

*На правах рукописи*

Бондаренко Андрей Юрьевич



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТНОГО АНАЛИЗА  
ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА КОНСТРУКЦИИ И СПОСОБОВ ИХ  
ОТРАБОТКИ С УЧЁТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов  
и аппаратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, начальник отдела нагрузок и нормирования прочности Акционерного общества «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»  
**Лиходед Анатолий Иванович.**

Официальные оппоненты: **Алгазин Сергей Дмитриевич**  
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории Механики и оптимизации конструкций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук;

**Геча Владимир Яковлевич**  
доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе Акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы имени А.Г. Иосифьяна».

Ведущая организация: Акционерное общество «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения».

Защита диссертации состоится «25» ноября 2020 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.125.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

[https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=114295](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=114295).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Г.В. Федотенков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В процессе эксплуатации конструкции ракетно-космической техники (РКТ) подвергаются различным внешним силовым воздействиям, а также нагружению со стороны собственных подсистем – двигательных установок (ДУ) и управляющих органов, систем разделения и наддува. Обеспечение прочности конструкций РКТ в сочетании с высокими требованиями к их массовому совершенству требует проведения детального изучения условий нагружения и реакций конструкций. При этом реакции зависят как от уровня и характера внешних воздействий, так и от собственных динамических свойств и конструктивно-компоновочных характеристик изделий.

Одной из наиболее сложных расчётных задач в отработке прочности является оценка динамических составляющих в нагрузках, возникающих при различного рода переходных процессах с быстроменяющимися внешними воздействиями, например при старте, разделении блоков, наборе и спаде тяги ДУ. Связано это с наличием разбросов и некоторой неопределённости при задании внешних динамических воздействий и параметров динамической системы (в частности – диссипативных характеристик), а также со значительной сложностью расчётов динамических нагрузок.

Как показывает опыт, применение расчётных методов при исследовании нештатных ситуаций, возникающих при наземной эксплуатации изделий, позволяет оценить степень критичности состояния объектов и зачастую сохранить их для дальнейшей эксплуатации. При нештатных ситуациях, происходящих на этапе выведения и лётной эксплуатации, анализ реакции конструкции по телеметрической информации (ТМИ) в сочетании с проведением математического моделирования зачастую позволяет определить причину аварийной ситуации или выявить неизвестные ранее особенности функционирования изделий.

В настоящей работе представлены результаты исследований, направленных на совершенствование технологии разработки конечно-элементных моделей для анализа быстроменяющихся динамических процессов, методов расчёта динамических нагрузок и способов воспроизведения этих нагрузок при наземной экспериментальной отработке. На основе этих результатов разработан и апробирован расчётно-экспериментальный подход к подтверждению вибропрочности конструкций, у которых при лётных испытаниях обнаруживаются дополнительные динамические воздействия, не учтённые при наземной экспериментальной отработке. Проведённые исследования обусловлены острой практической необходимостью.

Представленный подход применим также при необходимости сокращения объёмов и сроков отработки изделий РКТ, конструктивно схожих с успешно прошедшими полный цикл наземной экспериментальной отработки (НЭО).

### **Целями диссертационной работы являются:**

- совершенствование методов определения внешних воздействий, разработки и валидации конечноэлементных (КЭ) моделей для анализа реакции конструкции при переходных динамических процессах;

- разработка альтернативных способов НЭО изделий РКТ на переходные процессы с использованием имеющейся экспериментальной базы;
- разработка и апробация расчётно-экспериментального подхода к подтверждению вибропрочности конструкций.

**Для реализации поставленных целей решены следующие задачи:**

1. Разработана методика реконструкции циклограмм набора и спада тяги ДУ по данным о динамической реакции конструкции с выделением скачкообразно меняющейся составляющей на основе математического моделирования и данных ТМИ. Исследованы границы применимости методики с учётом неточностей в жесткостных свойствах КЭ-моделей, погрешностей в исходных данных и особенностей обработки и анализа ТМИ.

2. Исследованы особенности построения эквивалентных балочных моделей с использованием механических аналогов, моделирующих гидроупругие колебания баков с топливом и присоединёнными к их днищам двигательными установками, с целью минимизации ошибок при реконструкции внешнего силового воздействия по таким моделям.

3. Исследованы особенности формирования детализированных КЭ-моделей для расчёта динамических нагрузок на конструкцию и оборудование.

4. Разработан принцип построения спектров гармонической вибрации, эквивалентных воздействиям при переходных процессах произвольного вида.

5. Разработана подробная КЭ-модель типовой ступени ракеты-носителя (РН) в обеспечение проведения расчётов кинематических параметров и полей напряжений при стационарных и нестационарных динамических воздействиях.

6. Проведено исследование возможных подходов к наземной виброотработке ступеней РН на воздействия, возникающие при переходных процессах, и имеющегося задела по экспериментальной базе.

7. Исследованы особенности валидации КЭ-модели приборного отсека (ПрО) типовой ступени РН по результатам локальных частотных испытаний оборудования. На основе обобщения имеющейся ТМИ по более чем 25 запускам РН с различными полезными грузами показаны особенности валидации КЭ-моделей ступени РН с различными космическими головными частями (КГЧ), а также циклограмм спада тяги высотного двигателя. Проведён сравнительный анализ перегрузок и напряжённо-деформированного состояния (НДС) на силовой части конструкции ступени и оборудовании при выключении ДУ и виброиспытаниях. Расчётно-экспериментальным путём обоснована вибропрочность ПрО.

**Методы исследования.** Экспериментальные исследования динамических характеристик узлов крепления навесного приборно-агрегатного оборудования выполнялись путём анализа откликов на локальные ударные воздействия.

Формирование и доработка расчётных моделей производились на основе принципов метода конечных элементов с учётом специфики решения динамических задач.

Для решения задач о динамическом нагружении конструкций применялись численные приёмы, основанные на методе прямого интегрирования уравнений движения и методе разложения решения по собственным тонам колебаний. Во втором случае использовался метод

улучшения сходимости, основанный на расширении базиса собственных форм «residual»-векторами.

С целью сокращения размерности задач, времени проведения расчётов и повышения устойчивости счета, особенно при расчётах в нелинейной постановке, использовались механические аналоги и редуцирование КЭ-моделей по методу Крейга-Бэмптона.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Разработана методика реконструкции циклограмм набора и спада тяги ДУ по динамической реакции конструкций с выделением скачкообразно меняющейся составляющей на основе математического моделирования.

2. Создана расчётная методика построения КЭ-моделей конструкций с использованием механических аналогов, обеспечивающая эквивалентность по массово-инерционным и динамическим характеристикам, а также по внешним воздействиям, в обеспечение корректного расчёта нагружения изделий РКТ при наборе и спаде тяги ДУ, в том числе перспективных многообразных ступеней при ракетно-динамической схеме спасения.

3. Предложен новый подход к обработке крупногабаритных изделий РКТ на воздействия, возникающие при переходных процессах, и обосновано преимущество этого подхода по сравнению с испытаниями на эквивалентную гармоническую вибрацию.

4. Разработан подход к разрешению противоречия между необходимостью обработки изделий РКТ на вновь фиксируемые современными средствами ТМИ интенсивные динамические воздействия путём эквивалентного гармонического нагружения и риском необоснованного разрушения конструкции при таких испытаниях, вызванным завышенными режимами многократного динамического нагружения, и последующей необходимостью перепроектирования и повторной отработки изделия.

