

ОТЗЫВ

официального оппонента заместителя генерального конструктора-начальника направления КБ «Салют» им В.М. Мясищева акционерного общества «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» доктора технических наук, профессора Сова Александра Николаевича на диссертационную работу, выполненную Шеметовой Еленой Владиславовной на тему: «Экспериментальное моделирование внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасном имитаторе с блочными линейчатыми излучателями» и представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

1. Актуальность избранной темы диссертационной работы

На современном этапе научно-технологического развития Российской Федерации повышается значимость эффективного освоения и использования космического пространства. Испытания космических комплексов и их составных частей имеют существенное значение для эффективного применения ракетно-космической техники по назначению. Одним из более сложных аспектов испытаний космических аппаратов (КА) является точное моделирование в экспериментальных установках условий внешнего теплообмена КА различного типа. Сложность обусловлена отсутствием необходимых и обоснованных результатов экспериментального моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасном имитаторе с блочными линейчатыми излучателями с учетом режима переменной солнечной ориентации, нестационарных во времени и пространственной ориентации лучистых полей, источником которых может быть и Солнце, и тепловое излучение небесных тел, вблизи которых КА находится, а также значительностью затрат ресурсов на экспериментальные исследования в наземных установках, оснащенных солнечными имитаторами, для исследования внешних лучистых потоков.

Цель диссертационной работы заключается в обосновании и разработке научно-методического обеспечения экспериментального моделирования тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасных имитаторах с блочными линейчатыми излучателями для повышения точности моделирования и упрощения системы управления энергетическими характеристиками имитаторов.

Поэтому **тема диссертационной работы и решенная научная задача** обоснования и разработки научно-методического обеспечения экспериментального моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасном имитаторе с блочными линейчатыми излучателями **являются актуальными.**

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Основными научными результатами, обоснованными и разработанными лично автором, являются:

1. Методика определения оптимального энергетического режима работы инфракрасного имитатора модульного типа с блочными линейчатыми излучателями, отличающаяся от известных тем, что учитывает режим переменной солнечной ориентации, нестационарные во времени и пространственной ориентации лучистые

поля, источником которых может быть и Солнце, и тепловое излучение небесных тел, вблизи которых КА находится.

2. Радиационная модель трубчатой кварцевой лампы накаливания с вольфрамовой спиралью, которая, в отличие от существующих, позволяет определить зависимость плотности падающего на элемент испытываемого объекта теплового потока от подводимой к модулю электрической мощности и его геометрических параметров, а также в дальнейшем оптимизировать закон распределения подводимой к модулям электрической мощности в отношении точности воспроизведения заданных тепловых нагрузок.

3. Результаты моделирования тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата при использовании трубчатых кварцевых ламп накаливания, отличающиеся от известных тем, что позволяют оптимизировать закон распределения подводимой к модулям электрической мощности в отношении точности воспроизведения заданных тепловых нагрузок с учетом зависимости плотности падающего на элемент испытываемого объекта теплового потока от подводимой к модулю электрической мощности и его геометрических параметров и, как следствие, выявлять и исключать причины появления недопустимо больших погрешностей.

4. Разработана новая принципиальная схема инфракрасного имитатора модульного типа с блочными линейчатыми излучателями, которая отличается от существующих тем, что позволяет выполнять экспериментальное моделирование внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасном имитаторе с блочными линейчатыми излучателями с учетом режима переменной солнечной ориентации, нестационарных во времени и пространственной ориентации лучистых полей, источником которых может быть и Солнце, и тепловое излучение небесных тел, вблизи которых КА находится.

Таким образом, все полученные новые научные результаты, выводы и рекомендации работы являются обоснованными. Выводы и положения, разработанные в рамках диссертационной работы, основаны на научных результатах исследований и являются их следствием.

3. Новизна и достоверность научных результатов

Научная новизна полученных результатов определяется тем, что обоснованы и разработаны:

усовершенствованная методика определения оптимального энергетического режима работы инфракрасного имитатора модульного типа с блочными линейчатыми излучателями с учетом режима переменной солнечной ориентации, нестационарных во времени и пространственной ориентации лучистых полей, источником которых может быть и Солнце, и тепловое излучение небесных тел, вблизи которых КА находится;

модифицированная радиационная модель трубчатой кварцевой лампы накаливания с вольфрамовой спиралью с учетом зависимости плотности падающего на элемент испытываемого объекта теплового потока от подводимой к модулю электрической мощности и его геометрических параметров;

результаты моделирования тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата при использовании трубчатых кварцевых ламп накаливания, позволяющие оптимизировать закон распределения подводимой к модулям электрической мощности в отношении точности воспроизведения заданных тепловых нагрузок с учетом зависимости плотности падающего на элемент испытываемого объекта теплового потока от подводимой к модулю электрической мощности и его геометрических параметров;

новая принципиальная схема инфракрасного имитатора модульного типа с блочными линейчатыми излучателями для экспериментального моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасном имитаторе с блочными линейчатыми излучателями с учетом режима переменной солнечной ориентации, нестационарных во времени и пространственной ориентации лучистых полей, источником которых может быть и Солнце, и тепловое излучение небесных тел, вблизи которых КА находится.

