

На правах рукописи

Филипов Александр Геннадиевич

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК ДЛЯ УСКОРЕННОЙ ОТРАБОТКИ
КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

2.5.13. Проектирование, конструкция, производство, испытания
и эксплуатация летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет) на кафедре автоматических систем энергетических установок.

Научный руководитель:

Иголкин Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок Самарского университета.

Официальные оппоненты:

Бернс Владимир Андреевич, доктор технических наук, профессор, федеральное автономное учреждение «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина», кафедра «Прочность летательных аппаратов», профессор;

Ермаков Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», кафедра 601 «Космические системы и ракетостроение», доцент.

Ведущая организация: Акционерное общество «**Информационные спутниковые системы**» им. акад. **М.Ф. Решетнёва**», г. Железнодорожск.

Защита диссертации состоится «26» декабря 2023 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.03, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте Самарского университета: https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Filipov_A_G_Rashetno_experimentalnaya_metodika.pdf.

Автореферат разослан «___» ноября 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.379.03,
кандидат технических наук, доцент

А.В. Крамлих

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из основных этапов жизненного цикла космических аппаратов является его наземная экспериментальная отработка и, как правило, это весьма затратный по стоимости и продолжительный по времени этап.

Традиционный подход наземной экспериментальной отработки конструкций ракетно-космической техники в части вибрационной прочности предполагает, что образцы конструкции, успешно прошедшие зачётные испытания, не допускаются к лётной эксплуатации. Однако в зарубежной практике применяются альтернативные подходы, которые позволяют уменьшить количество применяемых при отработке образцов. Эти подходы могут использоваться вместе или независимо друг от друга при отработке. При этом признаётся, что использование альтернативных методов связано с повышенным риском по сравнению с принятой в отрасли стандартной процедурой, где лётный образец проходит приёмочные испытания и демонстрирует квалификационные запасы на опытном образце КА при зачётных испытаниях. Возможные риски при таких методах отработки могут быть уменьшены более тщательным проведением конструкторско-доводочных испытаний и применением более высоких проектных коэффициентов безопасности.

Анализ методик отработки вибрационной прочности, применяемых в отечественной практике, показал, что альтернативных подходов к отработке вибрационной прочности для вновь разрабатываемых малых серий космических аппаратов, а также для существующих серийных космических аппаратов при их модернизации, предложено не было.

Сложившаяся тенденция к ускорению процесса создания ракетно-космической техники и сокращению затрат на проведение её наземной экспериментальной отработки определяют актуальность и своевременность диссертационной работы.

Степень разработанности темы. В диссертационной работе использовались основные соотношения теории упругости, которые были подробно рассмотрены ранее в работах таких авторов, как А.С. Вольмир, А.М. Кац, Л.Д. Ландау, С.П. Тимошенко, В.И. Феодосьев и другие. Исследование метода конечных элементов, который применяется в настоящей работе, основывалось на трудах таких авторов, как Н. Бате, О. Зенкевич, М. Секулович, С.П. Рычков, Д.Г. Шимкович и др.

Постановке и решению задач динамики и прочности конструкций, определению требований и методов наземной отработки конструкций посвящены работы авторов А.И. Белоусова, А.В. Кармишина, С.И. Ткаченко, А.И. Лиходеда и др.

Теория колебаний и анализ динамических процессов рассмотрены в работах В.Л. Бидермана, В.В. Болотина, Я.Г. Пановко, С.Ф. Редько и др.

Большой вклад в исследования по определению вибрационных нагрузок и прочности конструкций ракетно-космической техники при вибрационном

нагружении внесли А.В. Анисимов, А.И. Лиходед, С.Н. Золкин, В.А. Титов, А.Ю. Бондаренко, А.Н. Софинский, И.М. Безмозгий, А.Г. Чернягин, В.С. Межин, В.В. Обухов, В.А. Бернс, Д.А. Маринин и другие. О наземной экспериментальной отработке (НЭО) в части вибрационной прочности, а также об альтернативных подходах наземной отработки говорится в работах Н.Ю. Введенского, О.Н. Хатунцевой, В.И. Халимановича, А.А. Демченко и др.

Цель работы: сокращение номенклатуры материальной части и сроков экспериментальной отработки конструкции КА за счёт применения разработанной расчётно-экспериментальной методики определения вибрационных нагрузок для ускоренной отработки конструкции КА путём повышения точности моделирования его динамических характеристик.

