

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
АВТОМАТИКИ ИМ. Н.Л. ДУХОВА»
(ФГУП «ВНИИА»)**

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Ярославцевой Марии Михайловны
**«Разработка методики анализа усталостной прочности агрегатов наземной
космической инфраструктуры при многократных механических и
газодинамических воздействиях»,**
представленной 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 созданию расчётной методики оценки усталостного ресурса агрегатов стартовых комплексов при многократном газодинамическом воздействии. В условиях развёртывания крупных спутниковых группировок и интенсификации графиков пусков силовое оборудование (газоотражатели, пусковые столы) испытывает систематическое накопление усталостных повреждений.

Исследование, представленное в диссертационной работе Ярославцевой М.М., связано с решением **актуальной задачи** по оценке сопротивляемости усталостному разрушению агрегатов наземной космической инфраструктуры при многократных газодинамических воздействиях на этапе проектирования.

Таким образом, **цель работы** заключается в разработке методики анализа усталостной прочности агрегатов наземной космической инфраструктуры при многократных механических и газодинамических воздействиях.

Согласно автореферату, во **введении** представлены актуальность и степень разработанности темы исследования, поставлены цель и задачи диссертационной работы, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость проводимых исследований, указаны методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены степень достоверности результатов, личный вклад соискателя, апробация результатов работы, структура и объём диссертации.

Автор корректно формулирует научную проблему, закрывая разрыв между теоретическими знаниями в области малоциклового усталости и их практическим применением для габаритных конструкций, работающих под нестационарным термосиловым нагружением.

В первой главе представлен обзор материалов, используемых в качестве ТЗП. Исследован вопрос связи монтажа покрытия и прочности на примере металлооблицовки. На основании проведенного анализа установлено, что шарнирная фиксация листов обеспечивает лучшую прочность ТЗП, в отличие от фиксирования листов посредством сварки. Рассмотрена зарубежная практика использования огнеупорных бетонов в качестве ТЗП. Затронуты вопросы о необходимости экспериментальных исследований по использованию композиционных материалов на основе базальтового волокна в качестве защитных покрытий.

Вторая глава посвящена разработке методики оценки прочности конструкций, подверженных циклическому газодинамическому воздействию. С точки зрения физики старта работа охватывает взаимосвязанные явления нестационарного теплообмена высокотемпературной струи продуктов сгорания с металлом и последующего деформирования конструкции. Рассмотрена постановка задачи анализа циклической прочности агрегатов стартового оборудования при действии газодинамического нагружения. Определены основные требования, накладываемые ограничения к модели и основной набор исходных данных для оценки ресурса работы конструкций.

Принципиальным методическим решением автора является переход к квазистатическому описанию процесса, при котором непрерывное нагружение заменяется кусочно-заданной функцией (фазы прогрева, активного участка и охлаждения). Переход обоснован критерием частотного разделения нагрузки и конструкции, что правомерно для систем, чьи собственные частоты существенно выше частоты нагружения.

Расчётная цепочка выстроена последовательно: на первом этапе решается задача нестационарной теплопроводности МКЭ с использованием трёхмерных элементов типа SOLID, а поля давлений и температур импортируются из газодинамической модели и экстраполируются на узлы сетки. На втором этапе тепловые результаты передаются как граничные условия в задачу механики деформируемого твёрдого тела, где критерием текущей прочности служит условие Мизеса. Переход к оценке ресурса реализован

методом «дождевого потока», а выделенные амплитуды деформаций подставляются в уравнение Коффина–Мэнсона–Баскина, разделяющее упругую и пластическую составляющие. Определение числа циклов до разрушения выполняется методом Ньютона, а введенный критерий выбора контрольных узлов МКЭ-сетки позволяет сосредоточить вычислительный ресурс на наиболее опасных зонах.

Разработанная методика основана на анализе истории циклического деформирования и амплитуды деформаций для последующего определения числа циклов до наступления предельного состояния материала. В методику анализа усталостной прочности агрегатов наземной космической инфраструктуры интегрирован метод конечных элементов с программной реализацией. В разработанной методике оценки циклической прочности предусмотрено выполнение анализа как для всех узлов в модели, так и для выбранного набора элементов вокруг критической точки конечно-элементной решётки. Для экономии вычислительных ресурсов предложено считать анализ циклической прочности квазистатическим. Пренебрегая динамическими эффектами внутри одного цикла, полностью в методике учитываются экстремальные значения деформаций от цикла к циклу без роста вычислительных затрат.

Основным результатом квазистатического анализа является распределение напряжений и деформаций в материале составной части агрегата и изменение напряжений и деформаций при цикле нагрузки и разгрузки, соответствующее циклограмме воздействия газовой струи на поверхность агрегата.

Третья глава диссертационной работы посвящена проведению валидации методики оценки прочности конструкций, подверженных циклическому газодинамическому воздействию, и проведению численного моделирования различных проектируемых сборочных единиц стартового комплекса с использованием разработанной методики анализа усталостной прочности.

В результате проведённого численного моделирования работы листов газоотражателя, с использованием представленной во второй главе методики, подтверждена адекватность оценки усталостного циклического деформирования материала деталей при действии модельной циклической газодинамической нагрузки. Проведён анализ сходимости результатов моделирования в зависимости от размеров элементов.

