}$ в значительной степени определяется уровнем финансирования разработки ДЦА и ее адаптации к конструкции КА:

$$W_{\text{доп}}^{\text{Э}}^{\text{треб}} = A_{\text{ГХ}}^{\text{ДЦА}} \cup C_{\text{фин}}^{\text{ДЦА}}, \quad (22)$$

где $C_{\text{фин}}^{\text{ДЦА}}$ – дополнительные финансовые затраты на создание ДЦА, ее адаптацию к конструкции КА и эксплуатацию в составе КА.

Соответственно, общие расходы на разработку, создание и эксплуатацию при ДИ КА будут

$$C_{\text{фин}}^{\Sigma} = C_{\text{фин}} + C_{\text{фин}}^{\text{ДЦА}}. \quad (23)$$

Итак, для повышения эффективности решения целевых задач в околоземном космическом пространстве целесообразно оснащать штатные КА дополнительной

целевой аппаратурой за счет использования имеющихся резервов и осуществлять использование космического аппарата в интересах двух и более заказчиков. Двойное использование КА может быть определено как способ получения дополнительного выходного эффекта в ходе целенаправленного процесса функционирования КА, реализуемый путем обеспечения решения дополнительных целевых задач за счет более эффективного использования технических возможностей КА наряду с выполнением космическим аппаратом возложенных на него штатных целевых задач. Основополагающими принципами двойного использования КА являются принцип приоритетности, принцип конфиденциальности и принцип экономичности.

Библиографическая ссылка

1. Кислицкий М. И. Методика обоснования применения дополнительной целевой аппаратуры на космических аппаратах : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2008.

M. I. Kislitsky

DUAL-USE SPACECRAFT CONCEPTION

Development of dual-use of spacecrafts is very effective for receiving a considerable bonus from the capital that has been invested in spacecraft creation, with the minimal additional investment. Dual use of spacecrafts conceptual scheme, foundations and formalization are given.

Keywords: spacecraft, dual-use, conception.

© Кислицкий М. И., 2011

УДК 629.78.018.3

С. А. Крат

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИМИТАТОРОВ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрены вопросы имитации теплового излучения Солнца в процессе тепловакуумной отработки КА и составных частей, дана оценка факторов, влияющих на качество и КПД имитирующих установок. Указаны направления повышения эффективности имитаторов солнечного излучения.

Ключевые слова: тепловакуумные испытания, имитатор Солнца, оптическая система, тепловое излучение, эффективность, КПД.

Существует прямая и весьма сильная связь между надежностью космического аппарата (КА), продолжительностью его штатной эксплуатации и средствами, затраченными на его наземную экспериментальную отработку (НЭО). Чем выше качество и точность имитации условий натурной эксплуатации КА во время НЭО, тем больше вероятность его безотказной работы.

В комплексный план экспериментальной отработки КА включают тепловакуумные испытания, которые подразумевают проверку теплового состояния оборудования и подтверждение расчетных теплофизических характеристик КА.

На тепловое состояние КА оказывают влияние, главным образом, тепловое солнечное излучение и тепловое излучение планет. Следовательно, экспериментальный стенд для наземной тепловакуумной отработки должен обеспечивать, как наиболее influential фактор, воспроизведение теплового солнечного излучения, а именно: устойчивый солнечный спектр в диапазоне длин волн от 200 до 2 100 нм, интенсивность имитации солнечного потока не менее 1 440 Вт/м², неравномерность потока до ± 10 %.

На всех этапах – от проектирования обеспечивающих вышеуказанные условия систем до их технической реализации – необходимо учитывать как рас-

четные отклонения в имитируемом излучении, так и технически невозможные особенности изготовления, поскольку это оказывает значимое влияние на качество этих обеспечивающих систем и в дальнейшем – на надежность КА.

По степени приближенности имитируемого солнечного излучения (ИСИ) к натурному можно судить об эффективности обеспечивающих систем или имитаторов Солнца – основных составляющих таких экспериментальных стендов.

Разумеется, на эффективность ИСИ непосредственное влияние оказывает правильный учет реальных условий штатной эксплуатации при проектировании оптических систем имитаторов Солнца – учет в моделях отличия действительного хода лучей от идеального, с выполнением законов преломления и отражения на реальных поверхностях.