**Достоверность и обоснованность научных результатов** обусловлены:

- строгостью математических выкладок, основанных на фундаментальных положениях механики деформируемого твёрдого тела и теории решения дифференциальных уравнений;

- использованием лицензионной версии одного из наиболее широко используемых программных продуктов для конечноэлементного анализа;

- хорошим согласованием парциальных тонов колебаний приборного оборудования в доработанной КЭ-модели типового приборного отсека с данными, полученными при исследовательских испытаниях;

- хорошим согласованием расчётных уровней перегрузок на типовой ступени и различных КГЧ с данными ТМИ в рассматриваемых расчётных случаях.

**Практическая значимость диссертационной работы** заключается в следующем:

1. Выявлены особенности регистрации ТМИ при пусках типовых РН с различными КГЧ в обеспечение корректного определения условий их нагружения. Проведена доработка КЭ-модели приборного отсека типовой ступени РН, в котором расположена большая часть приборного оборудования, разработаны и валидированы по данным ТМИ КЭ-модели ступени с

различными КГЧ. По результатам решения обратной задачи с использованием телеметрической информации, замеренной на ступени РН и разгонном блоке, проведена валидация циклограмм спада тяги высотного ДУ.

2. Предложен альтернативный виброиспытаниям подход к отработке изделий РКТ на воздействия, возникающие при переходных процессах, позволяющий корректно воспроизвести нагружение объекта испытаний как по максимальным уровням перегрузок, так и по числу циклов нагружения;

3. На примере приборного отсека типовой ступени РН показана возможность исключения дополнительных испытаний на динамические нагрузки, выявленные современными средствами регистрации ТМИ.

**Положения, выносимые на защиту:**

- методика реконструкции циклограмм набора и спада тяги ДУ по динамической реакции конструкции с выделением скачкообразно меняющейся составляющей на основе математического моделирования и данных ТМИ;

- метод учёта активных сил, действующих на подсистемы, моделируемые механическими аналогами;

- принцип построения спектра ударного нагружения, эквивалентного воздействию на конструкцию при произвольном переходном процессе;

- расчётно-экспериментальный метод подтверждения вибропрочности конструкций и его реализация на примере приборного отсека типовой ступени РН среднего класса.

**Апробация работы.** Результаты диссертации докладывались и обсуждались на отраслевых, всероссийских и международных конференциях, в том числе:

- на международной конференции «Пилотируемое освоение космоса» (Королев, ПАО «РКК «Энергия», май 2016 г.);

- на всероссийской научно-технической конференции «Механика и математическое моделирование в технике», посвящённой 100-летию со дня рождения В.И. Феодосьева (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, май 2016 г.);

- на 7-ой международной научно-технической конференции «К.Э. Циолковский – 160 лет со дня рождения. Космонавтика, радиоэлектроника, геоинформатика» (Рязань, РГРТУ, октябрь 2017 г.);

- на 60-ой Всероссийской научной конференции МФТИ (Москва-Долгопрудный-Жуковский, МФТИ, ноябрь 2017 г.);

- на научно-технической конференции «Прочность конструкций летательных аппаратов» (Жуковский, ЦАГИ, май – июнь 2018 г.);

- на XXII Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, ноябрь 2018 г.);

- на 61-ой Всероссийской научной конференции МФТИ (Москва-Долгопрудный-Жуковский, МФТИ, ноябрь 2018 г.);

- на семинаре ИПМ им М.В. Келдыша РАН «Вычислительные методы и математическое моделирование» им. Ю.П. Попова (Москва, декабрь 2019 г.).

- на семинаре МГУ им. М.В. Ломоносова «Актуальные проблемы геометрии и механики» имени проф. В.В. Трофимова (Москва, март 2020 г.).

**Внедрение результатов диссертационной работы.** По результатам работы разработана «Методика построения спектра гармонической вибрации, эквивалентного воздействию на конструкцию при произвольном переходном процессе» и выпущен акт о её внедрении. Разработана «Методика реконструкции циклограмм набора и спада тяги ДУ по данным о реакции конструкции с использованием математического моделирования и данных ТМИ» и выпущен акт о её внедрении. Результаты работы могут использоваться для разработки КЭ-моделей конструкций, определения условий их нагружения и расчётно-экспериментального подтверждения их стойкости к внешним воздействиям в АО «РКЦ «Прогресс», ФГУП «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева», ПАО «РКК «Энергия», АО «Корпорация «ВНИИЭМ» и других предприятиях ракетно-космической промышленности.

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации отражены в 16 научных работах, 9 из которых [3 – 6, 9, 10, 14 – 16] опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Личный вклад автора.** Результаты, представленные в диссертации, получены автором лично. Вклад автора состоит в постановке задач исследования, разработке методик и расчётных динамических моделей, в обработке, анализе, обобщении полученных результатов расчётно-экспериментальных исследований и формулировке выводов.

**Объём и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и списка литературы из 93 наименований. Работа содержит 158 страниц машинописного текста, 1 блок-схему, 108 иллюстраций и 8 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, перечислены методы проведения исследований и положения, выносимые на защиту, а также представлены сведения об апробации и внедрении результатов диссертации. Выполнен обзор работ по направлениям исследований, включающим постановку и решение проблем динамики и прочности конструкций и требований к их наземной отработке (А.С. Вольмир, С. Войновский-Кригер, А.Л. Гольденвейзер, Л.С. Лейбензон, В.И. Феодосьев, С. П. Тимошенко, Л.И. Балабух, В.В. Болотин, В.Ф. Гладкий, А.В. Кармишин, К.С. Колесников, Б.И. Рабинович и др.), вопросы теории колебаний и анализа динамических процессов (И.М. Бабаков, Дж. Бендат, А. Пирсол, С. Кренделл, Е.С. Сорокин, А.П. Филиппов, А.А. Харкевич, Д.Х. Янг, Р.Н. Lyon и др.), применение метода конечных элементов к задачам динамики и прочности конструкций (Н. Бате, Е. Вилсон, Р. Галлагер, О. Зенкевич, В.А. Постнов, К.Н. Рудаков, Л. Сегерлинд, Д.Г. Шимкович и др.), классификацию и основы решения обратных задач (А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич, С.И. Кабанихин, А.О. Ватульян и др.).

Отмечен значительный вклад отечественных специалистов, в частности – А.В. Анисимова, Ю.Г. Балакирева, И.М. Безмозгового, С.С. Бобылёва, В.Е.

Бордадымова, А.В. Боброва, Н.Ю. Введенского, М.С. Галкина, В.Я. Геча, А.Г. Горшкова, Ю.Е. Ильенко, И.Г. Кильдибекова, А.А. Козлова, В.А. Кондакова, О.В. Кузнецова, А.И. Лиходеда, А.А. Малинина, П.Я. Носатенко, С.А. Петроковского, М.А. Плещинского, Д.А. Пономарёва, В.В. Сидорова, В.А. Титова, Ф.Н. Шклярчука в изучение методов определения нагрузок и нормирования прочности, формирования вибродинамических и акустических режимов обработки изделий. Большой объем работ в этом направлении ведется специалистами АО «РКЦ «Прогресс», ФГУП «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева», ПАО «РКК «Энергия», АО «Корпорация «ВНИИЭМ», АО «ИСС им. М.Ф. Решетнёва», АО «ГРЦ Макеева» и др.

**В первой главе** проведён краткий обзор штатных и нештатных ситуаций, возникающих в процессе эксплуатации изделий РКТ, который показал, что в вибропрочностном диапазоне наибольшее нагружение элементов РН происходит при нестационарных динамических воздействиях – при штатной эксплуатации во время старта и разделения блоков РН, набора и спада тяги ДУ, а также в результате различных нештатных ситуаций. В ряде случаев, например – для высотных ДУ II и III ступеней, а также при различных нештатных ситуациях – определение внешних воздействий на конструкцию наиболее корректно проводить по результатам натурных измерений.