Задачи исследования:

- разработка оболочечной конечно-элементной модели (КЭМ) КА, описывающей динамические характеристики конструкции КА;
- разработка расчётно-экспериментальной методики определения вибрационных нагрузок для ускоренной отработки конструкции КА;
- разработка методики формирования пониженных режимов для вибропрочностных испытаний первого лётного образца КА;
- проведение экспериментальных исследований динамических характеристик конструкции КА с целью получения валидированной КЭМ КА;
- разработка методики и программного обеспечения (ПО) для коррекции оболочечной КЭМ КА по результатам экспериментально полученных динамических характеристик.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана расчётно-экспериментальная методика определения вибрационных нагрузок для ускоренной отработки конструкции КА, которая позволит сократить номенклатуру и сроки отработки вибропрочности конструкции КА при малосерийном производстве, при модернизации существующих серий, а также при изменениях условий их функционирования. Методика отличается отработкой вибропрочности конструкции КА с помощью виртуальных испытаний КЭМ на квалификационных режимах нагружения. При этом КЭМ уточнена по результатам испытаний лётного образца исследуемого объекта.

2. Предложена методика формирования пониженных режимов вибрационного нагружения, отличающаяся возможностью испытаний лётного образца КА на вибропрочность при малосерийном его производстве, при модернизации существующих серий, а также при изменениях условий их функционирования, позволяющая провести отработку конструкции КА на материальной части лётного образца.

3. По результатам вибрационных испытаний натурного объекта разработана методика автоматизированной коррекции оболочечной КЭМ КА, позволяющая сократить сроки разработки валидированной КЭМ изделия с большим количеством варьируемых параметров.

Теоретическая и практическая значимость работы. Проведённые исследования повышают точность математического моделирования динамических характеристик конструкции КА и позволяют использовать её КЭМ для демонстрации квалификационных запасов прочности на виртуальных испытаниях.

Расчётно-экспериментальная методика определения вибрационных характеристик, применённая при проектировании серии малого космического аппарата (МКА) «Аист-2Т», позволит сократить сроки наземной экспериментальной отработки, а также исключить динамический макет из номенклатуры наземной экспериментальной отработки КА.

Методология и методы исследований. В диссертационной работе использовались методы математического моделирования, теории колебаний, численные методы решения дифференциальных уравнений, экспериментальные методы модального анализа. Экспериментальные исследования проведены на оборудовании АО «РКЦ „Прогресс”» на динамическом макете МКА «Аист-2Д», расчётные – на ЭВМ с использованием лицензионных программных комплексов конечно-элементного анализа и анализа экспериментально полученных динамических характеристик.

Основные положения, выносимые на защиту:

- расчётно-экспериментальная методика определения вибрационных нагрузок для ускоренной отработки конструкции КА, позволяющая провести отработку на вибрационную прочность с применением имитационного математического моделирования на квалификационных режимах, используя откорректированную оболочечную модель КА по результатам вибрационных испытаний первого лётного образца КА на пониженных режимах;

- методика формирования пониженных режимов вибрационного нагружения, позволяющая провести вибропрочностные испытания первого лётного образца с целью выявления возможных конструктивных и технологических несовершенств (проверка надёжности, контроля резьбовых соединений, механической целостности узлов крепления КА), проверки работоспособности отдельных агрегатов и приборов КА после воздействия вибрации, проверки сохранности геометрических и юстировочных характеристик конструктивных элементов испытываемых сборок КА и т.д.;

- методика для автоматизированной коррекции оболочечной КЭМ КА, реализованная в программном обеспечении;

- экспериментальные данные вибрационных характеристик динамического макета МКА ДЗЗ, позволяющие провести автоматизированную коррекцию его КЭМ.

При решении поставленных задач **достоверность** научных результатов определяется применением методов, эффективность и достоверность которых подтверждена отечественной и зарубежной практикой, например, методом конечных элементов для анализа механических систем, валидацией разработанных моделей на основе экспериментальных данных, полученных на базе сертифицированного испытательного центра АО «РКЦ «Прогресс».

Апробация работы. Результаты работы докладывались и публиковались на конференциях: международной научно-практической конференции «Решетневские чтения», г. Железногорск, в 2018, 2022 годах, международной конференции «Динамика и виброакустика машин», г. Самара, в 2018, 2022 годах, международной научно-практической конференции имени Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения», г. Самара, в 2023 году.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 15 работах: пять статей в научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, из них две статьи в научных изданиях, индексируемых базой Scopus; и статьи в прочих изданиях, в том числе работы, опубликованные в материалах и трудах международных и всероссийских конференций.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или при его непосредственном участии. Разработка методики отработки выполнена при непосредственном участии автора. Реализация методики в виде кодов Python, их тестирование и апробация осуществлены автором лично. Все экспериментальные исследования подготовлены и проведены под руководством или лично автором. Обработка и анализ результатов испытаний, разработка и коррекция конечно-элементной модели МКА выполнены автором лично. Совместно полученные результаты представлены с согласия авторов.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов и списка литературы из 111 наименований. Основное содержание работы изложено на 112 страницах машинописного текста, включает 48 рисунков, 8 таблиц.