Для демонстрации работы методики с конструкциями стартового оборудования на стадии проектирования представлены результаты проведённого численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции вершины «гребня» отражателя стартового стола, подверженных газодинамическому воздействию при старте. Представлены результаты анализа, которые определили особенности процесса термоциклического разрушения типового элемента газоотражателя. Приведён пример использования мультидисциплинарного подхода к определению облика конструкции защитной решётки. Получена диаграмма циклического деформирования элемента решётки при циклическом газодинамическом воздействии. С использованием результатов комплексного моделирования предложена конструкция мостовой рамы для защиты разъёмных соединений при помощи исследованных решёток. Результаты анализа предложены к использованию при проектировании решётчатых конструкций для защиты любого другого объекта наземной космической инфраструктуры, подверженного газодинамическому воздействию.

Четвёртая глава диссертации посвящена разработке алгоритма обоснования циклической прочности малых конструктивных элементов для габаритных конструкций стартового оборудования. Автором разработана многоступенчатая процедура субмоделирования, успешно разрешающая противоречие между грубой глобальной МКЭ-сеткой всей конструкции и детальной сеткой локальных концентраторов, таких как болты и швы.

Автор приводит алгоритм построения субмодели и вводит чёткие критерии завершения итераций по числу нагружений и погрешности перемещений, что подтверждает методическую проработанность подхода. Работа алгоритма продемонстрирована на примере математических моделей элементов схем закрепления листов облицовки на силовой раме или закладных элементах газоотражателя при циклическом газодинамическом воздействии.

Валидация методики проведена на примере эксплуатирувавшегося газоотражателя. Сопоставление с эксплуатационными данными показало полностью приемлемую для инженерных расчётов погрешность. Рекомендованный размер конечного элемента (20–45 мм) установлен автором экспериментально через анализ сходимости. Дополнительную достоверность подтверждают численные примеры расчёта гребня отражателя, защитной решётки и пяти схем монтажа металлооблицовки.

Научная новизна и практическая значимость диссертационной работы заключаются в разработке и практической реализации нового метода оценки усталостной прочности проектируемых термомеханически напряжённых конструктивных элементов стартового оборудования для запуска летательных аппаратов. Также в работе предложены методы и приёмы анализа напряжённо-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 разработанных ранее концепций предлагаемая автором методика позволяет обосновывать ресурс стартового оборудования, подверженного термосиловому воздействию, на этапе проектирования сборочных единиц стартового комплекса.

Автореферат диссертации даёт представление о содержании диссертационной работы. **Особую ценность** представляет сравнительный анализ различных схем монтажа листов металлооблицовки с использованием разработанной соискателем методики и метода субмоделирования. Установленное преимущество шарнирной схемы по ресурсу физически обосновано тем, что шарнирное опирание минимизирует температурные напряжения за счёт свободы деформаций. **Внедрение результатов** в АО «ЦЭНКИ» – НИИ СК им. В.П. Бармина и АО «НПО «Обуховский завод» подтверждают применимость разработки.

Основные результаты диссертационной работы прошли **апробацию** на научно-практических, всероссийских и международных научных конференциях, а также опубликованы в ведущих научных изданиях, входящих в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» ВАК РФ.

Вместе с тем, по представленному автореферату диссертационной работы можно сделать несколько **замечаний**:

- во-первых, используемое уравнение Коффина–Мэнсона–Баскина содержит четыре параметра, существенно зависящих от температуры. Для стали 10ХСНД в диапазоне температур гребня развиваются ползучесть и отпускная хрупкость, однако в автореферате не указано, при каких температурах определялись константы;

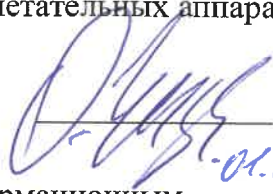
- во-вторых, в тексте автореферата встречаются редакционные ошибки.

Указанные замечания носят дискуссионный характер и не снижают научной ценности проведённых исследований, общей высокой оценки работы и могут быть учтены автором при подготовке доклада, представляемого на защите.

Диссертационная работа Ярославцевой М.М. является логически завершённым, методически последовательным исследованием. Предложенная расчётная схема корректно отражает физику термомеханического нагружения стартовых конструкций, а её программная реализация доведена до уровня реального проектирования.

Диссертационная работа соответствует заявленной специальности, диссертационное исследование является законченной научно-квалификационной работой и удовлетворяет критериям п.п. 9-14 Положения «О порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Ярославцева Мария Михайловна, заслуживает присвоения ей учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13 «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов».

Ульянин Олег Владимирович,
кандидат технических наук,
помощник заместителя директора по информационным
технологиям и системам управления ФГУП «ВНИИА»
Адрес: ул. Суцневская, д. 22, Москва, 127030
Тел.: (499) 972-84-99 доб.38-18 E-mail: ulianin@vniia.ru


01.06.2026

Я, Ульянин Олег Владимирович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Ярославцевой Марии Михайловны.

Подпись Ульянина О.В. заверяю.

Учёный секретарь НТС ФГУП «ВНИИА», к.т.н.



Л.В. Феокистова