

В диссертационный совет Д 212.125.05
при ФГБОУ ВО "Московский
авиационный институт (национальный
исследовательский университет)" МАИ
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское шоссе, д. 4

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора Борzych Сергея Васильевича на диссертацию Комарова Ильи Сергеевича "Численное моделирование виброударного нагружения конструкций на стендах взрывного действия при имитации нагрузок от срабатывания пиротехнических средств разделения", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – "Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры"

Задачи виброударной прочности бортового оборудования ракет-носителей (РН) и космических аппаратов (КА) возникают как на ранней стадии разработки изделий (определения их будущего облика), так и на протяжении всего их жизненного цикла. Это обусловлено требованиями по обеспечению безаварийного функционирования и выполнения целевой задачи, возложенной на тот или иной прибор. Виброударные процессы, возникающие при разделении ступеней РН, отделения полезной нагрузки обусловлены применением взрывчатых веществ в конструкции систем разделения, инициирование которых приводит к возникновению интенсивной быстрозатухающей волны деформации, распространяющейся по конструкции. Постоянно совершенствующиеся радиоэлектронные компоненты, чувствительные к виброударным процессам, и их активное применение в конструкции приборов и оборудования РН и КА, приводит к необходимости обязательной наземной отработки бортового оборудования на указанные нагрузки.

Целью решения задач виброударной прочности является обеспечение требований нормативных документов и стандартов, действующих в космической отрасли, а так же обеспечение выполнения поставленной задачи бортовыми вычислительными комплексами и системами, в рамках программы обеспечения надежности (ПОН) разрабатываемых космических комплексов.

Актуальность темы обусловлена тем, что в настоящее время не существует универсальных стендов для отработки оборудования и опытных сборок различного назначения и соответствующих инженерных подходов, в то время как в связи с мощным развитием вычислительной техники в различных системах КА и РН, и прежде всего в системах управления, играющих ключевую роль в обеспечении надежного функционирования изделий, во все больших масштабах используется сложная радиоэлектронная аппаратура.

Диссертация состоит из введения и пяти глав.

Во введении изложена история вопроса, приведен обзор литературы, относящейся к теме диссертации, обоснована актуальность проведенного исследования, сформулирована научная новизна и практическая ценность диссертации.

В первой главе приведен обзор основных задач виброударных испытаний изделий РКТ, обзор методов и технических средств, применяемых при испытаниях на виброудар. Представлен обзор методов прогнозирования предельных значений амплитуды виброударного нагружения и сформулированы подходы к количественному описанию виброударной нагрузки в терминах ударного спектра. Приведены типовые методы и экспериментальные стенды для испытаний изделий.

Автором предложено использовать численный аппарат – расчетные математические пакеты для прогнозирования предельных значений. Следует отметить, что несмотря на широкое применение математических пакетов в различных технических задачах, до сих пор моделирование виброударных

нагрузок с их использованием не проводилось. Это обусловлено необходимостью разработки методик численного моделирования, что является сложной научно-технической задачей, включающей в себя: определение исходных данных, построение конечно-элементных моделей объекта испытаний и процесса формирования нагрузки в испытательном стенде, численное моделирование, анализ сходимости и аппроксимации решения, проведение экспериментальных работ для подтверждения правильности получаемых расчетных значений.

Автором предложен алгоритм и последовательность разработки указанных методик для получения высокой достоверности и точности расчетов, в терминах интервала допустимых значений ударного спектра.

Во второй главе излагаются результаты численного моделирования по определению эксплуатационных режимов устройства локального нагружения, которое используется для отработки на виброударные нагрузки крупногабаритных изделий, например составных частей орбитальных станций, КА и приборных отсеков РН.

Принцип работы устройства основан на метании пороховыми газами штока-ударника, расположенного в баллистическом стволе и крепящимся на обечайку изделия. Представлена методика численного моделирования с использованием физической модели горения пороха, реализованной в программном комплексе ANSYS Autodyn. Для определения параметров, используемых в модели и в физическом законе горения, предложен метод идентификации неизвестных параметров, используемых в уравнении состояния, по известным энергетическим и геометрическим справочным характеристикам пороха.

Достоверность получаемых результатов численного моделирования основана на проведении модельных испытаний по метанию алюминиевой частицы на пороховой баллистической метательной установке и сравнения результатов с расчетными значениями, полученными по разработанной методике. Стоит отметить, что экспериментальные и расчетные значения согласуются не только по результирующей скорости метания ударника, но и по профилю давления в камере пороховой баллистической установки, что свидетельствует о

высокой точности математического подхода к определению исходных данных и численного решения.

С использованием верифицированной методики расчета получены зависимости скорости ударника - подвижного штока от времени применительно к устройству локального нагружения в случае использования промышленных патронов.

В третьей главе представлены результаты численного и экспериментального моделирования виброударного нагружения фрагмента бака РН, имитирующего срабатывание пиротехнических средств разделения, на основе программного комплекса ABAQUS Explicit с использованием исходных данных по скоростям ударника – подвижного штока, полученных во второй главе.

Работа обоснованно разделена на два этапа. На первом этапе проведены эксперименты с целью определения нагрузки, сообщаемой обечайке изделия при использовании устройства локального нагружения со специально подобранным резино-металлическими демпфером. Поскольку прямое измерение давления между демпфером и обечайкой представляется трудноосуществимым, автором предложен численный метод определения нагрузки. Для подтверждения достоверности результатов расчета и экспериментальных данных проведена серия испытаний с использованием контролирующего датчика виброускорений, расположенного на внутренней стороне обечайки изделия под местом удара. Сравнения расчетных и экспериментальных данных выявило совпадение уровней виброударного нагружения как в амплитудно- временной зависимости, так и в терминах ударного спектра, что позволяет говорить о достоверности численной методики.

