

На правах рукописи



Комаров Илья Сергеевич

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОУДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ
КОНСТРУКЦИЙ НА СТЕНДАХ ВЗРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРИ
ИМИТАЦИИ НАГРУЗОК ОТ СРАБАТЫВАНИЯ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ
СРЕДСТВ РАЗДЕЛЕНИЯ**

Специальность 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш).

Научный руководитель: доктор технических наук
Фельдштейн Валерий Адольфович

Официальные оппоненты: **Борzych Сергей Васильевич**, доктор технических наук, профессор, начальник отдела открытого акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П.Королева»;

Чепрунова Александра Александровича, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного казенного учреждения 12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации.

Ведущая организация: **Конструкторское Бюро «Салют»** Федерального государственного унитарного предприятия «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева», г. Москва.

Защита состоится «27» апреля 2016 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.05, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета), в зале заседаний Ученого совета МАИ по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте http://www.mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=63951

Автореферат разослан «___» _____ 2016 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Федотенков Г.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Важной составляющей комплексной программы наземной экспериментальной отработки изделий ракетно-космической техники (РКТ) являются автономные испытания бортового оборудования на воздействие виброударных нагрузок от срабатывания пиротехнических средств разделения. При разделении ступеней ракеты-носителя (РН), отделения головного обтекателя, раскрытии солнечных батарей срабатывание пиротехнических устройств сопровождается воздействием на изделие локального интенсивного кратковременного нагружения, разрушением механических связей и распространением по конструкции быстро затухающей волны деформации/ускорения. Виброударные процессы носят локальный характер, отличаются высокой интенсивностью и широким частотным спектром. Они не приводят к изменению скорости центра масс РН или космического аппарата (КА), и, как правило, безопасны для конструкции в целом. Однако динамические перегрузки негативно воздействуют на электронные компоненты бортового оборудования и способствуют нарушению режима их функционирования, что может привести к возникновению нештатных или аварийных ситуаций.

Вопросы отработки бортовой аппаратуры изделий РКТ на широкополосные виброударные нагрузки, вызванные срабатыванием штатных пиротехнических средств разделения в составе РН и космических аппаратов (КА), получили активное развитие, начиная с 80-х годов XX века.

Развитие этого направления в России связано с именами Л.Н. Александровской, В.Е. Баранова, Г.С. Батуева, М.Д. Генкина, А.Ю. Захарова, В.Б. Карпушина, В.И. Комарова, В.И. Круглова, О.В. Кузнецова, А.Ю. Мельниковой, А.Г. Леви, В.С. Пеллинеца, О.С. Покровского, С.Г. Субботина, А.Д. Судомоева, М.Ф. Токарева, К.В. Фролова и др. Среди зарубежных авторов следует особо отметить работы Н.Т. Дэви, В.И. Бэйтмана, А.Г. Пирсола, С.М. Харриса, Д. Дилана, С. Кириенко, Е. Филлипи.

Несмотря на активный интерес к данной проблеме, до сих пор не существует единого подхода к отработке виброударной прочности. Это связано с необходимостью воспроизведения режимов нагружения в амплитудно-частотных диапазонах от 0,1 до 10 кГц, от 100 до 5000 g, что требует разработки и внедрения специализированных стендов взрывного действия, так как такие стенды серийно не выпускаются ни в России, ни за рубежом. Применяемые в практике взрывные устройства и стенды являются уникальными и для своего использования нуждаются в отработке испытательных режимов, что представляет собой сложную и трудоемкую задачу, которая до настоящего времени решалась эмпирически ценой проведения большого объема отладочных испытаний. Одним из путей решения этой задачи и совершенствования методов прочностных испытаний является внедрение в практику наземной отработки изделий РКТ математического моделирования, что, в свою очередь, требует создания научно-методической базы численного моделирования виброударного нагружения конструкций на стендах взрывного действия.

Степень разработанности темы. В настоящее время в России и за рубежом создан ряд уникальных испытательных установок и стендов взрывного действия, реализующих виброударные нагрузки в частотном диапазоне от 0,1 до 10 кГц, при интенсивности от 100 до 5000 г. Первые работы, посвященные попыткам численного моделирования виброударных процессов, относящиеся к 2005-2015г.г., были выполнены за рубежом и относились к установкам простейшего типа “взрывной источник энергии – упругая плита-резонатор”. Отечественные исследования виброударных стендов взрывного действия ограничиваются расчетом рабочих параметров испытательных устройств с использованием приближенных инженерных подходов. Попытки численного моделирования работы виброударного нагружения на взрывных стендах отсутствуют, тогда как численный анализ режимов нагружения при статическом и вибрационном нагружении получил существенно широкое распространение.