Основным фактором, которым обладают реальные оптические системы в отличие от идеальных и которые обязательно необходимо учитывать при проектировании, является ограничение пучков, т. е. не все существующие лучи проходят через оптическую систему и достигают пространства изображений и свойственные реальным оптическим системам аберрации – отклонения хода лучей. К таким факторам относятся непопадание луча на поверхность вообще (расчет такого луча в дальнейшем невозможен), эффект полного внутреннего отражения, прохождение луча за острым краем, когда луч оказывается в стороне от точки пересечения поверхностей, прохождение луча за краем диафрагмы и снижение энергетической эффективности вследствие ограничения пучков в результате виньетирования.

Современные компьютерные программы для оптических расчетов, однако, позволяют с достаточной точностью прогнозировать будущую эффективность оптической системы уже на этапе моделирования. Программы учитывают вышеперечисленные факторы. При этом, задавая параметры оптических элементов, возможно «отслеживание» эффективности по мере прохождения светового потока через оптическую систему. Так программный пакет Zemax дает возможность посредством размещения «детекторов» рассчитать эффективность практически в любом месте оптической системы, даже внутри элементов. В данном случае определяющим является правильность задания элементов и их характеристик, например, распределение яркости в дуге источника излучения и пространственное распределение его светового потока от источника.

Так, в работе [1] описано экспериментальное исследование характеристик ксеноновой лампы ХВО с помощью реализации несложной светооптической схемы. В процессе последующих шагов в программе Zemax была смоделирована светооптическая схема экспериментального стенда.

Модель этой схемы и распределение энергетической освещенности на детекторе отображены на рис. 1 и 2 соответственно.

Распределение мощности внутри полученного светового пятна для экспериментального исследования и модели представлено в табл. 1 и 2 соответственно.

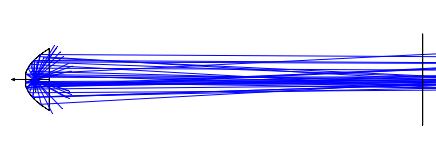


Рис. 1. Модель простейшей оптической системы

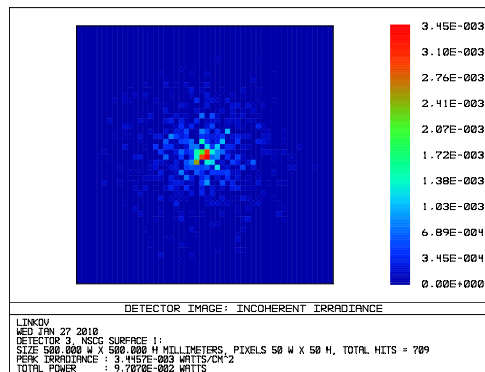


Рис. 2. Распределение энергетической освещенности на детекторе

Таблица 1

Распределение световой мощности, полученное в ходе эксперимента (Вт/м²)

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			Среднее 4 580	

Таблица 2

Распределение световой мощности, полученное в ходе моделирования (Вт/м²)

129,5	402	624	462,7	120,4
780,7	4 981	9 093	4 751	820,1
1840	12 670	35 370	12 280	1 717
793	5 191	9 213	4 816	838,8
128,5	436,8	588,2	463,4	143,1
Сумма 108 653			Среднее 4 346	

Отличие экспериментальных данных от результата, полученного в ходе моделирования, в части полученной на экране энергетической освещенности составило 5,1 %, что говорит о хорошей сходимости результатов моделирования с данными реальной оптической системы и тем самым подтверждает необходимость тщательного предварительного моделирования в процессе создания таких систем, как имитатор Солнца.

Уровень приближенности излучения к натуральному нужно рассматривать с точки зрения таких параметров, как спектр и равномерность излучения, полученного на испытываемом образце (КА или его составная часть). Эти параметры существенным образом определяет компоновка светооптической схемы и характеристики источника излучения.

В отношении компоновки различают осевые и неосевые оптические схемы. В осевых схемах (рис. 3) все основные элементы ИСИ расположены на одной оси, направление которой совпадает с направлением имитируемого излучения [2].

В данном случае на направлении имитируемого излучения приходится устанавливать вспомогательные отражатели и устраивать в элементах оптической схемы отверстия для прохода излучения, что создает как дополнительные потери КПД имитатора, так и наличие «неосвещенного» пятна в поле объекта испытаний. Также в осевых схемах явно наличие переотражения излучения объекта испытаний на себя. Объект испытаний как бы «видит» сам себя в коллимирующем отражателе ИСИ осевой схемы. Это приводит к тому, что собственное излучение объекта испытаний, излученное в направлении коллимирующего отражателя, частично возвращается к КА обратно. Это также сказывается на качестве и составляет такую погрешность имитации солнечного излучения, учет которой затруднен. Кроме того, в таких схемах поле облученности состоит из отдельных полей, каждое из которых освещается «своим» ламповым модулем, и небольшие различия в параметрах отдельных модулей негативно сказываются на равномерности.