В первом разделе приведено описание реальной ситуации, когда после установки на РН современной системы регистрации ТМИ и датчиков с более широким диапазоном рабочих частот были выявлены существенные динамические воздействия, возникающие при спаде тяги ДУ высотной ступени (рисунок 1). В результате были сформулированы три принципиально важные проблемы, требующие решения:

- получение ТМИ в широком диапазоне частот по большому числу пусков РН и анализ ее достоверности;
- восстановление фактической циклограммы спада тяги ДУ по данным о динамической реакции конструкции;
- уточнение динамических нагрузок на РН и полезные грузы, анализ достаточности их наземной обработки и, при необходимости, проведение работ по дополнительному обоснованию прочности изделий.

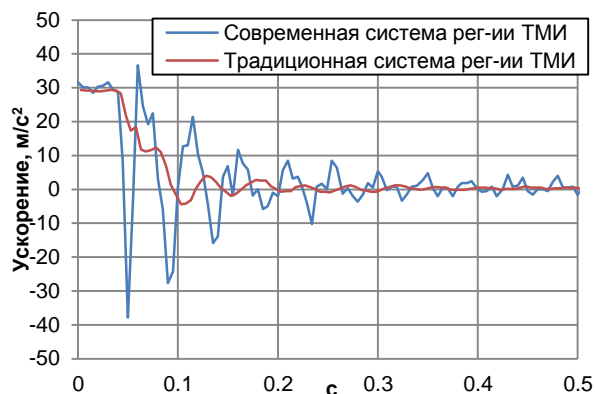


Рисунок 1 – Показания датчиков осевой перегрузки с различным рабочим диапазоном частот

Во втором разделе представлена методика реконструкции циклограмм набора и спада тяги ДУ по данным о динамической реакции конструкции с использованием математического моделирования и данных ТМИ при определении закона спада тяги ДУ.

На первом этапе отыскивается кусочно-линейная функция  $F_{\text{баз}}^*(t)$ , наилучшим образом аппроксимирующая изменение силы тяги. Для этого решаются уравнения движения конструкции в КЭ-виде:

$$M\ddot{X} + H\dot{X} + KX = F_i^*(t), \quad KX_0 = F_0, \quad \dot{X}_0 = 0, \quad (1)$$



где  $M, H, K$  – матрицы масс, диссипативных характеристик и жесткостей системы соответственно, а  $F_i^*(t)$  – кусочно-линейная функция с варьируемым временем спада тяги  $t_i, i=1 \dots N_I, (N_I - \text{число вариаций})$ .

Для каждого варианта решения задачи (1) строятся расчётные значения ускорений  $a_{mi}^*(t)$  в обобщённых координатах, соответствующих местам установки вибродатчиков,  $\xi_m, m=1 \dots N_a$ , где  $N_a$  – количество датчиков, в которых измеряется реакция конструкции  $a_m(t)$  в направлении соответствующих обобщённых координат. В качестве базового значения  $F_{\text{баз}}^*(t)$  принимается вариант с номером  $i_{\text{баз}}$ , при котором функция

$$J_i = \sum_{m=1}^{N_a} \sum_{v=-v_0}^{v_0} (A_{miv}^* - A_{mv}) (\overline{A_{miv}^*} - \overline{A_{mv}}), \quad i=1 \dots N_I,$$

принимает минимальное значение, где  $A_{miv}^*$  и  $A_{mv}$  – комплексные коэффициенты Фурье функций  $a_{mi}^*(t)$  и  $a_m(t)$  (см. рисунок 2).

В результате определяются разности между замеренными и рассчитанными базовыми ускорениями (трансформированные ускорения):

$$\tilde{a}_m(t) = a_m(t) - a_{mi_{\text{баз}}}^*(t) = \sum_{v=-v_0}^{v_0} (A_{mv} - A_{mi_{\text{баз}}v}^*) e^{i\omega_v t} = \sum_{v=-v_0}^{v_0} \tilde{A}_{mv} e^{i\omega_v t}. \quad (2)$$

На втором этапе путём решения обратной задачи для разности ускорений  $\tilde{a}_m(t)$  отыскивается остаточная корректирующая часть  $\tilde{F}(t)$  согласно методике, предложенной А.В. Анисимовым, А.И. Лиходедом, В.А. Титовым для определения циклограмм силовых воздействий на конструкцию МКС при различных операциях.

Для этого корректирующая часть циклограммы  $\tilde{F}(t)$  представляется комплексным рядом Фурье с неизвестными коэффициентами  $\tilde{F}_v$

$$\tilde{F}(t) = \sum_{v=-v_0}^{v_0} \tilde{F}_v e^{i\omega_v t}, \quad \omega_v = \frac{2\pi v}{T_0}, \quad (3)$$

с помощью которых трансформированные ускорения представляются в виде

$$\tilde{a}_m(t) = \sum_{v=-v_0}^{v_0} \tilde{F}_v \Pi_{1m}(\omega) e^{i\omega_v t}, \quad (4)$$

где  $\Pi_{1m}(\omega)$  – рассчитанные комплексные передаточные функции от единичной силы, приложенной в точке действия неизвестной силы, к ускорениям в направлении обобщённых координат  $\xi_m$ .

Для обеспечения равенства ускорений  $\tilde{a}_m(t)$ , представленных рядами (2) и (4), необходимо обеспечить равенство их коэффициентов Фурье, что в силу

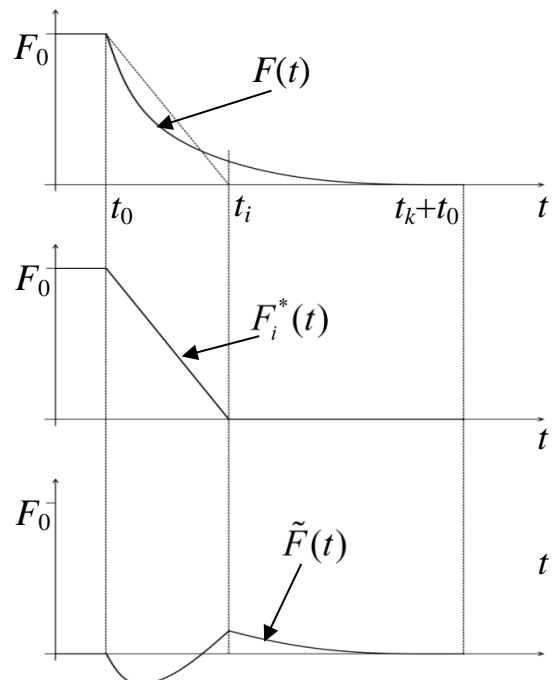


Рисунок 2 – Определение закона спада тяги ДУ

переопределённости системы достигается минимизацией квадратичной невязки между ними. Отсюда следует выражение для неизвестных коэффициентов Фурье  $\tilde{F}_k$ :

$$\tilde{F}_k = \sum_{m=1}^{N_a} \tilde{A}_{mk} \cdot \overline{\Pi_{1m}(\omega_k)} / \sum_{m=1}^{N_a} \Pi_{1m}(\omega_k) \cdot \overline{\Pi_{1m}(\omega_k)}, \quad k = -\nu_0, \dots, 0, 1, \dots, \nu_0. \quad (5)$$

После подстановки (5) в (3) строится корректирующая часть циклограммы  $\tilde{F}(t)$ , которая после сложения с базовой  $F_{\text{баз}}^*(t)$  даёт искомую циклограмму спада тяги:

$$F(t) = F_{\text{баз}}^*(t) + \tilde{F}(t).$$

Для проверки разработанной методики была решена следующая задача:

1. С использованием КЭ-модели высотной ступени РН с типовой КГЧ проведен расчёт ускорений  $a_m(t)$  в некоторых точках конструкции с обобщёнными координатами  $\zeta_m$ , которые считаются «замеренными».