Соответствие работы паспорту научной специальности. В соответствии с формулой специальности 2.5.13. «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов» в диссертации разработаны новые и усовершенствованы существующие методы решения задачи отработки вибрационной прочности конструкции КА на первом лётном её образце с применением методики коррекции КЭМ КА и методики формирования пониженных режимов для вибропрочностных испытаний первого лётного КА. Полученные результаты соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности – 1, 2, 5.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении работы определён объект исследования, актуальность исследования, сформулированы цели и задачи. Приведены методы и средства, достоверность результатов, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Также приведены сведения об апробации работы и реализации полученных результатов. Представлен обзор по теме исследования, включающего решение проблем вибрационной прочности КА, методы исследования динамических характеристик конструкций КА и НЭО КА на вибрационную прочность.

В первом разделе описаны основные этапы жизненного цикла КА и выделены наиболее важные с точки зрения вибрационного нагружения на конструкцию КА этапы. Описаны основные методы коррекции математических моделей, и проведён анализ существующих подходов отработки на прочность конструкции РКТ.

Основными этапами жизненного цикла, характеризующимися значительными вибрационными нагружениями, являются: НЭО, транспортирование с завода-изготовителя до космодрома, выведение (старт, максимальный скоростной напор, разделение ступеней РН и др.). Учитывая повышение требований к срокам изготовления КА, необходимо оптимизировать сроки изготовления в части объёмов НЭО. При НЭО, согласно нормативно-технической документации, принятой в отрасли, определён ряд требований, определяющих методы отработки в части вибрационной и статической прочности.

В.Д. Куреев, С.В. Павлов, Ю.А. Соколов проводили анализ применения протолётного подхода при НЭО наноспутников. Копытов В.И. и Орлов С.А. рассматривали порядок формирования режимов протолётных и приёмных испытаний. В работе И.И. Зими́на, М.В. Валова, В.Е. Чеботарева говорится о принципах построения унифицированной космической платформы, предлагается проводить полный цикл наземной отработки для субмодулей унифицированной платформы, а для последующих платформ объём отработки сократить до объёмов приёмно-сдаточных испытаний. Работа Н.Ю. Введенского и М.В. Пустобаева посвящена сравнительному анализу методов отработки космической техники на механические воздействия, применяемые в США, ЕС и РФ.

Согласно требованиям, действующим в отечественной отрасли нормативно-технической документации, наземным испытаниям подвергаются все вновь разрабатываемые, модернизируемые КА, а также КА, для которых принципиально изменены условия функционирования, при этом перечень конкретных видов отработочных испытаний включает в себя проведение вибропрочностных испытаний. Однако существует возможность уточнения (определения) перечня конкретных видов отработочных испытаний, включаемых в комплексную программу экспериментальной отработки.

Во втором разделе разработана оболочечная КЭМ КА ДЗЗ, с помощью которой проведены исследования по определению динамических характеристик и разработана расчётно-экспериментальная методика для наземной отработки КА на вибрационные воздействия. Проведены численные исследования динамических характеристик исследуемой конструкции КА на проектной КЭМ, и проведён для одного из определяющих случаев эксплуатации анализ совместного нагружения.

Третий раздел посвящён экспериментальным исследованиям динамических характеристик КА. Выбраны и обоснованы используемые испытательное оборудование и средства измерения. Проведены серии испытаний

динамического макета КА для определения динамических характеристик. Разработана методика формирования пониженных режимов, необходимых для проведения вибропрочностных испытаний первого лётного образца КА, основанная на ограничении испытательных режимов исходя из недостижения суммарно повреждаемости конструкции в результате вибрационного воздействия при испытаниях и эксплуатации.

Максимальную допустимую повреждаемость при отработке на вибропрочность на квалификационных режимах принимают за единицу: $D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1$, где D – суммарная общая допустимая повреждаемость; n_i – количество циклов при эксплуатации, рассчитывается как: $n_i = N_i \left(\frac{a_n}{a_N}\right)^4$, где a_n – испытательные режимы; a_N – квалификационные режимы; N_i – количество циклов при квалификационных испытаниях; i – количество видов испытаний (на выведение, на транспортирование).

Для учёта откликов на резонансных частотах навесного оборудования необходимо анализировать результаты испытаний на режимах 0,1...0,3 от квалификационных. При испытаниях на вибропрочность такой разброс амплитудно-частотных характеристик может вызвать излишнюю перегрузку, что может привести к появлению неисправности и отказу в работе бортовой аппаратуры. Для формирования режимов для проведения вибропрочностных испытаний первого лётного образца КА необходимо:

- 1) провести вибрационные испытания на режимах 0,1...0,3 от квалификационных;
- 2) провести анализ результатов вибрационных испытаний, полученный при испытаниях первого лётного образца на режимах по п. 1;
- 3) рассчитать прогноз на основе анализа для квалификационных режимов;
- 4) на основе прогноза и возможностей испытательного оборудования провести вырезку опасных диапазонов частот для проведения вибропрочностных испытаний первого лётного образца КА (рисунок 1).