В неосевых оптических системах (рис. 4) источник излучения и корректирующие элементы, как правило, находятся в стороне от оси симметрии направленного

на объект светового потока. Световой поток на объект испытаний формируется развернутым на определенный угол коллимирующим параболическим (реже – сферическим) зеркалом, в фокусе которого располагается или имитируется источник излучения.

Здесь нет элементов, затеняющих поток от коллимирующего зеркала, а разворот коллимирующего зеркала обеспечивает «невозврат» как собственного, так и отраженного излучения от объекта испытаний, что снимает свойственную осевой системе определенную погрешность. Также нет необходимости внедрять в систему дополнительные элементы для прохода излучения внутрь камеры, что значительно сокращает общее количество оптических поверхностей и повышает КПД системы. Однако плотность параллельного потока по сечению пучка будет наибольшей ближе к оси симметрии коллимирующего зеркала и наименьшей – в наиболее удаленных областях. Здесь степень неоднородности по сечению пучка будет зависеть от величины апертурного угла поступающего на зеркало светового потока. Однородность в данном случае можно повысить за счет сокращения апертурного угла, но это влечет увеличение габаритов оптической системы и тепловакуумной камеры в целом [2]. Коллимирующие зеркала в таких схемах приходится изготавливать из фасет из-за больших габаритов, что также вносит свою погрешность в плане однородности.

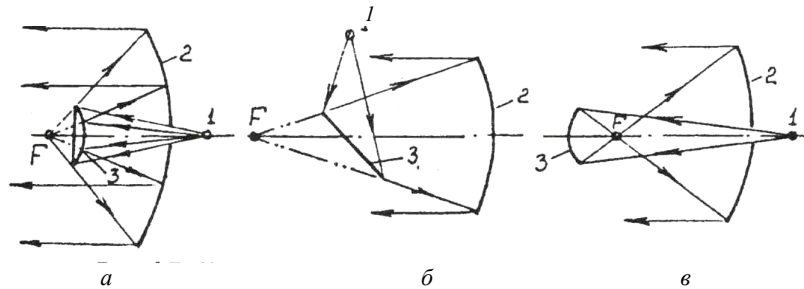


Рис. 3. Классические варианты схем осевого имитатора солнечного излучения:
a – система Кассегрена; *б* – система Ньютона; *в* – система Грегори; 1 – источник излучения; 2 – главное зеркало;
 3 – вторичное зеркало

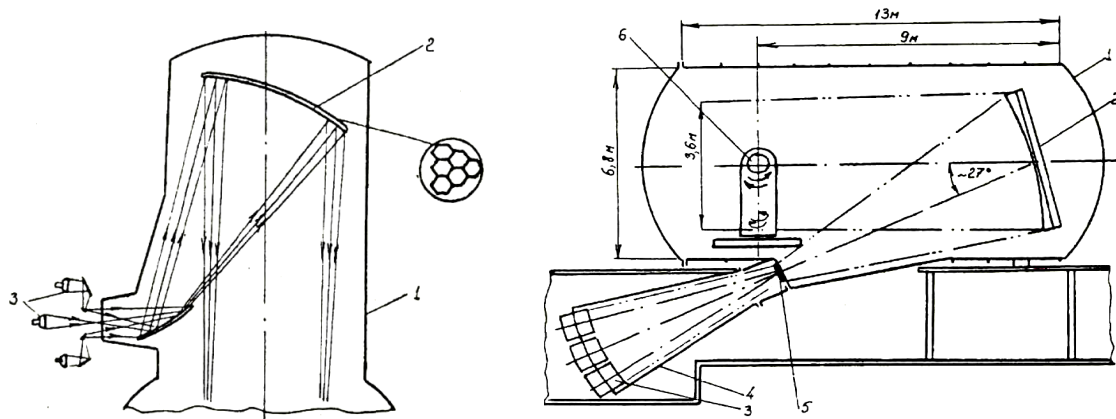


Рис. 4. Варианты неосевых имитаторов солнечного излучения с вертикальным и горизонтальным распространением светового потока соответственно:
 1 – тепловакуумная камера; 2 – главное зеркало; 3 – источник излучения; 4 – ламповая сборка; 5 – входной оптический блок;
 6 – опорно-поворотное устройство

Наиболее важную качественную составляющую имитации солнечного излучения, тем не менее, играет соответствие спектра излучения, поступающего на КА, натурному. Известно, что основная часть энергии электромагнитного излучения Солнца, непосредственно влияющая на тепловой режим КА, заключена в интервале [200; 2 100] нм.

