

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертационную работу Ярославцевой
Марии Михайловны на тему «Разработка методики анализа усталостной
прочности агрегатов наземной космической инфраструктуры при
многократных механических и газодинамических воздействиях»,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических
наук по специальности 2.5.13 «Проектирование, конструкция,
производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов»**

Диссертационная работа Ярославцевой М.М. посвящена разработке методики анализа усталостной прочности агрегатов наземной космической инфраструктуры (стартового оборудования ракет космического назначения) при многократных механических и высокотемпературных газодинамических воздействиях. Предложена методика численной оценки малоцикловой усталостной прочности силовых конструкций стартового комплекса, подверженных циклическому термосиловому нагружению струёй продуктов сгорания ракетного топлива, позволяющая обосновывать ресурс изделий на этапе проектирования.

Актуальность темы диссертации

Мировая космонавтика вступила в новый этап интенсивного развёртывания низкоорбитальных спутниковых группировок, что требует существенного увеличения темпа пусков ракет-носителей. Бесперебойная и безопасная работа стартовых комплексов напрямую зависит от исправного состояния наземного стартового оборудования — газоотражателей, пусковых столов, башен обслуживания, — испытывающего при каждом запуске двигательной установки экстремальное газодинамическое термосиловое воздействие продуктов сгорания.

Периодическое воздействие высокотемпературной газовой струи приводит к циклическому асимметричному деформированию силовых элементов, накоплению повреждений и преждевременному разрушению защитных покрытий и конструкций, что вынуждает проводить частые внеплановые ремонтно-восстановительные работы. Ранее разработанные методики, как правило, охватывают частные дисциплинарные вопросы деформирования простейших образцов и не рассматривают работу габаритных силовых конструкций стартового оборудования в условиях циклического высокотемпературного газодинамического воздействия в целом. Это приводит к неучёту фактора цикличности нагружения при проектировании.

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

В этой связи разработка методики анализа усталостной прочности агрегатов наземной космической инфраструктуры, позволяющей обоснованно оценивать допустимое число циклов газодинамического нагружения и назначать ресурс изделий уже на этапе проектирования, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Новизна научных результатов

В работе предложены новые методы и приемы анализа напряженно-деформированного состояния конструкций с оцениванием циклической прочности, основанные на применении разработанной методики анализа усталостной прочности агрегатов наземной космической инфраструктуры при многократных механических и газодинамических воздействиях. В отличие от ранее известных подходов, предлагаемая автором методика позволяет обосновывать ресурс стартового оборудования, подверженного циклическому термосиловому воздействию, непосредственно на этапе проектирования.

Новыми являются также предложенная схема упрощения газодинамического цикла нагружения для расчёта допустимого числа циклов до наступления предельного состояния материала, алгоритм обоснования циклической прочности малых конструктивных элементов в составе габаритных конструкций (метод субмоделирования), а также результаты сравнительного анализа схем монтажа листов металлооблицовки газоотражателя по критерию малоциклового усталостной долговечности. Судя по представленному обзору литературы, работы в данном направлении применительно к стартовому оборудованию в условиях циклического высокотемпературного газодинамического нагружения в открытой печати практически отсутствуют.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования

Теоретическая значимость работы состоит в адаптации теории малоциклового усталости Коффина–Мэнсона к задачам оценки ресурса конструкций наземного оборудования ракет космического назначения, подверженных газодинамическому воздействию, а также в разработке новой методики численного анализа усталостной прочности стартового оборудования при периодических газодинамических нагрузках. Это дополняет существующую методологию проектирования силовых конструкций стартовых комплексов с учётом циклического термосилового характера нагружения.

Практическая значимость подтверждается применением разработанной методики в филиале АО «ЦЭНКИ» — НИИ СК им. В.П. Бармина при создании теоретической базы для обоснования прочности разрабатываемых агрегатов пусковых установок, разработкой практических рекомендаций по формированию теоретического профиля и исполнению гребня двухскатного газоотражателя, а также учётом результатов моделирования при проектировании масштабных испытательных стендов, что подтверждается соответствующими актами внедрения. Результаты работы могут быть применены на предприятиях, проектирующих и эксплуатирующих стартовое оборудование ракет космического назначения и иные силовые конструкции, подверженные циклическому высокотемпературному газодинамическому воздействию.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений, списка обозначений, списка использованных источников (98 наименований) и приложения. Работа изложена на 137 страницах, содержит 71 рисунок и 6 таблиц.

Во введении диссертантом приведены стандартные разделы, посвящённые формулировке цели, задач и актуальности рассматриваемых задач, обоснованы научная новизна, теоретическая и практическая значимость, изложены положения, выносимые на защиту, степень достоверности и личный вклад автора, отражено соответствие паспорту специальности.

В первой главе представлено обзорно-аналитическое исследование опыта проектирования и эксплуатации агрегатов наземной космической инфраструктуры при циклическом газодинамическом воздействии. Рассмотрены характер и цикличность газодинамического нагружения, типовые дефекты материалов, выполнен сравнительный анализ теплозащитных материалов и обзор предложений по анализу прочности элементов облицовки.

Во второй главе изложена методика оценки прочности проектируемого стартового оборудования, подверженного циклическому газодинамическому воздействию. Приведены основные требования и исходные данные к модели, методика определения циклов нагружения, основные соотношения термомеханического анализа, конечноэлементная постановка совместного действия температурной и силовой нагрузки, метод выделения циклов деформирования и определения числа циклов до усталостного разрушения, а

также общий алгоритм оценки циклической прочности методом конечных элементов.