2. Решалась задача реконструкции циклограммы спада тяги по условно «замеренным» ускорениям, полученная циклограмма сравнивалась с исходной.

В результате было показано, что при отсутствии погрешностей в исходных данных и КЭ-моделях разработанный подход позволяет с очень высокой точностью воспроизвести внешнее силовое воздействие на упругую конструкцию даже при небольшом количестве записей (рисунок 3).

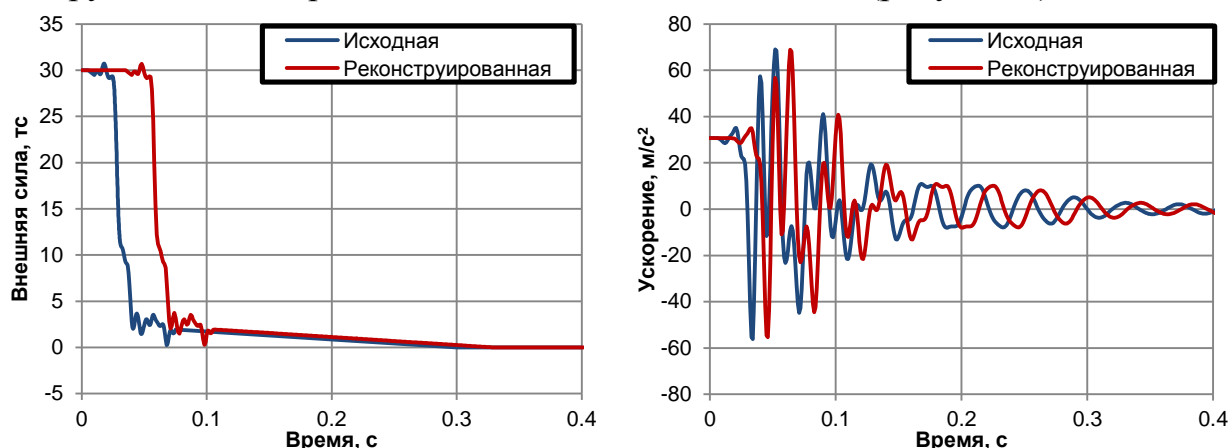


Рисунок 3 – Сравнение исходной и восстановленной циклограммы спада тяги (слева) и ускорений по этим циклограммам в одном из датчиков (справа).

Сдвиг по времени введен искусственно для удобства сравнения

Проведённые исследования влияния погрешностей в жесткостных характеристиках КЭ-моделей, а также случайных погрешностей и трендов в записях перегрузок показали, что удовлетворительного качества решения можно достигнуть при погрешностях в исходных данных 15 – 20 %, причём чувствительность разработанного метода к наличию погрешностей существенно зависит от количества записей, используемых для восстановления.

К сожалению, объёмы регистрируемой в процессе лётных измерений телеметрической информации ограничены возможностями приёмных и передающих устройств, а также возможностями бортовой аппаратуры. Из-за этого возникают различные нежелательные эффекты, связанные с диапазоном рабочих частот датчиков и опросностью системы измерений. Подход к

обнаружению одного из таких эффектов, связанных с перепутыванием высокочастотных и низкочастотных составляющих процесса при дискретизации (эффект маскировки частот), на примере лётных записей показан в третьем разделе. Этот подход основан на:

- проведении замеров в различных местах на конструкции и сравнительном анализе перегрузок с различных систем регистрации ТМИ;
- анализе ТМИ при пусках аналогичных или схожих по массовым характеристикам КА. Как правило, при отсутствии эффекта маскировки частот записи перегрузок удовлетворительно согласуются от пуска к пуску.

**Во второй главе** рассматриваются особенности расчётного анализа динамического поведения конструкций с использованием метода конечных элементов в форме перемещений.

В разделе 1 представлен анализ методов улучшения сходимости при разложении решений по собственным тонам колебаний, используемых в отечественной и зарубежной практике. На модельном примере показано, что динамичность нагружения конструкции определяется изменением второй производной по времени от внешнего воздействия. Отмечено, что из-за погрешностей в исходных данных по ускорениям при решении задачи о кинематическом возбуждении конструкции, закреплённой статически неопределимым образом, возможно получение нефизичных силовых факторов и напряжений. Для такого случая предложен способ обработки исходных данных по ускорениям, который позволяет оценить реальные величины силовых факторов и напряжений, а также выделить вынужденную часть решения, которая в основном определяет расходуемую при транспортировке часть прочностного ресурса.

В разделе 2 на основании опыта проведения предиспытательного моделирования и валидации КЭ-моделей сформулированы принципы формирования и требования к детализированным КЭ-моделям для расчёта динамических нагрузок на конструкцию и оборудование. Отдельно проанализированы особенности, возникающие в конечных элементах, узлы которых имеют координату  $r \rightarrow 0$  в полярной (цилиндрической, сферической) системе координат, что приводит к некорректному вычислению перемещений и форм колебаний в этих узлах и, следовательно, силовых факторов и напряжений. Приведены несколько приёмов, позволяющих избежать описанного эффекта.

Механические аналоги широко применяются для конденсации сложных пространственных подконструкций с целью включения их в упрощённые балочные модели конструкций. В частности, гидроупругие колебания топливных баков существенно влияют на продольные нагрузки РН, поэтому они обязательно должны учитываться в расчётах динамических нагрузок. Для моделирования динамических процессов при штатной работе ДУ, а также в нештатных ситуациях с помощью механических аналогов топливных баков необходимо обеспечить корректность задания внешних активных сил на набор аналогов (осцилляторов), моделирующих динамику подконструкции. В частности, подобная ситуация возникает при построении продольных механических аналогов топливных баков, к нижнему днищу которых через

ферменную конструкцию и шпангоут присоединена двигательная установка (активной силой является тяга). Формульные выражения для коэффициентов на внешние воздействия были получены в разделе 3.

Уравнение движения осесимметричной конструкции, кинематически возбуждаемой в направлении оси симметрии через жёсткий шпангоут по закону  $\tilde{x}_1 = u_0(t)$ , после замены переменных  $X = \tilde{X} - eu_0(t)$  представимо в виде

$$M\ddot{X} + KX = -Me\ddot{u}_0 + f(t), \quad (6)$$

здесь  $M$  и  $K$  – матрицы масс и жесткостей,  $f(t)$  – вектор внешних сил,  $\tilde{X} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n)^T$  – вектор обобщённых координат, в векторе  $e$  единицы соответствуют обобщённым координатам, описывающим осевое перемещение подконструкции, нули – остальным обобщённым координатам вектора  $\tilde{X}$ .