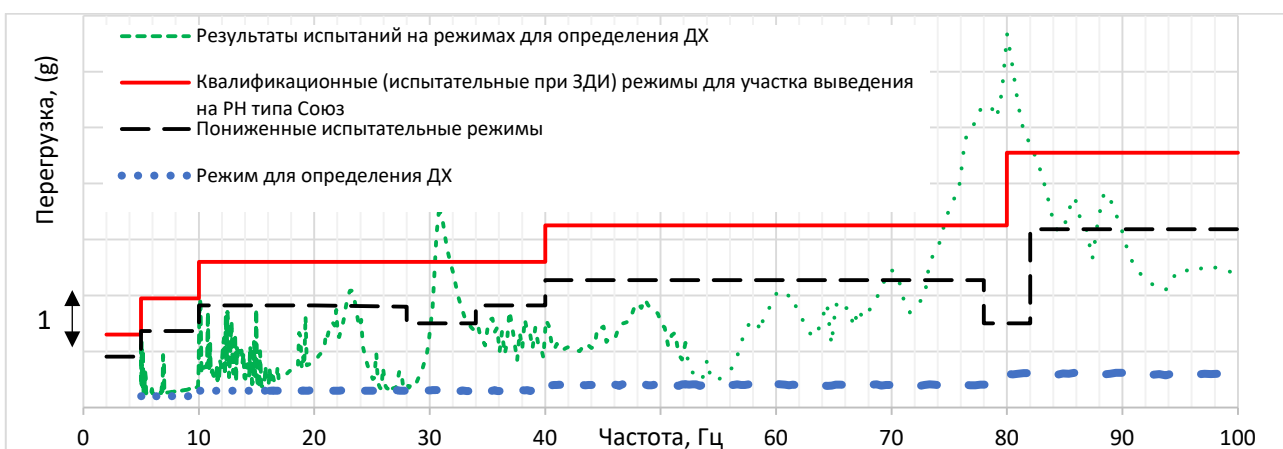


Рисунок 1. Испытательные режимы
(прогноз откликов на квалификационных режимах не показан)

В четвёртом разделе приведена методика автоматизированной коррекции динамических характеристик КЭМ КА (рисунок 2) и её результаты, в которой был

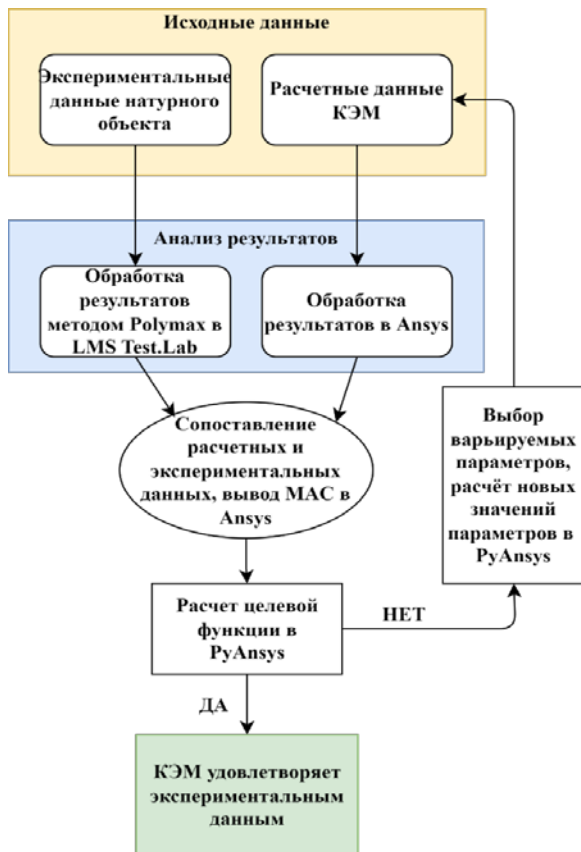


Рисунок 2. Алгоритм коррекции КЭМ

критерий модальной достоверности; $p = (E, G, \mu, C)$ – варьируемые параметры, где E – модули упругости материалов сотовых панелей и платформы; G – модули сдвига сотовых панелей и платформы; μ – коэффициенты Пуассона материалов сотовых панелей и платформы; C – жесткости соединений между элементами конструкции.

После проведения коррекции динамических характеристик предложенной методикой были получены следующие значения погрешностей (см. таблицу 1):

Таблица 1 – Сравнение расчётных и экспериментальных частот

Номер тона	Расчётные частоты, Гц	Экспериментальные частоты, Гц	Погрешность до коррекции, %	Погрешность после коррекции, %
1	15,0	13,8	17,5	8,6
2	16,5	14,2	28,9	16,2
3	21,0	22,5	54,2	6,7
4	29,8	32,4	9,5	8,0
5	35,0	36,3	31,4	3,6
6	53,0	57,6	14,9	8,0
7	56,3	59,2	0,1	4,9

проведён автоматизированный подбор варьируемых параметров методом дифференциальной эволюции. Результаты коррекции показали сходимость расчётных откликов конструкции с его амплитудно-частотными характеристиками, полученными экспериментальным путём, – показатели MAC в диапазоне 0,75 – 1.

