

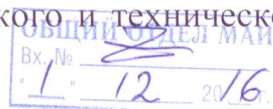
ОТЗЫВ

**официального оппонента, доктора технических наук,
профессора Резника Сергея Васильевича на диссертационную работу
Болотной Камиллы Игоревны
«Разработка методического обеспечения эксплуатации инфракрасных
имитаторов внешних тепловых нагрузок на поверхность космического
аппарата», представленной на соискание ученой степени кандидата
технических наук
по специальности 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы
летательных аппаратов»**

Актуальность темы исследования. Наземные термовакуумные испытания – неотъемлемая, сложная и чрезвычайно ответственная часть процесса создания космических аппаратов (КА). Ценность информации, получаемой в таких испытаниях, в сильной степени зависит от точности воспроизведения ожидаемых условий работы КА, в первую очередь тепловых режимов.

Для моделирования тепловых режимов КА используются достаточно сложные установки и стенды, оснащенные имитаторами внешних тепловых нагрузок с различными типами электрических источников теплового излучения – дуговыми газоразрядными лампами, галогенными лампами накаливания (ГЛН), резистивными нагревательными элементами из сплавов сопротивления. Одни из них предназначены для моделирования воздействия на КА потоков прямого и отраженного небесным телом солнечного излучения, другие дополнительные – для моделирования собственного излучения небесного тела и теплового воздействия от отдельных частей объекта испытаний. Обычно дополнительных средства нагрева имеют общую особенность – основная энергия их излучения сосредоточена в инфракрасном диапазоне с длиной волны излучения, превышающей 2 мкм, где спектральная поглощательная способность подавляющего большинства наружных покрытий КА слабо меняется.

В связи с наблюдающейся тенденцией усложнения конструкции КА и увеличением продолжительности их работы в космосе до 15 лет и более возникает потребность в совершенствовании методического и технического



обеспечения при одновременном повышении экономической эффективности испытательной базы за счет более тонкой настройки средств, применяемых для имитации внешних тепловых нагрузок.

Диссертационная работа Болотной К.И. посвящена решению актуальной задачи, связанной с разработкой нового методического обеспечения для моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность КА в термовакуумных камерах с помощью электрических источников инфракрасного излучения.

Цель диссертации заключается в повышении точности моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность КА с помощью совершенствования методов математического моделирования процессов радиационного теплообмена в термовакуумных камерах.

Структура и содержание диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованных источников из 69 наименований; содержит 120 стр. основного текста, 20 рисунков, 6 таблиц.

Первая глава носит обзорный характер. В ней рассмотрено устройство и области применения электрических источников инфракрасного излучения. Проанализированы особенности моделирования потоков теплового излучения с линейчатыми и условно точечными источниками. Особое внимание уделено принципиальной схеме модуля инфракрасного имитатора на основе галогенных кварцевых ламп накаливания. Он может применяться не только для испытания объектов с «серыми» характеристиками наружных поверхностей, но и для объектов, когда необходимо учитывать спектральную зависимость оптических характеристик наружных поверхностей.

Однако первая глава не свободна от недостатков. В п. 1.2.1 на стр. 14 ошибочно утверждается, что в инфракрасных кварцевых лампах накаливания основным источником ИК излучения являются кварцевые колбы. В действительности основным источником излучения в таких лампах, именуемых также ГЛН, является нагретая вольфрамовая спираль.

Нельзя считать справедливыми утверждения автора на стр. 20 о «...совершенно неопределенном спектре излучения ГЛН, кардинальным образом, зависящим от подводимой мощности. Спектральное распределение энергии излучения ГЛН вполне соответствует фундаментальным законам теории излучения – законам Планка и Вина. Другое дело, что это спектральное распределение при больших электрических мощностях становится «двугорбым», т.к. оболочка из кварцевого стекла также вносит свой вклад в спектральное распределение энергии. Однако в силу линейных вольт-амперных характеристик и с применением балластной нагрузки нагревательные блоки с ГЛН могут начинать работу «с нуля» при малых мощностях и, соответственно, излучать в дальней области ИК спектра, где «двугорбость» отсутствует.