С использованием разложения вектора  $X$  по собственным тонам колебаний консольно закреплённой конструкции  $\varphi_j$  и обобщённой процедуры Галёркина уравнения для обобщённых координат  $T_j$  запишутся так:

$$\varphi_j^T M \varphi_j \ddot{T}_j + \varphi_j^T M \varphi_j \omega_j^2 T_j = -\varphi_j^T M e \ddot{u}_0 + \varphi_j^T f(t). \quad (7)$$

Уравнение (7) эквивалентно уравнению осциллятора массой  $m_j$  с пружиной жёсткостью  $k_j$  под действием внешней силы  $F_j(t)$ , возбуждаемого за точку подвеса по закону  $u_0(t)$  в направлении оси  $z$ :

$$m_j \ddot{z} + k_j z = -m_j \ddot{u}_0 + F_j(t), \quad (8)$$

Из сравнения коэффициентов уравнений (7) и (8) следует ключевое равенство для однозначной нормировки форм колебаний:

$$m_j = \varphi_j^T M \varphi_j = \varphi_j^T M e. \quad (9)$$

Равенство (10) позволяет однозначно определить приведённые массы, жёсткости и силы, действующие на осциллятор:

$$m_j = (\tilde{\varphi}_j^T M e)^2, \quad k_j = m_j \omega_j^2, \quad F_j(t) = (\tilde{\varphi}_j^T M e) \tilde{\varphi}_j^T f(t). \quad (10)$$

Это равенство записано для случая нормировки форм колебаний по единичной массе. Сумма масс осцилляторов стремится к физической массе объекта, равно как и сумма обобщённых сил, действующих на осцилляторы, равна физической силе, действующей на конденсируемый объект. В случае с топливным баком при действии осевой силы тяги  $f^{\text{ENG}}(t)$ , двигатель которого крепится через ферменную конструкцию и шпангоут к днищу бака (рисунок 4) обобщённые силы, действующие на осцилляторы, равны:

$$F_j(t) = f^{\text{ENG}}(t) \cdot \lambda_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad \lambda_j = (\tilde{\varphi}_j^T M e) \cdot \tilde{\varphi}_j^{\text{ENG}}, \quad (11)$$

где  $n$  – число учитываемых собственных форм колебаний.

При этом сумма безразмерных коэффициентов  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  приближается к единице, а недостающая часть силы прикладывается к шпангоуту бака.

С целью анализа сходимости параметров аналогов от степени конечноэлементной дискретизации модели, а также жесткостей крепления ДУ была разработана КЭ-модель типового бака РН, к нижнему днищу которого на ферме прикреплен двигатель (рисунок 5).

Для расчёта гидроупругих колебаний топливных баков и определения

параметров механических аналогов использовался метод виртуальных масс, использующий потенциал простого слоя. В связи с тем, что сформированная в этом случае матрица масс является полностью заполненной, её размерность существенно влияет на скорость проведения расчётов. Были изучены точность определения частот гидроупругих колебаний и рост времени счёта в зависимости от степени дискретизации используемых моделей. В результате рекомендовано чтобы общее число смоченных элементов конструкции не превышало  $\sim 3000$ . Это, с одной стороны, обеспечит достаточную точность решения, а с другой – позволит проводить расчёты без существенных затрат времени и ресурсов вычислительных машин.

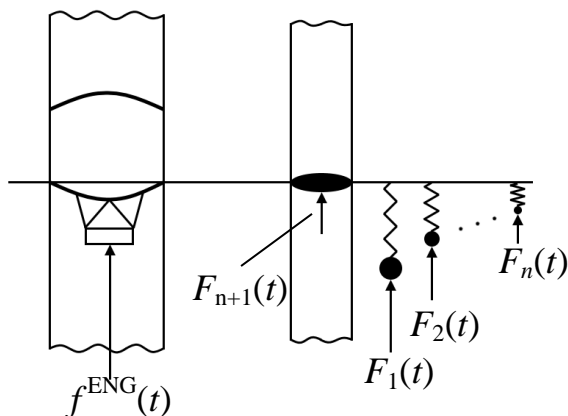


Рисунок 4 – Топливный бак с ДУ и его механические аналоги

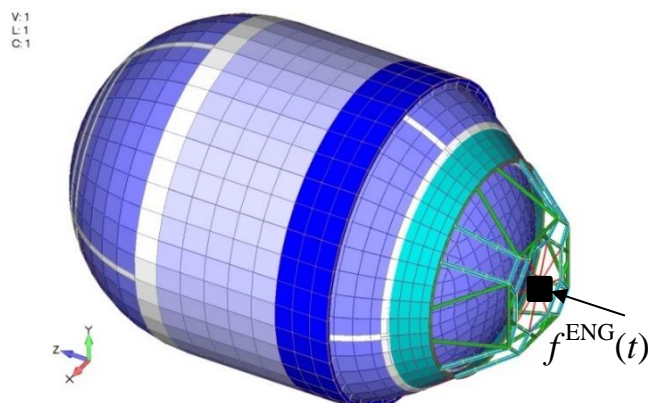


Рисунок 5 – КЭ-модель топливного бака с присоединённым ДУ

Всего было проанализированы три модели, различающиеся жёсткостью фермы ДУ, граничные условия соответствовали заделке нижнего шпангоута бака. Для каждой модели была разработана эквивалентная модель на основе механических аналогов согласно (9, 10) и проведено сравнение усилий в заделке при спаде тяги ДУ с некоторого уровня до нуля (рисунок 6). Такая постановка задачи соответствует огневым стендовым испытаниям (ОСИ) двигателя. В результате показано хорошее совпадение усилия в заделке, рассчитанного по обеим моделям, при выполнении условий сходимости масс осцилляторов и внешних сил, приложенных к ним, к реальным физическим величинам. Стоит отметить, что коэффициенты обобщённых сил  $\lambda_j$  могут быть отрицательны и не пропорциональны эффективным массам осцилляторов.

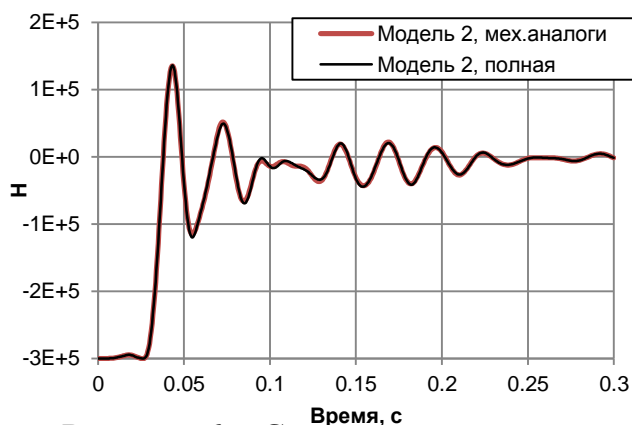


Рисунок 6 – Сравнение усилий в заделке по полной модели и модели с механическими аналогами

Разработанная методика учёта активных сил может применяться для корректного задания внешних воздействий на конструкцию, моделируемую с использованием механических аналогов. Это может быть особенно важно при расчётном анализе нагрузок в процессе ОСИ двигателей, в том числе, для

оценки градиентов набора и спада тяги ДУ по динамической реакции конструкции огневого стенда и испытываемого объекта, а также при анализе нагрузок на перспективные многоразовые ступени РН.

**В третьей главе** рассматриваются особенности проведения наземной отработки изделий РКТ на нестационарные динамические воздействия. Наиболее распространённым способом отработки изделий РКТ на подобные процессы является замена нестационарного процесса на эквивалентное гармоническое нагружение с помощью вибростендов. Однако, на практике используются различные подходы к построению ударного спектра от переходных процессов при наличии в них квазистатической перегрузки.

На основе проведённых исследований был предложен универсальный подход к определению эквивалентной гармонической вибрации, включающий:

1. Проведение низкочастотной фильтрации процесса без фазового сдвига и вычитание низкочастотной составляющей из исходного процесса.

2. Расчёт ударного спектра полученной центрированной временной зависимости для заданного уровня добротности и определение эквивалентной вибрации для каждой частоты из интересующего диапазона.

Такой подход обладает достаточной общностью и позволяет адекватно оценить уровень вибраций, эквивалентных переходным процессам.