Для автоматизации подбора значений параметров было разработано программное обеспечение, основанное на коде Python с интеграцией его в PyAnsys. При выборе значений параметров динамических характеристик решалась задача минимизации целевой функции:

$$F(p) = \sum_{i=1}^n [k |P_{\text{расч.}} - P_{\text{эксп.}}| + |1 - MAC_{i,j}|] \rightarrow \min,$$

где n – количество тонов; k – весовой коэффициент, позволяющий учесть разнородность варьируемых параметров; $P_{\text{расч.}}$ – расчётные частоты; $P_{\text{эксп.}}$ – экспериментальные частоты; MAC –

В результате коррекции диссипативных характеристик, на примере оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) были достигнуты качественные улучшения виброускорений (см. рисунок 3).

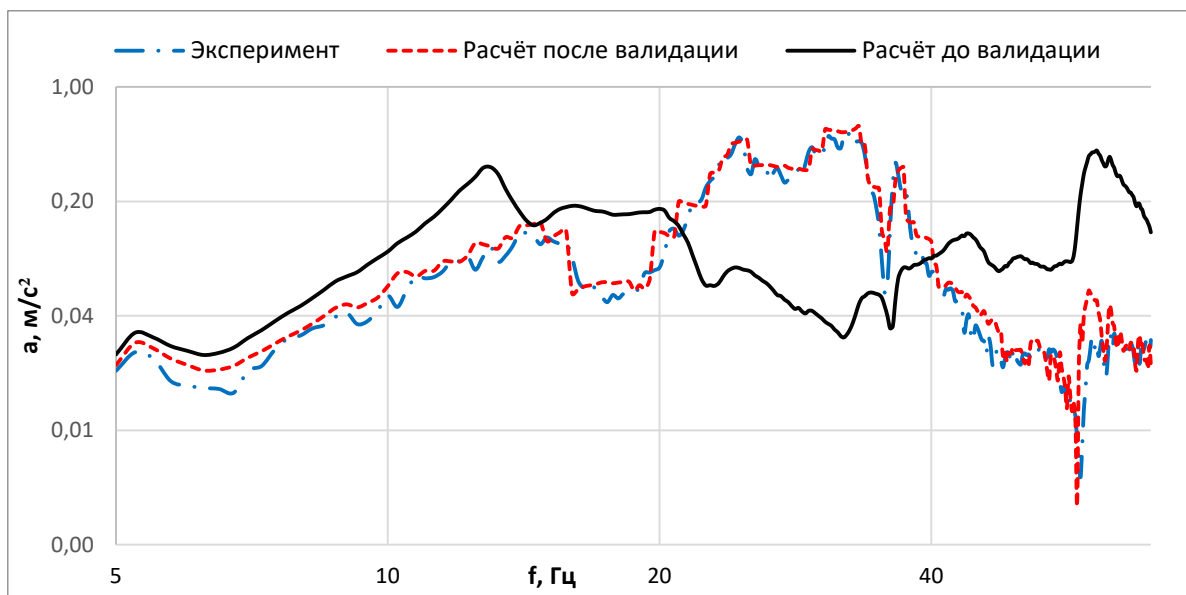


Рисунок 3. Сравнение виброускорений для центра масс установки ОЭА после валидации и подбора демпфирования конструкции

Отработка вибрационной прочности включает в себя расчётные и экспериментальные исследования. Анализ требований стандартов вибрационной отработки показал, что, несмотря на совершенствование методов расчётной отработки прочности с применением подтвердивших свою надёжность программных комплексов (Nastran, Ansys, NX Simcenter и др.), принятым за основу критерием, подтверждающим расчёт, является его экспериментальная проверка, а в некоторых случаях нагружения (ударная нагрузка, вибрационное нагружение) допускается осуществлять исключительно с экспериментальной проверкой. Однако в ряде случаев те же стандарты регламентируют допущения, позволяющие уточнить перечень отработочных испытаний КА при выполнении определённых условий:

- наличие изделий-аналогов, на которых проведены необходимые отработочные испытания конструкций КА;
- оптимизация расчётного анализа нагружения и прочности по результатам эксперимента;
- полный объём проведённой автономной отработки составных частей КА;
- выполнение требований норм прочности по результатам уточнённого расчёта конструкции КА;
- двойной запас прочности по изменённым по сравнению с изделием-аналогом элементам конструкции, но с неизменной силовой схемой, материалами, технологиями изготовления, динамическими характеристиками и т.п.

Подтверждение целей и решения задач отработки вибрационной прочности конструкции КА может быть выполнено с помощью разработанной расчётно-экспериментальной методики, базирующейся на положениях:

1. Анализ и обобщение результатов наземной экспериментальной отработки изделий-аналогов в части вибропрочности.