Во второй главе диссертации практически без предварительных разъяснений, без формулировки физических допущений проводится сравнение двух подходов к решению задачи определения оптимального энергетического режима работы инфракрасного имитатора. Известный классический подход основан на использовании необходимого условия существования минимума целевой функции при определенных ограничениях на величину оптимизируемого вектора значений интенсивности излучения модулей имитатора. Новый подход опирается на градиентные методы минимизации целевой функции (метод наискорейшего спуска и метод сопряженных градиентов). Владение инструментами подобных исследований можно считать признаком достаточно высокой квалификации автора, а приложение к задачам оптимизации нагревательных блоков имитаторов излучения весьма полезным в свете задачи повышения точности расчетов.

С другой стороны, выявление с помощью классического подхода у минимизируемой целевой функции нескольких минимумов, в теоретическом плане не является новым. Известна и более высокая достоверность результатов, получаемых градиентными методами оптимизации, в задачах с овражным характером минимизируемой функции.

Значительное место во второй главе (29 страниц) уделено задаче определения угловых коэффициентов, необходимых для выполнения расчетов радиационного теплообмена между электрическими нагревателями, КА и стенками вакуумной камеры. Здесь представлены численно-аналитический подход к определению угловых коэффициентов с учетом возможного взаимного затенения участвующих в теплообмене элементов имитатора и испытуемого объекта. В этой главе интересные результаты получены для линейчатых и для сетчатых нагревателей, которые выполняют вспомогательную роль при формировании поля теплового излучения, воздействующего на КА сложной формы.

Третья глава посвящена определению зависимости интенсивности излучения модулей имитатора от подводимой к ним электрической мощности. Она необычна по своей лаконичности, в ней всего 4 стр.! Автор без потери целостности замысла мог бы присоединить ее содержание в форме параграфа ко второй главе.

Связь между интенсивностью излучения модуля имитатора от подводимой к нему электрической мощности продемонстрирована на примере рассмотрения инфракрасного имитатора установки ВК600/300. В рассуждениях о достигаемых параметрах имитатора автор приводит предположения о величине коэффициента полезного использования подводимой к модулю энергии. Однако величина этого коэффициента слишком важна, чтобы ее задавать произвольно.

В четвертой главе представлены результаты реализации методического подхода к определению оптимальных режимов работы модулей инфракрасных имитаторов термовакуумной установки ВК600/300 при испытаниях перспективных КА «Спектр-РГ» и «Луна-Глоб», создаваемых во ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». С помощью расчетов выявлены энергетические режимы эксплуатации модулей имитатора, при которых достигается максимально возможная точность моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность испытуемого объекта.

Научная новизна. В диссертации разработаны новые подходы к решению задач моделирования внешних тепловых нагрузок от имитаторов инфракрасного излучения к КА в термовакуумных камерах. Эти подходы охватывают:

1. Расчет угловых коэффициентов между тепловоспринимающими элементами испытуемых объектов и излучающими нитями сетчатых нагревателей. Подход основан на замене элементарных по длине элементов цилиндрической нити плоскими элементами с изменяющейся по длине нити и по ширине сетчатого нагревателя ориентацией. Новый методический подход к расчету угловых коэффициентов и алгоритм определения энергетического режима работы сетчатых нагревателей обладает достаточно высокой точностью и существенно упрощает ввод данных о сетчатом нагревателе и в десятки раз уменьшается время решения задачи оптимизации режима работы системы нагревателей.

2. Расчет облученности поверхности испытуемых объектов нитями сетчатых электрических нагревателей.

3. Определение коэффициентов связи между подводимой к линейчатому модулю имитатора электрической мощностью и интенсивностью его излучения.

4. Разработку принципиальной схемы условно точечного модуля инфракрасного имитатора, основанного на использовании ГЛН, как источников энергии для излучающей черной рабочей поверхности модуля.

Практическое значение:

1. Разработанные в диссертации и апробированные на практике методики и компьютерные программы представляют собой эффективные инструменты обоснования режимов работы имитаторов тепловых нагрузок, ценные для планирования термовакуумных испытаний перспективных КА.