Третья глава содержит результаты численного моделирования циклической прочности элементов газоотражателя. Выполнено моделирование малоциклового усталости облицовки при циклическом газодинамическом нагружении, проведена валидация методики на примере боковой панели эксплуатируемого газоотражателя, определён ресурс «гребня» модельного газоотражателя и исследованы деформации защитной решётки.

В четвёртой главе рассмотрено проектирование вариантов схем монтажа металлооблицовки газоотражателей, компенсирующих негативное влияние малоциклового высокотемпературной усталости материала листов. С применением метода субмоделирования выполнен сравнительный анализ сварной, шарнирных и болтовой схем крепления листов по критериям амплитуды деформаций, напряжений и числа циклов до предельного состояния.

В заключении приведены основные результаты работы и обозначены перспективные направления дальнейших исследований по теме диссертации.

Достоверность результатов обеспечена корректной постановкой задачи, обоснованностью применения гипотез и адекватностью расчетных моделей. Достоверность подтверждается сравнением результатов численного моделирования с эксплуатационными данными ряда агрегатов космической инфраструктуры, разрабатываемых АО «ЦЭНКИ» — НИИ СК им. В.П. Бармина.

Замечания по работе

1. В разделе 2.5.2 указано, что «Максимальные напряжения и деформации наблюдаются в момент достижения максимальных нагрузок $t_l = t(T_{\max}, P_{\max})$ ». И далее в этот момент времени определяется узел КЭМ, в котором фиксируются экстремальные значения напряжений и деформаций.

Однако, в разделе 2.2 указано, что максимальные значения цикла давления и цикла температуры смещены относительно друг друга на временном отрезке в пределах цикла, т.е. моменты достижения $T_{\max}$ и $P_{\max}$ — это разные моменты времени. При этом в работе не указано, насколько по времени могут быть смещены экстремальные значения напряжений и деформаций в цикле и как в итоге задавались циклы нагружения по давлению и деформациям — со смещением или без.

2. В разделе 3 описано моделирование малоциклового усталости облицовки при действии циклического газодинамического нагружения. Данная конструкция состоит из панелей и моделируется твердотельными

элементами. При этом конечно-элементная модель конструкции описана недостаточно подробно – в частности, не указано, какая аппроксимирующая функция используется для конечных элементов, каково количество элементов по толщине панели и варьировался ли при оценке сеточной сходимости размер элемента по толщине панелей или только размер элемента в плоскости панелей.

3. На рис. 3.20. диаграмма изменения напряжений во времени имеет странные провалы при гладкой в этих же точках диаграмме деформаций (рис. 3.19). Неясно, с чем связано такое падение напряжений в отдельные моменты времени. В работе этот эффект никак не комментируется.

4. В работе имеются некоторые ошибки и опечатки - в частности:

а) В формуле (2.13) символом α обозначен коэффициент теплового расширения, однако после формулы указано, что это - коэффициент теплопроводности.

б) На рис. 4.26 приведена только одна диаграмма напряжений для шарнирного варианта, тогда как было рассмотрено 2 варианта - №1 и №2. Кроме того, максимальный уровень напряжений на диаграмме для шарнирной схемы (около 550 МПа) значительно превышает максимальный уровень напряжений, указанный в таблице 4.1 ниже – 192 МПа.

Необходимо отметить, что указанные замечания относятся к форме изложения, а не к существу полученных результатов, и, таким образом, не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация представляет собой серьёзное и завершённое научное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Результаты диссертации достаточно полно опубликованы: по теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК по специальности 2.5.13.

Основные результаты работы апробированы в рамках восьми докладов на всероссийских и международных научно-практических конференциях. Содержание автореферата и сформулированные в нём выводы полностью соответствуют представленным в диссертации результатам; публикации отражают основные положения диссертации.

Заключение

Ярославцева М.М. решила важную и актуальную научно-техническую задачу: разработала методику анализа усталостной прочности агрегатов наземной космической инфраструктуры при многократных механических и газодинамических воздействиях, позволяющую обоснованно оценивать допустимое число циклов газодинамического нагружения и назначать ресурс стартового оборудования на этапе проектирования.

Таким образом, данная диссертация является завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержатся методики решения задач, имеющих существенное значение для развития средств наземной космической инфраструктуры и обеспечения надёжности стартового оборудования ракет космического назначения.

Диссертационная работа Ярославцевой Марии Михайловны на тему «Разработка методики анализа усталостной прочности агрегатов наземной космической инфраструктуры при многократных механических и газодинамических воздействиях» соответствует всем требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук. Считаю, что её автор, Ярославцева Мария Михайловна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.13 «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов».

Официальный оппонент, главный научный сотрудник АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», доктор технических наук по специальности 2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов (технические науки)



Азаров Андрей Валерьевич

01.06.26

Полное наименование организации:

АО «Центральный Научно-исследовательский институт специального машиностроения» (АО «ЦНИИСМ»).

Почтовый адрес организации: Россия, 141371, Московская область, Сергиево-Посадский г.о., г. Хотьково, ул. Заводская, д.34.

Адрес официального сайта организации в сети «Интернет»:
<https://www.tsniism.ru>

Адрес электронной почты организации: tsniism@tsniism.ru

Телефон: +7(495)993-00-11, Факс: +7(496)543-82-94

Подпись Азарова Андрея Валерьевича заверяю

Начальник ГУД АО «ЦНИИСМ»



Г. В. Краснова

Сотзвонена
10.06.2026