На втором этапе полученные в первой части главы 3 зависимость давления от времени между демпфером и обечайкой использовалась в качестве исходных данных для моделирования виброударного нагружения на оболочечную конечно-элементную модель изделия. Для валидации методики использованы экспериментальные данные, полученные при испытании конструкции на ударное воздействие.

Следует отметить, что предложенный численный подход к определению уровней виброударных ускорений по имеющейся базе модельных экспериментов с различными демпферами и режимами работы устройства нагружения является новым и позволяет получить оценку в терминах спектра удара на стадии проектирования новых ракет-носителей и разгонных блоков. Полученная оценка может быть использована для разработки уточненных технических требований в части ударной прочности к бортовому оборудованию, расположенного в непосредственной близости от систем разделения, до начала наземных испытаний, что позволяет сократить время разработки космического комплекса в целом.

В четвертой главе рассмотрено моделирование взрывных нагружающих устройств, применяемых в стационарных стендах. Стационарные стенды применяются для испытаний малогабаритного бортового оборудования на ударные нагрузки максимально приближенных к летным условиям при срабатывании средств разделения в штатном закреплении бортового оборудования на РН, РБ или КА. Основными элементами взрывных нагружающих устройств являются специально подбираемые заряды взрывчатого вещества (ВВ) и демпферы, предназначенные для формирования требуемого воздействия на объект испытаний. Задачами моделирования является определение удельного импульса и закона изменения силы во времени, действующих на нагружаемую поверхность стенда.

Диссертантом в первой части главы 4 проведены расчетно-экспериментальные работы по определению свойств используемых материалов демпферов (резина, вспененный полистирол) и их поведению при динамическом нагружении. Определены скорости и профили фронтов ударных волн в материалах при их динамическом нагружении, полученные результаты согласуются с экспериментальными данными.

Во второй части 4 главы проведено моделирование режимов работы типового взрывного нагружающего устройства при различных массах ВВ с использованием моделей материалов демпферов. Получены законы изменения

силы во времени, действующие на нагружаемую поверхность при различных массах взрывчатого вещества.

Новым в данной работе является определение параметров пористого материала в модели $P-\alpha$ и его использование в конструкции демпфера типового нагружающего устройства, что позволяет сформировать требуемый профиль силы во времени и тем самым нагрузить конструкцию стенда в требуемой частотной области.

Автором проведены сложные экспериментальные работы, в которых обоснована возможность использования разработанных моделей для методики моделирования испытательных виброударных режимов нагружения.

В пятой главе изложена методика прогнозирования виброударных режимов на стационарном стенде взрывного действия с использованием моделей импульсного нагружающего устройства. Стенд представляет собой резонатор, выполненный в виде двух металлических плит, соединенных болтовыми соединениями с регулируемым зазором.

На основе существующего виброударного стенда взрывного действия, автором проведен модальный анализ разработанной динамической конечно-элементной модели стенда в сравнении с значениями первых форм колебаний основных составных частей стенда, полученных с использованием аналитических формул и результатов обработки экспериментальных данных - отклика конструкции стенда на импульсное воздействие. По результатам проведенной работы установлены основные элементы конструкции стенда, влияющие на результирующий отклик при его импульсном нагружении.

Предложен способ учета существующего болтового соединения, позволяющий сократить время расчета и учесть напряженно-деформированное состояние в реальной конструкции.

С использованием построенной модели стенда проведена серия численных расчетов для различных вариантов нагружения. Приведены результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных с точки зрения воспроизведения виброударных нагрузок, нормированных по спектру удара.

Проведенная диссертантом работа показала, что с использованием современных расчетных пакетов возможно моделировать сложные динамические процессы отклика конструкции не только в части аппроксимации и сходимости решения, но и в части достоверности получаемых результатов в сравнении с экспериментальными данными и аналитическими формулами. Практика показывает, что отработка режимов нагружения на взрывных стендах занимает значительную часть времени, отведенного на виброударные испытания, и сокращение этого времени возможно при использовании предложенной методики. Выполненная работа представляет особую важность и для выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ как в части исследования процессов распространения волн деформации, так и в части проектирования взрывных стендов.

В то же время, могут быть сделаны следующие замечания:

1. Чем обусловлено применение явного метода интегрирования уравнений движения (данный подход используется на протяжении всей работы), а не использование неявного метода?

2. В диссертации рассматривается вопрос покомпонентного нагружения (вдоль каждой оси - один удар). Целесообразно представить рекомендации по замене однокомпонентного нагружения на одновременное трехкомпонентное нагружение, что реализуется в реальных (летных) условиях.

Несмотря на высказанные замечания, в целом, диссертация Комарова И.С. выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет всем требованиям ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по техническим наукам.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 работах, 3 из которых – в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК.

Автореферат в достаточной мере отражает содержание диссертации.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что Комаров И.С. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – "Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры".

Доктор технических наук, профессор,
начальник отдела открытого
акционерного общества «Ракетно-
космическая корпорация «Энергия»
им. С.П. Королева»
(ОАО «РКК «Энергия»»



С.В.Борzych

141018, г. Мытищи М.О.,

Новомытищинский пр-кт, д. 39, кор.2, кв.40

Телефон: (516) 488-60-57

E-mail: Sergey.Borzykh@rsce.ru

Подпись Борzych Сергея Васильевича заверяю

Ученый секретарь

диссертационного совета ДС.520.001.01,

кандидат физико-математических наук



О.Н.Хатунцева