2. Результаты работы использованы во ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» для решения задачи термостатирования КА «Спектр-РГ»

при проведении его комплексных электрических испытаний в, а также при подготовке испытаний изделия «Луна-Глоб» на установке ВК600/300.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 4 статьях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 05.07.03 «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов».

Замечания:

1. При выборе методических подходов к экспериментальному моделированию процессов радиационного теплообмена не приведены требования к точности воспроизведения тепловых режимов КА.

2. В диссертации недостаточно полно представлены физические допущения, используемые при формулировке математических моделей радиационного теплообмена, а сами эти модели детально не раскрыты, что затрудняет анализ возможности учета спектрального распределения энергии теплового излучения электрических нагревателей, отражателей, КА и поверхностей термовакуумной камеры. Нет данных о конкретном виде индикатрис отражения излучения для поверхностей, участвующих в радиационном теплообмене, как в модельных исследовательских задачах, так и сугубо прикладных, относящихся к термовакуумным испытаниям на установке ВК600/300.

3. В п. 3.2 не обоснована величина коэффициента полезного использования подводимой к модулю имитатора энергии, что вызывает сомнения в достоверности полученного значения коэффициента связи между интенсивностью излучения элемента модуля имитатора и подводимой к модулю электрической мощности.

4. Не ясно на каком основании на стр. 76 в п. 4.1.1. автор делает вывод об ожидаемых 2-х процентных температурных погрешностях на теплоизолированных элементах испытуемого объекта при высокой отражательной способности покрытия поверхности отражателей.

5. Отдельные части текста плохо отредактированы, имеются неточности и неисправленные опечатки, в частности:

- на стр. 14 читаем странную фразу: «...[Поверхность] отражателя может иметь плоскую (пропущено слово «форму»?) или форму цилиндрической поверхности с различной формой направляющей линии отражателей»;

- на стр. 19, где приведена принципиальная схема модуля имитатора, в подписи к рис. 1.2 плоский излучатель назван коническим диффузором 4;

- на стр. 26 дважды повторен текст «Выбор $u_j(0)$ в качестве»;

- на стр. 27 не согласован текст «Геометрическую модель может задаваться одним из двух способов»; аналогично на стр. 76 «Реальная сложная по геометрической конфигурации боковая поверхность испытуемого объекта заменялась поверхностями двух стыкающихся цилиндрическими поверхностями, отличающимися высотой, формой и размерами направляющих линий»;

- на стр. 85 в п. 4.2.1 и в п. 4.2.2 на той же странице дважды приведен текст: «Комплексные тепловакуумные испытания КА «Луна-Глоб» будут проводиться в ВК600/300».

6. Литература оформлена с отступлением от ГОСТ 7.0.11-2011. Кроме того, на стр. 116-117 в списке литературы отсутствуют источники 26-29. В источнике 25 фамилия Белов написана с маленькой буквы.

Заключение. Отмеченные недостатки вызывают досаду, но не снижают ценности и практической значимости диссертации. Проведенные исследования можно характеризовать как научно обоснованные методические разработки, обеспечивающие решение важных прикладных задач в сфере экспериментальной отработки КА в условиях моделирования внешнего теплообмена. Результаты работы можно рекомендовать к использованию и развитию в научных и производственных коллективах, занимающихся проведением наземной экспериментальной отработки КА.

Диссертация Болотной К.И. представляет собой законченное исследование, посвященное актуальной теме. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Диссертация удовлетворяет требованиям,

предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов», а ее автор, Болотная Камилла Игоревна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Доктор технических наук,
профессор,
заведующий кафедрой
«Ракетно-космические композитные
конструкции»
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский
университет)»



Резник Сергей Васильевич

Адрес: 105005 Москва, 2-я Бауманская улица, д. 5, стр. 1

Телефон 499 261-17-43, 499 263-65-22
8 (909)676-39-53
E-mail: sreznik@bmstu.ru

Подпись С.В. Резника заверяю



А. Г. МАТВЕЕВ
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ

ТЕЛ 8499-263 67 69