Для проведения расчётных оценок была разработана подробная КЭ-модели высотной ступени РН среднего класса (рисунок 7), состоящая из приборного отсека, топливных баков, ДУ и сухих переходных отсеков. С использованием этой модели были проведены расчёты уровней эквивалентных гармонических перегрузок на силовой части конструкции и приборном оборудовании при нестационарном воздействии в процессе лётной эксплуатации, а также при эквивалентном гармоническом воздействии, имитирующем наземную отработку.

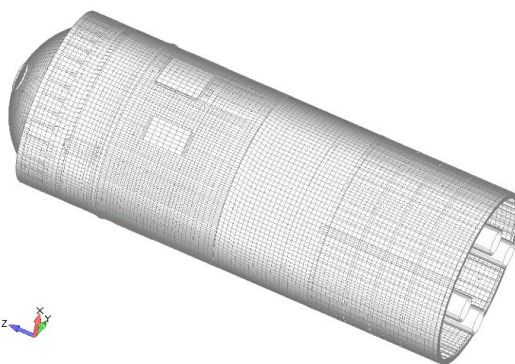


Рисунок 7 – подробная КЭ-модель типовой ступени РН среднего класса

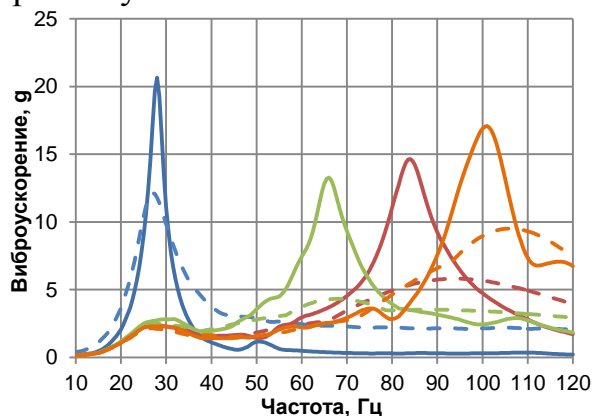
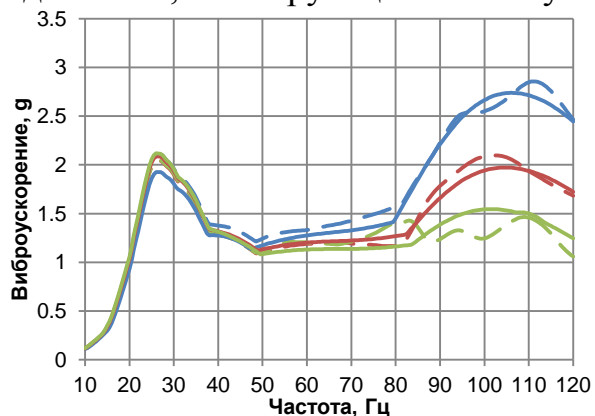


Рисунок 8 – Сравнение уровней виброперегрузок на силовой части ступени (слева, три шпангоута) и оборудовании (справа, ц.м. четырёх приборов) при переходном процессе (пунктирная линия) и эквивалентном ему гармоническом воздействии (сплошная линия)

Показано, что при наземной отработке на переходные процессы гармоническая вибрация является консервативным подходом как по уровням перегрузок, реализующимся на навесном оборудовании (а именно оно является основным объектом исследований при виброиспытаниях), так и по числу циклов нагружения (рисунок 8).

Исследована возможность проведения испытаний крупногабаритных объектов на воздействия, возникающие при переходных процессах, путем их воспроизведения с использованием имеющейся экспериментальной базы. Такой стенд, состоящий из подвижной и неподвижной частей, связанных между собой пружинами (рисунок 9), существует в АО «ЦНИИмаш». Он позволяет проводить испытания двумя способами:

1. Сбросом с некоторой высоты на неподвижное основание;
2. Предварительным статическим деформированием и резким сбросом сжимающего усилия, причём статические силы могут быть приложены как к оснастке, так и непосредственно к объекту испытаний (ОИ).

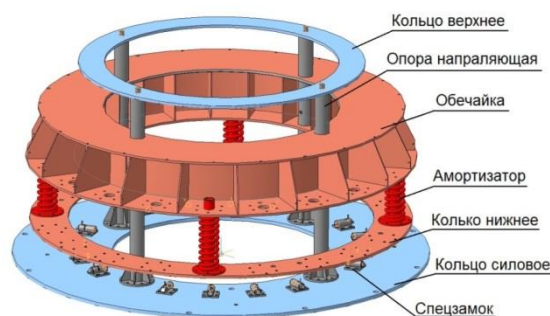


Рисунок 9 – стенд для испытаний на переходные процессы

Проведение таких испытаний требует предварительного моделирования с целью анализа нагрузок на ОИ, для чего была разработана КЭ-модель стенда и проведена её валидация по результатам исследовательских испытаний. Результаты расчётов показали, что второй способ проведения испытаний позволяет возбудить колебания ОИ в более широком вибродинамическом диапазоне частот (рисунок 10). Таким образом удаётся добиться весьма близкого совпадения с натурными результатами как по уровням эквивалентной синусоидальной вибрации, так и по максимальным значениям перегрузок и длительности воздействия.

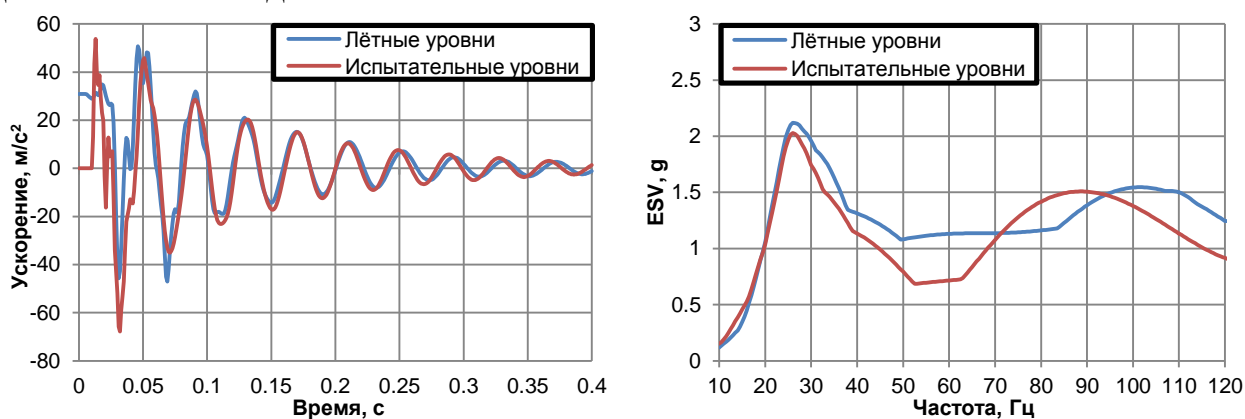


Рисунок 10 – Сравнение переходных процессов и уровней эквивалентной гармонической вибрации при испытаниях сбросом статических сил с лётными

Результаты анализа лётных данных и расчётных работ, представленные в четвёртой главе показали, что требуется дополнительное обоснование вибропрочности приборного отсека ступени, для которой были выявлены не учтённые при НЭО внешние воздействия (рисунок 1). На основе

усовершенствованных методик расчётного моделирования поведения конструкций РКТ при нестационарных внешних воздействиях и их НЭО на такие воздействия (главы 1 – 3) был сформирован подход к расчётно-экспериментальному подтверждению вибропрочности таких конструкций.