Достоверность новых научных результатов и положений обеспечивается всесторонним анализом работ, примыкающих к исследуемой области, выполненных другими авторами, правильностью и обоснованностью постановки научной задачи и принятых допущений, корректностью использования аналитических и численных методов математического моделирования, методов теории теплообмена излучением для расчёта теплообмена между элементами поверхности испытываемых объектов и излучающими элементами имитаторов внешних тепловых нагрузок, градиентных методов оптимизации целевых функций (метод наискорейшего спуска и метод сопряжённых градиентов) при определении энергетических режимов работы имитаторов, полным учетом основных факторов, влияющих на плотность падающего на элемент испытываемого КА теплового потока, нестационарные во времени и пространственной ориентации лучистые поля, источником которых может быть и Солнце, и тепловое излучение небесных тел подводимой к модулю электрической мощности, геометрических параметров излучающих элементов имитаторов внешних тепловых нагрузок, а также на объективность получаемых научных результатов, и подтверждается непротиворечивостью результатов исследований и материалов публикаций в близких областях исследований, хорошим совпадением (расхождение не превышает 15%) результатов теоретических исследований с результатами физических экспериментов, полученными в АО «НПО им. С.А. Лавочкина» при проведении автономных тепловакуумных испытаний отдельных фрагментов разрабатываемых изделий.

Автор свободно владеет методами математического моделирования, методами теории теплообмена излучением для расчёта теплообмена между элементами поверхности испытываемых объектов и излучающими элементами имитаторов внешних тепловых нагрузок, градиентными методами оптимизации целевых функций (методом наискорейшего спуска и методом сопряжённых градиентов), методами организации и проведения испытаний, а также современными методами и средствами измерения характеристик стационарных и нестационарных процессов. Это позволяет ему разрабатывать адекватные модели анализируемых тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата при использовании трубчатых кварцевых ламп накаливания, радиационную модель трубчатой кварцевой лампы накаливания с вольфрамовой спиралью с учетом подводимой мощности и геометрических размеров, доводить их до достоверных теоретически и практически значимых научных результатов, обоснованных выводов и других положений.

Новизна и достоверность результатов работы подтверждается также публикацией и апробацией основных положений диссертации на международном, всероссийском и ведомственном уровнях, положительным эффектом их использования в АО «НПО им. С.А. Лавочкина» при подготовке программ и методик проведения автономных тепловакуумных испытаний в вакуумной камере ВК-27 с использованием системы сетчатых нагревателей отдельных фрагментов создаваемых на предприятии изделий.

4. Значимость результатов диссертации для науки и практики и возможные конкретные пути их использования

Теоретическая значимость научных результатов диссертационной работы заключается в обосновании и разработке научно-методического аппарата экспериментального моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасном имитаторе с блочными линейчатыми излучателями с учетом режима переменной солнечной ориентации, нестационарных во времени и пространственной ориентации лучистых полей, источником которых может быть и Солнце, и тепловое излучение небесных тел, вблизи которых КА находится, зависимости плотности падающего на элемент испытываемого КА теплового потока от подводимой к модулю электрической мощности и его геометрических параметров, а также результатов оптимизации закона распределения подводимой к модулям электрической мощности в отношении точности воспроизведения заданных тепловых нагрузок.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что её результаты позволяют значительно (более, чем в 3 раза) повысить достоверность воспроизведения заданных тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасном имитаторе с блочными линейчатыми излучателями с учетом режима переменной солнечной ориентации, нестационарных во времени и пространственной ориентации лучистых полей, источником которых может быть и Солнце, и тепловое излучение небесных тел, вблизи которых КА находится, что подтверждается использованием результатов исследований в АО «НПО Лавочкина» при подготовке рабочих программ проведения автономных тепловакуумных испытаний КА и их составных частей в вакуумной камере ВК-27.

5. Оценка содержания диссертации

Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, которая написана грамотным техническим языком, хорошо оформлена и снабжена достаточным количеством иллюстраций. Содержание и научные результаты диссертационной работы соответствуют пп.1, 6, 7, 8 паспорта специальности 05.07.03 - «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов». Структура работы логична и отвечает результатам исследований. Диссертационная работа содержит введение, четыре главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, библиографический список из 69 наименований. Диссертационная работа содержит 111 стр. основного текста, 25 рисунков и 3 таблицы. Автору удалось лаконично изложить основные положения диссертационных исследований и логично распределить материал по главам.