2. Валидация динамических характеристик КЭМ КА по результатам вибрационных испытаний лётного образца на режимах 0,1...0,3 от квалификационных.

3. Определение пониженных режимов для испытаний на вибропрочность лётного образца с учётом результатов вибрационных испытаний на режимах 0,1...0,3 от квалификационных, которое заключается в понижении амплитуд в опасных диапазонах частот навесного оборудования и конструкции КА.

4. Вибропрочностные испытания лётного образца на пониженных режимах, которые проводятся для следующих целей:

- выявление возможных конструктивных и технологических несовершенств (проверка надёжности, контроля резьбовых соединений, механической целостности узлов крепления КА);

- проверка работоспособности отдельных агрегатов и приборов КА после воздействия вибрации;

- проверка сохранения геометрических и юстировочных характеристик конструктивных элементов испытываемых сборок КА и т.д.

5. Экспериментальные исследования возможных нелинейных динамических характеристик КА в результате возможного наличия таких факторов, как разность жесткостных характеристик стыков при растяжении и сжатии, соударения элементов конструкции и др.

6. При необходимости коррекция КЭМ КА по результатам экспериментальных исследований возможных нелинейных динамических характеристик и разработка процедур проведения дальнейших расчётов в нелинейной постановке задач.

7. Виртуальные испытания по валидированной КЭМ КА на всех предполагаемых случаях нагружения.

При реализации расчётно-экспериментальной методики должны быть выполнены следующие задачи, которые позволят уточнить перечень отработочных испытаний КА (рисунок 4):

- разработка по техническому заданию КЭМ КА и расчёт динамических характеристик, определение эксплуатационных режимов из условия выбранных средств транспортирования до места выведения и средства выведения на целевую орбиту;

- определение пониженных вибрационных режимов нагружения для вибропрочностных испытаний лётного образца КА;

- выбор испытательного оборудования, средств измерения и разработка рекомендаций по установке датчиков-преобразующей аппаратуры для контроля нагружения лётного образца при модальных испытаниях по определению динамических характеристик и вибропрочностных испытаний на пониженных режимах;

- расчёт напряжённо-деформированного состояния конструкции КА по полученным при расчётном анализе вибрационным нагрузкам;