В первом разделе сформулированы основные положения, на которых базируется этот подход:

- всесторонний анализ исходных данных (документации на объект, телеметрической информации, результатов виброобработки объекта и изделий-аналогов, режимов механических воздействий на аппаратуру, статических испытаний установок приборов, данных о проектных перегрузках и т.д.);

- валидация моделей по результатам наземных и лётных испытаний до получения хорошего согласования по всем рассмотренным расчётным случаям (уточнение динамических характеристик узлов крепления оборудования, доработка и валидация КЭ-моделей, доведение их до практики, принятой в прочностных расчётах, анализе возможных ошибок в ТМИ и неучтённых особенностей функционирования изделий);

- сопоставление рассчитанных по валидированным КЭ-моделям уровней перегрузок конструкции и оборудования, а также НДС по конструкции и установкам приборов, на интересующем этапе эксплуатации с отработочными;

Рассмотрены особенности применения этого подхода на примере задачи о подтверждении вибропрочности приборного отсека типовой РН.

Во втором разделе приведены результаты доработки и валидации КЭ-модели ПрО по результатам локальных частотных испытаний и сведений о статических испытаниях установок оборудования. После доработки эта модель была включена в общую модель ступени РН (рисунок 7).

В третьем разделе проведен сопоставительный анализ ТМИ на ступени и полезных грузах (ПГ) по более чем 25 запускам РН и изделий аналогов с различными КГЧ. Выявлены типы КГЧ, при выведении которых наибольшим образом нагружается ступень РН и нелинейные эффекты, возникающие при пусках РН с ПГ типа транспортных кораблей. Показано хорошее согласование ТМИ на ступени при пусках ПГ типа транспортных кораблей, что свидетельствует о её хорошем качестве.

В четвёртом разделе проведена валидация циклограмм выключения высотного ДУ в двух вариантах. Для реконструкции использовалась связка КЭ-модели ступени с типовым разгонным блоком (РБ) и типовыми космическими аппаратами. Удалось достичь хорошего согласования реконструированных циклограмм с данными разработчика ДУ, а также согласования расчётных уровней перегрузок на ступени и РБ с лётными данными (рисунок 11).

По результатам этого раздела была подтверждена расчётная методика, предложенная в разделе 2 главы 1. Показано, что увеличение числа датчиков, снижает погрешности в реконструированных циклограммах спада тяги. Показано, что реконструированные циклограммы обеспечивают хорошее согласование перегрузок по конструкции связки РН с КГЧ с лётными данными. Для дальнейших расчётов использовались циклограммы спада тяги, предложенные разработчиком ДУ, поскольку это соответствует консервативному подходу.



Кроме того, в разделе 4 разработана КЭ-модель РН с ПГ типа транспортных кораблей, учитывающая нелинейность стыка, возникающую из-за локальных податливостей интерфейсного шпангоута кораблей вблизи мест установки замков крепления к ПхО РН. Расчёты перегрузок от выключения ДУ по этой модели показали хорошее совпадение с ТМИ для обоих вариантов спада тяги ДУ (рисунок 12).

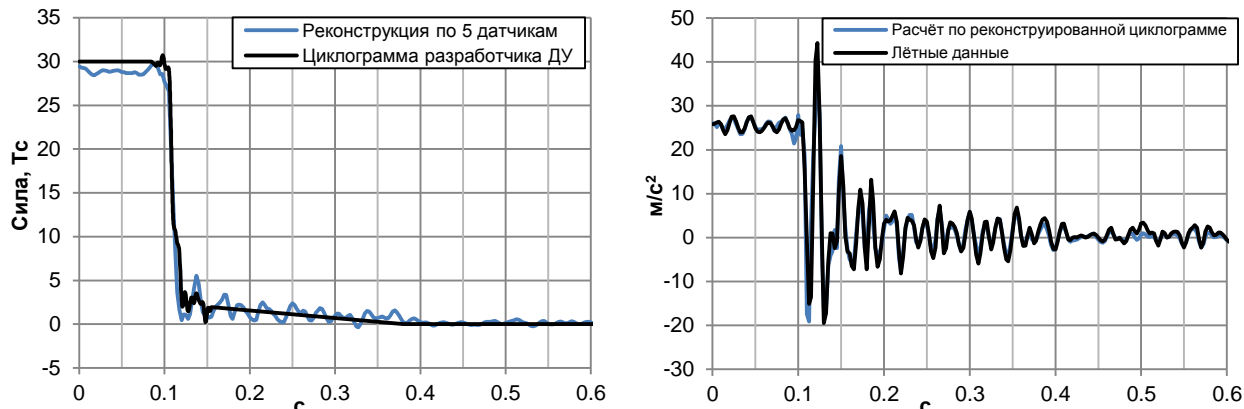


Рисунок 11 – Сравнение восстановленной циклограммы с данными разработчика ДУ (слева) и расчётных перегрузок на ступени с лётными (справа)

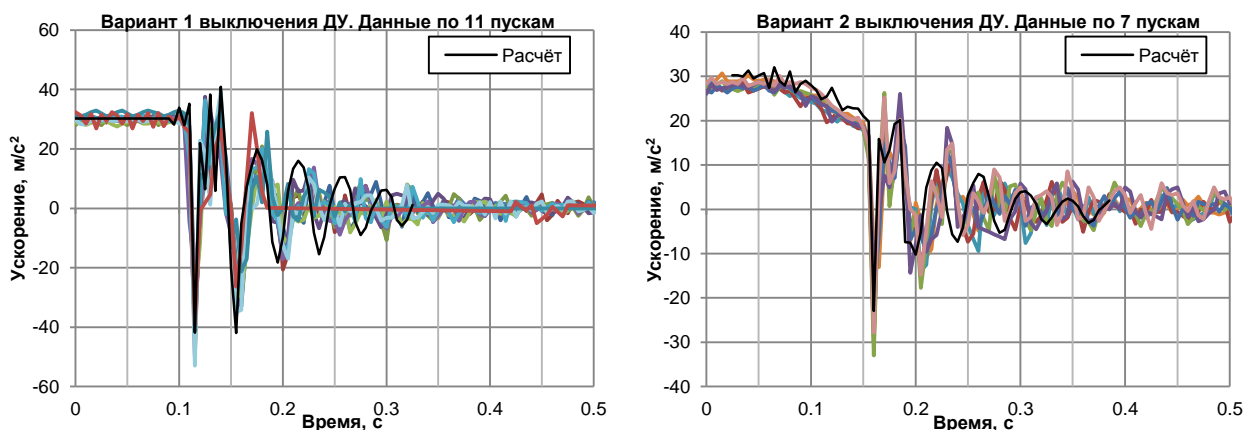


Рисунок 12 – Сравнение расчётных ускорений в ПрО ступени с ТМИ при пусках транспортных кораблей. Данные по двум вариантам выключения ДУ

В разделе 5 приведены огибающие уровней нагружения ПрО при вибропрочностных испытаниях. Проведен расчёт уровней перегрузок и НДС по конструкции ступени при виброиспытаниях, а также сравнение этих значений с перегрузками и напряжениями, возникающими при лётной эксплуатации.

В результате проведённой расчётно-экспериментальной работы получены результаты, подтвердившие прочность конструкции и узлов крепления приборно-агрегатного оборудования ПрО высотной ступени типовой РН среднего класса при спаде тяги ДУ:

- Перегрузки приборов и оборудования ПрО при выключении ДУ в варианте 1 (более резком) и варианте 2 (более мягком) меньше перегрузок, полученных при виброиспытаниях ступени. Причём, во втором (более мягком) варианте выключения ДУ разница составляет не менее 50%. Кроме того, пиковые значения перегрузок при выключении ДУ достигаются не более 2 – 3 раз, тогда как при виброиспытаниях пиковые значения достигаются

многократно. По анализу ТМИ показано, что уровни осевых перегрузок при спаде тяги ДУ максимальны при пусках ПГ типа транспортных кораблей;

- Нагрузки, принятые при статических испытаниях узлов крепления наиболее массивного оборудования, и расчётные данные по проектным перегрузкам в 1.5 раза превышают перегрузки, возникающие при выключении ДУ по более резкой (вариант 1) циклограмме спада тяги ДУ;

- Соответствующие этим перегрузкам напряжения в конструкции и узлах крепления оборудования ПрО существенно ниже пределов прочности используемых материалов.