Во введении приведено обоснование актуальности выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, охарактеризована новизна полученных результатов и обоснована их достоверность. Были упомянуты во введении отечественные организации, участвующие в таких исследованиях.

В первой главе диссертации проанализирован вопрос о перспективах экспериментального моделирования внешнего теплообмена космических аппаратов в условиях, приближающихся к натурным. В результате делается вывод, что экспериментальное моделирование влияния космического вакуума, радиационных свойств космического пространства, нежесткого электромагнитного излучения Солнца на КА, являются вполне решаемыми с необходимой точностью задачами, но моделирование совместного воздействия переменных по времени и ориентации полей излучения, исходящего от Солнца, планет и частей космического аппарата, не

вошедших в состав испытуемого объекта, во многих случаях является практически неразрешимой задачей. В связи с этим важное значение приобретают приближенные методы воспроизведения расчетных значений внешних тепловых нагрузок с помощью инфракрасных источников излучения в совокупности с системами вакуумирования и системой криогенных экранов, позволяет воспроизводить с приемлемой точностью влияние внешнего теплообмена на тепловое состояние КА. В результате были сформулированы основные требования к конструкции и излучающим элементам инфракрасных имитаторов. В главе были рассмотрены способы вакуумирования, моделирование радиационных свойств космического пространства, моделирование воздействия на КА электромагнитного излучения Солнца.

Вторая глава диссертации посвящена анализу характеристик известных средств приближенного моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность КА. Проанализированы достоинства и недостатки инфракрасных имитаторов модульного типа с линейчатыми излучателями, на основе трубчатых ламп накаливания, с условно точечными излучателями, термозкраны, термозкраны в сочетании с системой галогенных ламп накаливания, сетчатые излучатели, поверхностные управляемые электронагреватели. На основе анализа были сделаны выводы, что задача внешних условий теплообмена КА с высокой точностью в наземной экспериментальной установке, охватывающие все классы околопланетных аппаратов очень сложная не только в техническом плане, но и при разработке методических подходов. В первую очередь проблемы связаны с тем, что во многих случаях возникает необходимость реализации в экспериментальных установках, нестационарных во времени и пространстве полей излучения, формируемых одновременно как Солнцем, так и планетой. В связи с этим большое значение имеют приближенные методы моделирования внешнего теплообмена космического аппарата с использованием источников инфракрасного излучения.

Третья глава посвящена исследованию методов определения оптимальных энергетических режимов работы имитаторов различных типов с инфракрасными источниками теплового излучения. Методы оптимизации режимов работы инфракрасных имитаторов модульного типа с линейчатыми и условно точечными излучателями, ранее были исследованы Палешкиным А.В. и Болотной К.И. В диссертации Е.В. Шеметовой представлены результаты сравнения рассмотренных методов. Проведен анализ спектральных аспектов проблемы определения режимов работы имитатора.

В четвертой главе представлены результаты исследований по проблеме создания инфракрасного имитатора модульного типа с линейчатыми излучателями, скомпонованными в отдельные автономно управляемые блоки. В обеспечении создания такого имитатора в диссертации решались следующие задачи: устанавливалась зависимость плотности падающего на элемент испытуемого объекта теплового потока от подводимой к модулю электрической мощности и его геометрических параметров; выявлялся оптимальный в отношении точности воспроизведения заданных тепловых нагрузок закон распределения подводимой к модулям электрической мощности.

Однако, по диссертационной работе имеются частные замечания.

1. При моделировании внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасном имитаторе с блочными линейчатыми излучателями с учетом режима переменной солнечной ориентации, нестационарных во времени и пространственной ориентации лучистых полей, источником которых

может быть и Солнце, и тепловое излучение небесных тел, вблизи которых КА находится, не учитывается форма КА и его составных частей, что ухудшает точность и адекватность результатов моделирования.

2. Автор корректно обосновал, вербально сформулировал, декомпозировал до частных результатов и решил актуальную научную задачу обоснования и разработки научно-методического аппарата экспериментального моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасном имитаторе с блочными линейчатыми излучателями. Однако, в диссертационной работе отсутствует в явном виде математическая постановка решаемой научной задачи обоснования и разработки научно-методического аппарата экспериментального моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасном имитаторе с блочными линейчатыми излучателями, что затрудняет понимание ее сущности с точки зрения математической логики, осмысление и оценку целостности и полноты ее решения. Поэтому, было бы целесообразно с методической точки зрения привести математическую постановку научной задачи.

3. В диссертационной работе не приведены результаты сравнительного анализа эффективности применения известных и разработанных автором методов экспериментального моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасном имитаторе с блочными линейчатыми излучателями, а также не обоснованы и не сформулированы основные направления их совершенствования.