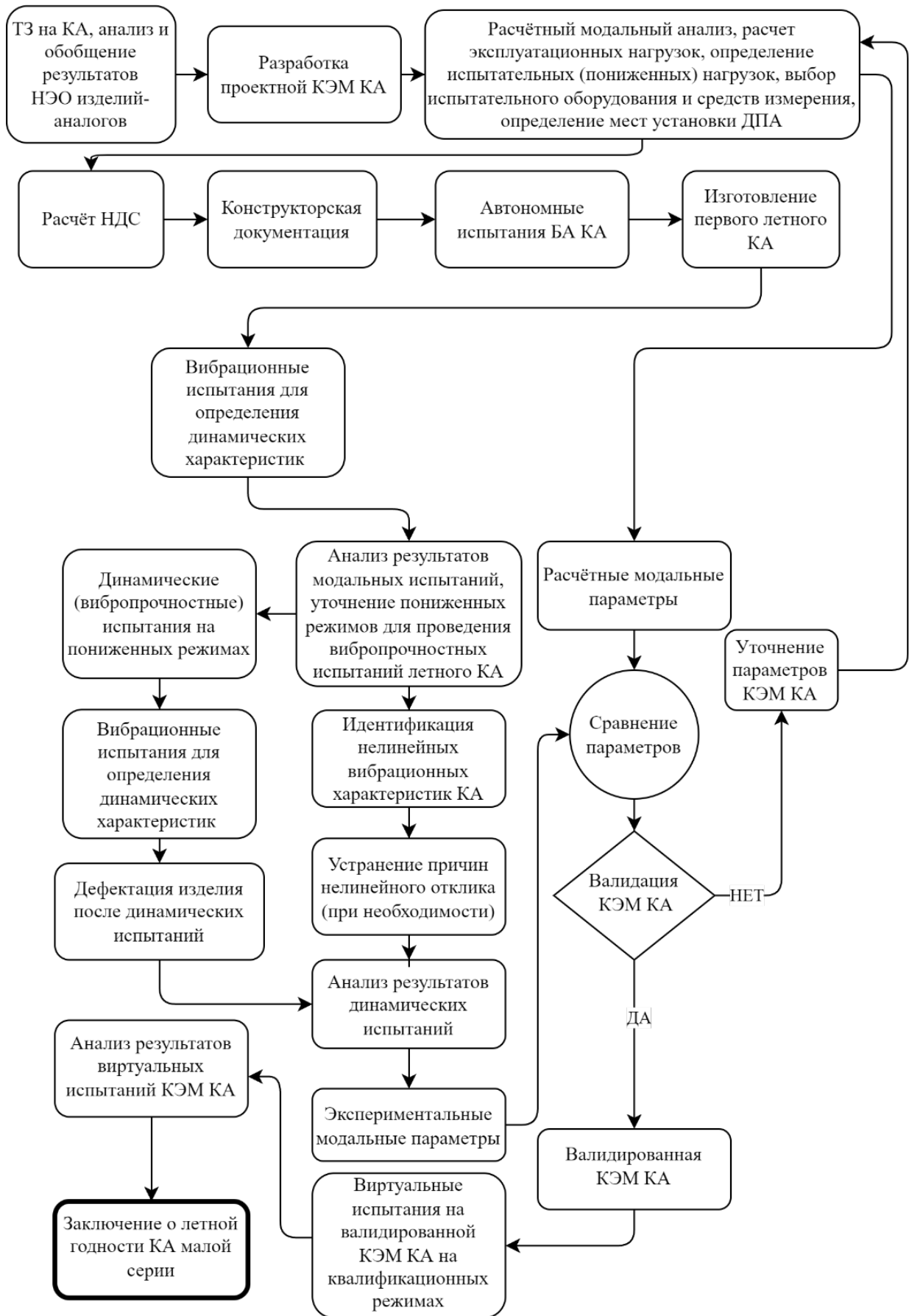


Рисунок 4. Расчётно-экспериментальная методика определения вибрационных нагрузок для ускоренной отработки конструкции КА

- разработка конструкторской документации конструкции КА;
- автономные испытания компонентов и бортовой аппаратуры КА (конструкторско-доводочные испытания), изготовление по конструкторской документации лётного КА;
- проведение вибрационных испытаний лётного образца КА для определения динамических характеристик;
- анализ результатов вибрационных испытаний и уточнение пониженных режимов для проведения вибропрочностных испытаний лётного образца КА;
- проведение вибропрочностных испытаний лётного образца КА на пониженных режимах;
- проведение испытаний по идентификации нелинейных характеристик конструкции КА;
- проведение вибрационных испытаний лётного образца КА для определения динамических характеристик;
- демонтаж датчиков-преобразующей аппаратуры, определение объёма и проведение ремонтно-восстановительных работ, при необходимости;
- коррекция КЭМ КА и учёт, при необходимости, нелинейных вибрационных характеристик;
- анализ совместного нагружения и расчёт прочности по откорректированной высокоточной КЭМ (виртуальные испытания) для всех случаев нагружения КА;
- разработка заключения о прочности конструкции КА ДЗЗ и допуска его к лётным испытаниям в части прочности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования была решена научно-техническая задача в области космического машиностроения и достигнута поставленная цель, имеющие существенное значение при сокращении номенклатуры материальной части и сроков экспериментальной отработки конструкции КА за счёт применения протолётного подхода при наземной экспериментальной отработке конструкции КА на базе разработанной расчётно-экспериментальной методики определения вибрационных нагрузок для ускоренной отработки конструкции КА. Сокращение сроков отработки в результате применения разработанной методики для отработки вибропрочности может составлять примерно 50 % от времени отработки при традиционном подходе за счёт сокращения объёма разрабатываемой КД на макет изделия, исключения изготовления составных частей для создания отдельной материальной части в обеспечение подтверждения вибропрочности изделия, разработки высокоточной КЭМ макета изделия с проведением имитационного моделирования испытаний.

В процессе работы были получены следующие результаты:

1. Разработана методика формирования пониженных режимов для проведения вибропрочностных испытаний лётного образца КА, базирующаяся на прогнозировании квалификационного нагружения, основанного на вибрационных испытаниях на уровнях 0,1...0,3 от квалификационных, и вырезки опасных

резонансных частот до приемлемых. Обоснован выбранный уровень режимов с точки зрения предполагаемого израсходования ресурса навесного приборно-агрегатного оборудования.

2. Проведена серия экспериментальных исследований динамических характеристик КА ДЗЗ с применением бесконтактного средства измерения и анализ результатов испытаний, необходимый для коррекции оболочечной КЭМ КА.

В результате экспериментальных исследований динамических характеристик конструкции КА были получены 7 тонов на частотах: 13,8 Гц, 14,2 Гц, 22,5 Гц, 32,4 Гц, 36,3 Гц, 57,6 Гц, 59,2 Гц. Также на основе анализа результатов подтвердилась правомерность допущения о линейности исследуемой динамической системы.

3. Разработана методика и ПО для коррекции оболочечной КЭМ, с помощью которой была валидирована КЭМ КА по результатам модальных испытаний натурного объекта исследования. Полученные результаты (значения МАС в диапазоне 0,75 – 1) показали удовлетворительную корреляцию расчётных и экспериментальных данных, что позволит применять данную методику и ПО в решении задач при отработке вибрационной прочности конструкции КА. В результате коррекции КЭМ максимальные значения погрешности с 54,2 %, до коррекции, достигли 16,2 %.