### **Основные результаты и выводы**

1. Разработана методика реконструкции циклограмм набора и спада тяги ДУ по данным о динамической реакции конструкции с использованием математического моделирования на основе выделения разрывных составляющих во внешних силовых воздействиях. Разработано программное обеспечение для реализации методики, исследовано влияние погрешностей на качество решения обратной задачи.

2. Разработана методика задания активных сил, действующих на систему, содержащую механические аналоги, в обеспечение корректного решения задачи о реконструкции циклограмм набора и спада тяги ДУ по таким моделям, а также моделирования ОСИ и нагрузок на перспективные многоразовые РН.

3. Разработан универсальный принцип построения спектров ударного нагружения от переходных процессов произвольного вида, использующий низкочастотную фильтрацию для выделения квазистатических составляющих, и программное обеспечение с графическим интерфейсом для его реализации.

4. Обоснован альтернативный виброиспытаниям на эквивалентную гармоническую вибрацию подход к отработке крупногабаритных конструкций на переходные процессы с использованием экспериментальной базы отрасли. Разработана и валидирована КЭ-модель существующего стенда для таких испытаний. Показано, что этот подход позволяет обеспечить соответствие испытательных и лётных уровней перегрузок, ударных спектров и числа циклов нагружения на силовой части конструкции и оборудовании.

5. Разработан расчётно-экспериментальный подход к отработке вибропрочности блоков конструкций РКТ и их элементов, для которых в процессе лётной эксплуатации выявлены дополнительные динамические воздействия, не учтённые при НЭО.

6. Проведена апробация предложенного расчётно-экспериментального подхода на примере приборного отсека высотной ступени типовой РН среднего класса. Разработана и валидирована по результатам локальных частотных испытаний КЭ-модель объекта, проведено обобщение имеющейся ТМИ по пускам РН с различными КГЧ (по более чем 25 пускам). На основе этих результатов валидированы КЭ-модели связок ступени с различными КГЧ, а также циклограммы спада тяги ДУ, выданные разработчиком. Проведено обобщение результатов НЭО ступени, расчёты перегрузок и НДС на силовой части конструкции ступени и оборудовании при выключении ДУ и виброиспытаниях. Представленные результаты позволили сделать вывод о

возможности исключения дополнительных виброиспытаний ПрО ступени типовой РН при рассмотренных уровнях динамических воздействий.

**Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:**

1. Бондаренко А.Ю. Исследование условий динамического нагружения транспортных кораблей при их выведении на орбиту // Международная конференция «Пилотируемое освоение космоса», сборник тезисов. Секция 5 «Перспективные проекты в пилотируемой космонавтике. Наука и методология», г. Москва, 2016. С. 215.

2. Бондаренко А.Ю., Золкин С.Н., Лиходед А.И., Сидоров В.В., Титов В.А. Об особенностях решения задач о кинематическом возбуждении упругих систем применительно к транспортировочным испытаниям // Всероссийская научно-техническая конференция «Механика и математическое моделирование в технике», посвящённая 100-летию со дня рождения В.И. Феодосьева, сборник тезисов. Секция 2, «Динамика и прочность ракетно-космических конструкций», г. Москва, 2016. С. 159–162.

3. Бондаренко А.Ю., Сидоров В.В. Методический подход к наземной отработке конструкций ракетно-космической техники при нагрузках, возникающих в результате переходных процессов // Космонавтика и ракетостроение. 2016. № 3(88). С. 77–82.

4. Бондаренко А.Ю., Золкин С.Н., Лиходед А.И., Титов В.А. Особенности расчётного определения динамических нагрузок и напряжений при транспортировке блоков ракетно-космической техники // Космонавтика и ракетостроение. 2016. № 4(89). С. 60–68.

5. Бондаренко А.Ю. Определение силовых факторов и напряжений, возникающих при транспортировке объекта в случае его статически неопределимого закрепления // Космонавтика и ракетостроение. 2016. № 6(91). С. 21–26.

6. Бондаренко А.Ю. Математическое моделирование переходных процессов при наземных испытаниях изделий ракетно-космической техники // Космонавтика и ракетостроение. 2016. № 7(92). С. 48–52.

7. Бондаренко А.Ю., Борисов М.А. Расчёт эквивалентных осцилляторов, имитирующих колебания жидкости в оболочках, с использованием метода виртуальных масс // 7-я Международная научно-техническая конференция «К.Э. Циолковский – 160 лет со дня рождения. Космонавтика, радиоэлектроника, геоинформатика», г. Рязань, 2017. С. 111–116.

8. Бондаренко А.Ю., Курашов З.М. Исследование динамических характеристик типовой ступени РН с учётом гидроупругих свойств топливных баков // Труды 60-й Всероссийской научной конференции МФТИ, Аэрокосмические технологии. Секция космических летательных аппаратов, г. Москва-Долгопрудный-Жуковский, МФТИ, 2017. С. 58.

9. Бондаренко А.Ю., Лиходед А.И., Малинин А.А., Сидоров В.В. Исследование вибродинамики конструкций при кинематическом и силовом внешнем воздействиях // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 3(96). С. 5–13.

10. Александров С.С., Бондаренко А.Ю., Эйхорн А.Н., Юранев О.А. Копрово-пружинный стенд для нагружения космических аппаратов

инерционными силами импульсного характера // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 4(97). С. 65–70.

11. Бондаренко А.Ю., Лиходед А.И., Сидоров В.В. Особенности определения динамических нагрузок, действующих на конструкции ракет-носителей и космических аппаратов, при переходных процессах // Труды ЦАГИ, сборник статей научно-технической конференции «Прочность конструкций летательных аппаратов» 31 мая – 1 июня 2018 под редакцией М.Ч. Зиченкова, г. Жуковский, 2018. Вып. 2782, С. 68.

12. Бондаренко А.Ю., Митин А.Ю., Толчёнов В.А., Эйхорн А.Н., Юранев О.А. О способе проведения наземной отработки изделий РКТ на переходные процессы с использованием копров-пружинного стенда // Материалы XXII Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева: в 2 ч. под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. Ч. 1, СибГУ им. М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, 2018. С. 326–328.

13. Бондаренко А.Ю. Исследование влияния погрешностей в исходных данных на решение обратной задачи восстановления внешнего силового воздействия по реакции конструкции // Труды 61-й Всероссийской научной конференции МФТИ, Аэрокосмические технологии, г. Москва-Долгопрудный-Жуковский, МФТИ, 2018. С. 50–51.

14. Бондаренко А.Ю. Оценка циклограммы спада тяги по динамической реакции конструкции при выключении двигательной установки ракеты-носителя // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 6(105). С. 90–100.

15. Бондаренко А.Ю., Бордадымов В.Е., Даниловский Н.Н., Сидоров В.В. Особенности анализа телеметрической информации о перегрузках, получаемой при лётной эксплуатации изделий ракетно-космической техники // Космонавтика и ракетостроение. 2019. № 4(109). С. 48–53.

16. Бондаренко А.Ю., Митин А.Ю., Толчёнов В.А., Эйхорн А.Н., Юранев О.А. О способе проведения наземной отработки изделий ракетно-космической техники на переходные процессы с использованием копров-пружинного стенда // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20. № 1. С. 54–61.  
DOI: 10.31772/2587-6066-2019-20-1-54-61.