В этом отношении излучение чистого ксенона в процессе электрического газового разряда при сверхвысоком давлении имеет спектральное распределение с цветовой температурой около 6 000 К, наиболее совпадающее с распределением солнечного излучения. При этом размеры излучающей поверхности при очень высокой яркости небольшие, что позволяет их рассматривать как точечные источники излучения и, соответственно, с большей точностью проектировать оптические системы [3]. Но негативным моментом, если посмотреть на спектр (рис. 5), 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 [4]. В этом интервале содержится приблизительно 15 % от интегральной энергии излучения Солнца, а у ксеноновой лампы – более 30 % от общей энергии излучения.

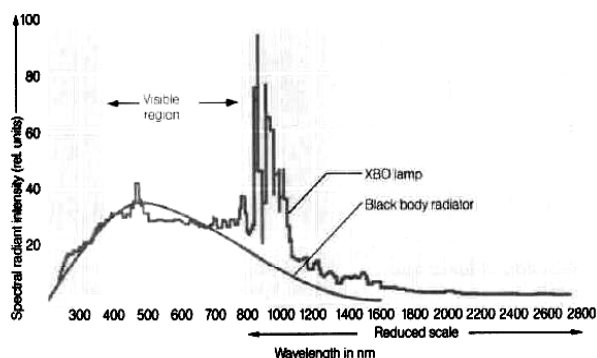


Рис. 5 Спектр ксеноновой лампы ХВО

Также минусом является то, что в высокоомощных ксеноновых лампах (например ДКсРМ-55000) кварцевые колбы или окна необходимо охлаждать сплошным потоком дистиллированной воды для обеспечения их стойкости, а в слоях дистиллированной воды происходит поглощение излучения малых длин волн (часть присущего Солнцу ультрафиолетового излучения) и, соответственно, отклонение спектра.

С точки зрения КПД имитатора эффективность имитатора Солнца можно рассматривать как отношения полезной лучистой энергии, падающей на облучаемую поверхность, к электрической энергии, подводимой к источникам излучения. В данном случае КПД имитатора может быть вычислен как произведение коэффициентов, определяющих потери энергии на каждом из элементов оптической схемы ИСИ. Элементы – это источники излучения, иллюминаторы,

линзы, отражатели, коллимирующие зеркала и др. На линзах и иллюминаторах поток излучения претерпевает потери при прохождении через поверхности (френелевские потери), а на зеркалах и отражателях – потери, связанные с частичным поглощением энергии. Так, ориентировочные величины потерь энергии, падающей на хорошо алюминированные поверхности зеркал, составляют 13–15 %, а величины потерь, связанных с прохождением излучения через иллюминаторы и линзы – 8–10 % [5].

Как правило, даже при тщательном изготовлении элементов ИСИ их КПД составляет около 10 %.

Исходя из вышеизложенного, в целях максимального приближения излучения имитатора Солнца к натурному, минимизируя при этом затраты, можно выделить следующие мероприятия при повышении эффективности ИСИ:

1. Тщательное предварительное моделирование с учетом характеристик реальных оптических элементов. Здесь необходимо экспериментальное подтверждение построенных моделей с последующей их поправкой исходя из экспериментальных данных.

2. Оптимизация оптической системы на модели с подбором оптимальных сочетаний параметров поверхностей.

3. В целом, по нашему мнению, предпочтительнее с точки зрения эффективности строить неосевую оптическую схему, поскольку причины появления неоднородности присутствуют в обоих типах схем, а КПД в неосевых схемах очевидно выше.

4. Использование интерференционных полосовых светофильтров для частичного отражения характерных выбросов энергии в области длин волн [800; 1050] нм. В частности, для приближения спектрального состава излучения ксеноновых ламп к солнечному можно применять фильтры, например, из двуокиси титана или двуокиси кремния, которые наносятся на одну из линз оптической системы.

5. Отказ от водяного охлаждения поверхностей вблизи электрической дуги и применение воздушного. Возможно применение серийно выпускаемых для кинопромышленности ксеноновых ламп, но при исполнении кварцевой колбы без примесей, поглощающих ультрафиолет.