4. Разработана расчётно-экспериментальная методика определения вибрационных нагрузок для ускоренной отработки конструкции КА, которая базируется на:

- разработке валидированной КЭМ по результатам вибрационных испытаний лётного КА на режимах 0,1...0,3 от квалификационных,
- проведении вибропрочностных испытаний лётного образца КА на режимах, сформированных после вибрационных испытаний на режимах 0,1...0,3 от квалификационных,
- виртуальных испытаниях на валидированной КЭМ объекта исследования на квалификационных режимах.

Перспектива дальнейшего развития темы состоит в разработке методики автоматизированной валидации КЭМ КА по диссипативным характеристикам.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Филипов, А.Г.** Определение нагрузок на перфорированную перегородку бака ракеты-носителя / **А.Г. Филипов, И.Е. Глазков** // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2020. – Т. 19. – № 4. – С. 80–86. – DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-4-80-86.

2. Иголкин, А.А. Модальный анализ динамического макета малого космического аппарата «АИСТ-2Д» / А.А. Иголкин, А.И. Сафин, **А.Г. Филипов** // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и

машиностроение. – 2018. – Т. 17. – № 2. – С. 100–108. – DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-100-108.

3. Иголкин, А.А. Об альтернативном методе обработки динамической прочности конструкции малого космического аппарата / А.А. Иголкин, **А.Г. Филипов** // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2023. – Т. 24. – № 3. – С. 25–31. – DOI: 10.31772/2712-8970-2023-24-3.

Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых базой Scopus

1. Determination of dynamic overload for onboard spacecraft equipment / A. Igolkin, E. Shakhmatov, A. Safin, **A. Filipov** // 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM. – 2020. – С. 9243871.

2. Igolkin, A. Modal analysis of the small spacecraft dynamic model / A. Igolkin, **A. Filipov** // Inter-Noise 2019 Madrid – 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. – 2019.

Статьи, опубликованные в других изданиях

1. Об экспериментальной идентификации нелинейного динамического поведения конструкции малого космического аппарата / А.А. Иголкин, **А.Г. Филипов**, М.В. Баляба, И.Г. Глазков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23. – № 6 (104). – С. 140–148.

2. Иголкин, А.А. Модальный анализ динамического макета малого космического аппарата // А.А. Иголкин, А.И. Сафин, **А.Г. Филипов** // Решетневские чтения. – 2018. – Т. 1. – С. 117–118.

3. Сравнительный расчёт низкочастотной составляющей динамических перегрузок на бортовую аппаратуру космического аппарата // А.А. Иголкин, Е.В. Шахматов, А.А. Попков, **А.Г. Филипов** // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2019. – Т. 21. – № 5 (91). – С. 67–72.

4. Иголкин, А.А. Оценка уровней перегрузок на установки приборов и агрегатов космического аппарата / А.А. Иголкин, А.А. Попков, **А.Г. Филипов** // Испытания, диагностика, надёжность. Теория и практика. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции; под общей редакцией В.П. Назарова. – Красноярск, 2020. – С. 79–83.

5. Иголкин, А.А. Расчётно-экспериментальный метод обработки динамической прочности конструкции МКА / А.А. Иголкин, **А.Г. Филипов** // Решетневские чтения: материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнёва. – Красноярск, 09–11 ноября 2022 года. – Часть 1. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва», 2022. – С. 102–103.

6. Иголкин, А.А. Об учёте локальной нелинейности конструкции космического аппарата при валидации его конечно-элементной модели / А.А. Иголкин, **А.Г. Филипов** // Динамика и виброакустика машин (DVM-2022):

сборник докладов шестой международной научно-технической конференции. – Самара, 21–23 сентября 2022 года. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2023. – С. 142–143.

7. **Филипов, А.Г.** Методика расчёта нагрузок на трубопровод от динамических воздействий во время полёта ракеты-носителя / **А.Г. Филипов, И.Е. Глазков** // Известия Самарского научного центра РАН. – 2021. – Т. 23. – № 6. – С. 78–82.

8. Влияние жёсткости соединений элементов конструкции на амплитудно-частотные характеристики объекта / А.А. Иголкин, А.И. Сафин, **А.Г. Филипов** [и др.] // IV Международной научно-практической молодёжной конференции «Февральские чтения – 2019: Творческий потенциал молодёжи в решении авиакосмических проблем». – 2019. – С. 7–9.

9. Муртазин, В.М. Основные аспекты воздействия ветрового нагружения на ракету-носитель при предстартовой подготовке / В.М. Муртазин, **А.Г. Филипов** // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (VI Козловские чтения). – 2019. – Т. 1. – С. 130–132.

10. Иголкин, А.А. Экспериментальный модальный анализ динамического макета малого космического аппарата «Аист-2Д» / А.А. Иголкин, А.И. Сафин, **А.Г. Филипов** // Четвёртая международная научно-техническая конференция «Динамика и виброакустика машин (DVM-2018)». – 2018. – С. 52–54.