4. Имеются недостатки в оформлении, неточности и неисправленные опечатки в тексте, в частности: - отсутствует двоеточие при перечислении пунктов на странице 8, перечисление пунктов по всему объему диссертации отображено с использованием разных символов («-» , «•» раздел 1.3.3, 2.7 и т.д.); - надписи на некоторых рисунках выполнены мелким шрифтом и плохо читаемы (оси на рисунках 1.4, 3.1); - на рисунке 4.3 б) должно быть обозначение $P_{\text{top-19}}$ вместо $P_{\text{бок-19}}$; - на стр. 89 слово «таблица» следует заменить на «таблицы»; - при оформлении списка литературы автор пытался следовать ГОСТ 7.0.5-2008. Однако это ему плохо удалось.

Указанные недостатки не снижают уровня научной новизны, теоретической и практической значимости, степени реализации научных результатов, общей положительной оценки выполненной диссертационной работы и являются направлениями дальнейших научных исследований.

6. Публикация, апробация и реализация основных результатов диссертации

Научные результаты, положения, выводы и рекомендации, полученные автором в рамках диссертационной работы, **достаточно полно опубликованы**: всего опубликовано 8 научных работ, из них 3 научные статьи, в том числе 2 научные статьи опубликованы в рецензируемых изданиях и журналах по перечням ВАК при Минобрнауки России, 1 научная статья опубликована в издании, цитируемом международной базой SCOPUS, а также в 5-ти трудах и материалах научных конференций.

Основные научные результаты достаточно полно апробированы на научно-технических конференциях международного, всероссийского и ведомственного уровня: на XLIV Молодежной международной научной конференции «Тагаринские чтения» (Москва, 2018 г.), на XXV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Судак, 2018 г.), на

XLIV академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти С.П. Королёва – пионеров освоения космического пространства (Москва, 2020 г.), на XLII Международной научно-практической конференции “World Science: problems and innovation” (Пенза, 2020), на XXVIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов “Вакуумная наука и техника” (Судак, 2021 г.).

Основные результаты диссертационной работы достаточно полно реализованы в АО «НПО им. С.А. Лавочкина» при подготовке рабочих программ проведения автономных тепловакуумных испытаний в вакуумной камере ВК-27 с использованием системы сетчатых нагревателей отдельных фрагментов создаваемых на предприятии изделий.

Диссертационная работа выполнялась в ходе плановых исследований, проводимых на кафедре 610 «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», в рамках государственного задания в сфере научной деятельности по научному проекту № FSFF-2020-2016, выполняемого при финансовой поддержке Минобрнауки России.

В дальнейшем результаты диссертационной работы целесообразно использовать заказывающими управлениями Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» при обосновании требований технических заданий на создание и эксплуатацию перспективных космических аппаратов и их составных частей, технического облика космических аппаратов и их составных частей, экспериментальных исследований и установок моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасном имитаторе с блочными линейчатыми излучателями с целью применения их в качестве перспективных средств наземной экспериментальной отработки космических аппаратов народнохозяйственного значения, а также образцов вооружения и военной техники.

7. Соответствие содержания автореферата диссертационной работы основным идеям и выводам диссертационной работы. Качество оформления автореферата диссертационной работы

Автореферат диссертационной работы правильно и полно передаёт основное содержание диссертационной работы, оформлен в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования России. Стиль изложения способствует пониманию содержания работы. Содержание автореферата соответствует специальности, по которой диссертационная работа представлена к защите.

8. Заключение о соответствии диссертационной работы требованиям Положения о присуждении учёных степеней

Диссертационная работа Шеметовой Е.В. является завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение актуальной научной задачи обоснования и разработки научно-методического обеспечения экспериментального моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасном имитаторе с блочными линейчатыми излучателями, имеющей существенное значение для развития теории тепловых режимов летательных аппаратов, а также для народного хозяйства и обеспечения обороноспособности страны.

По уровню научной новизны, практической значимости и степени реализации научных результатов диссертационная работа отвечает критериям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Шеметова Елена Владиславовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов».

Официальный оппонент:

Доктор технических наук,
профессор, акционерное общество
«Государственный космический научно-
производственный центр имени М.В.
Хруничева», заместитель генерального
конструктора-начальник направления КБ
«Салют» им В.М. Мясищева

(специальность 20.02.14)

Сова Александр Николаевич

«10» декабря 2021 года

Адрес: 121087 Москва, Новозаводская, д. 18
Телефон +7(903)588-91-61 E-mail: SLSova@mail.ru

Подпись заместителя генерального конструктора--начальника направления КБ «Салют» им В.М. Мясищева акционерного общества «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» доктора технических наук, профессора Сова А.Н. заверяю.

Первый заместитель генерального конструктора
КБ «Салют» им В.М. Мясищева АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева»

«10» декабря 2021 года



Скоков Игорь Борисович