6. Сокращение количества оптических поверхностей.

7. Максимально точная юстировка при настройке оптической системы.

Реализация данных мероприятий позволит повысить качество обеспечивающих установок, имитирующих натурные условия теплового воздействия на КА, и как следствие – надежность самих КА.

Библиографические ссылки

1. Крат С. А., Филатов А. А., Христин В. В. Тепловакуумные испытания космического аппарата: опыт создания имитатора солнечного излучения на основе современных газоразрядных ламп высокого давления // Вестник СибГАУ. Красноярск, 2010. Вып. 2(28). С. 73.

2. Колесников А. В., Сербин В. И. Моделирование условий внешнего теплообмена космических аппаратов. М. : ООО «Информация – XXI век», 1997.

3. Козелкин В. В., Денисов Ю. Н. Имитация космического солнечного излучения. М. : Уч.-изд., 1966.

4. HBO Theatre Lamps // Technology and Applications [Electronic recourse] // Osram Sylvania Inc. URL: www.osram.com (data of visit 13.04.2010).

5. Андрейчук О. Б., Малахов Н. Н. Тепловые испытания космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1982.

S. A. Krat

INCREASE OF SOLAR RADIATION SIMULATOR EFFICIENCY

This work considers a thermal radiation Sunlight simulating in S/C and components of thermal vacuum test. Estimation of factors influencing quality and EFFICIENCY of simulating installations is given. Directions of Sunlight simulators efficiency increase are specified.

Keywords: thermal vacuum tests, Sun simulator, optical system, thermal radiation, efficiency.

© Krat S. A., 2011

УДК 629.7.018.4

В. Н. Николаев

ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ МАССОВОЙ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Разработан термоанемометрический преобразователь массовой скорости воздушного потока. Предложен метод оценивания динамической погрешности измерения на основе построения математических моделей нестационарного теплообмена преобразователя.

Ключевые слова: термоанемометрический преобразователь, массовая скорость, математическая модель, динамическая и статическая погрешности, нестационарный теплообмен.

Исследование аэродинамики летательных аппаратов и определение условий работы оборудования в их отсеках требует результатов измерения вектора массовой скорости воздушного потока. Этот параметр изменяется в широких пределах, а процесс его изменения является нестационарным.

По совокупности предъявляемых требований к преобразователям вектора массовой скорости наиболее целесообразно использовать термоанемометрический метод постоянного тока. При использовании этого метода необходимо решить проблемы измерения нестационарных значений вектора массовой скорости при значительном изменении температуры, а также турбулентности воздушного потока.

Известно, что интенсивность теплообмена тела, омываемого воздушным потоком, неравномерна по поверхности из-за различной толщины и характера движения воздуха в пограничном слое.

Для того чтобы использовать это свойство тела при измерении вектора массовой скорости воздушного потока, необходимо найти оптимальную форму и размеры первичного преобразователя.

Оптимальной формой первичного преобразователя вектора скорости является центрально-симметричная выпуклая фигура, идеал которой – сфера. К центрально-симметричным выпуклым фигурам относятся следующие: тетраэдр, куб, додекаэдр и т. д. Вид фигуры

рационально выбирать из условия оптимизации разрешающей способности и трудоемкости измерительного комплекса, т. е. первичного и вторичного преобразователей, регистрирующего устройства и пр. Если первичный преобразователь будет иметь малое количество граней, то трудоемкость изготовления первичного преобразователя будет низкой, однако алгоритм определения направления перемещения воздуха будет сложен, и, наоборот, если первичный преобразователь будет иметь большое количество граней, то трудоемкость изготовления заметно возрастает, а алгоритм упрощается. Поэтому был выбран додекаэдр (рис. 1), фигура с 12 гранями.

У поверхности летательных аппаратов и в их отсеках может быть турбулентный характер перетекания воздуха. Отсюда грань первичного преобразователя должна воспринимать среднюю массовую скорость воздуха, а не ее флуктуации. Для получения среднеинтегральной интенсивности теплообмена, характеризующейся определенным вектором массовой скорости воздушного потока, размеры чувствительных элементов, нанесенных на грани первичного преобразователя, должны быть больше микромасштаба турбулентности. С другой стороны, первичный преобразователь, введенный в воздушный поток, должен быть настолько мал, чтобы вызываемое им возмущение картины течения было минимально.