Цель диссертационной работы:

- совершенствование прочностной отработки изделий ракетно-космической техники путем внедрения численного моделирования в практику наземной имитации виброударного нагружения от срабатывания пиротехнических средств разделения с использованием стационарных виброударных стендов и устройств локального нагружения взрывного действия.

Задачи диссертационной работы:

- разработка методик численного моделирования виброударных нагрузок на конструкции и бортовое оборудование ракет-носителей и космических аппаратов при их воспроизведении с помощью стационарных виброударных стендов и устройств локального нагружения взрывного действия;

- экспериментальное обоснование использования методик численного моделирования для прогнозирования испытательных режимов, реализуемых с помощью стационарных виброударных стендов и мобильных устройств взрывного действия применительно к отработке прочности и проверке функционирования бортовых систем ракет-носителей и космических аппаратов.

Научная новизна работы:

- впервые разработана и экспериментально обоснована методика расчета параметров нагрузок, создаваемых пороховыми зарядами в устройствах локального виброударного нагружения, на основе предложенного способа идентификации параметров, используемых в уравнении состояния пороха, по известным энергетическим и геометрическим характеристикам;

- впервые разработана и экспериментально обоснована методика расчета параметров ударных нагрузок, реализуемых виброударными стендами взрывного действия, при использовании зарядов взрывчатого вещества с демпфирующими элементами;

- впервые разработана и экспериментально обоснована методика численного моделирования и прогнозирования испытательных режимов, реализуемых устройствами локального нагружения и стационарными стендами взрывного действия, при отработке прочности конструкций и бортового оборудования ракет-

носителей и космических аппаратов на воздействие виброударных нагрузок от срабатывания пиротехнических средств разделения.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- результаты выполненных исследований позволили разработать методики численного моделирования виброударных нагрузок на конструкции и бортовое оборудование ракет-носителей и космических аппаратов при их воспроизведении с помощью стационарных виброударных стендов и устройств локального нагружения взрывного действия.

- использование методик на практике сократит затраты на проведение отладочных испытаний, повысит достоверность и информативность экспериментальных результатов. Методики могут быть использованы при разработке нормативных требований по виброударной прочности изделий РКТ.

- результаты работы, приведенные в диссертации, применяются в настоящее время и будут использованы в дальнейшем для проведения испытаний изделий разработки ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», ОАО «РКК «Энергия», АО «ГРЦ Макеева», ОАО «Конструкторское бюро химавтоматики», ФГУП «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева», АО «Корпорация «МИТ» и других предприятий ракетно-космической промышленности.

Методология и методы исследований. В работе использованы:

- численные методы решения задач динамики сплошной среды, использующие уравнения состояния материалов при высокоинтенсивном ударно-волновом нагружении, теоретические основы горения порохов и детонации взрывчатых веществ;

- экспериментальные методы создания виброударных нагрузок с использованием взрывных источников энергии;

- методы регистрации, обработки и анализа параметров быстропротекающих процессов (ускорения, скорости, давления).

Положения, выносимые на защиту:

- методики и экспериментальное обоснование численного моделирования нагрузок, реализуемых испытательными устройствами локального нагружения при отработке прочности конструкций и бортового оборудования ракет-носителей и космических аппаратов на воздействие виброударных нагрузок от срабатывания пиротехнических средств разделения;

- методики и экспериментальное обоснование численного моделирования нагрузок, реализуемых стационарными виброударными стендами взрывного действия, при отработке прочности конструкций и бортового оборудования ракет-носителей и космических аппаратов на воздействие виброударных нагрузок от срабатывания пиротехнических средств разделения.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов подтверждена использованием классических соотношений теорий горения, взрыва, пластин и оболочек, обоснованным применением апробированных программных продуктов, экспериментальным подтверждением результатов численного моделирования.

Апробация работы. Результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на отраслевых и всероссийских конференциях, в том числе:

- на отраслевой научно-технической конференции «Молодежь в ракетно-космической отрасли» (ЦНИИмаш, сентябрь 2009 г.);
- на 52-ой научной конференции МФТИ (МФТИ, ноябрь 2009 г.);
- на семинаре «Проблемы математического моделирования при создании и эксплуатации ракетно-космической техники» (ИКИ-РАН, декабрь 2009 г.);
- на научно-технической конференции «Измерения и испытания в ракетно-космической промышленности» («ФГУП ЦЭНКИ», октябрь 2010 г.);
- на Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2013» (МАИ, апрель 2013 г.);
- на 4-ой всероссийской научно-технической конференции «Измерения и испытания в ракетно-космической промышленности» (ФГУП ЦНИИмаш «Дом отдыха «Селигер», сентябрь 2015 г.).

Личный вклад автора заключается:

- в непосредственном участии в получении исходных данных, разработке и реализации методик моделирования, получении и обработке результатов исследований, подготовке основных публикаций и личных выступлениях с докладами по выполненной работе;

- в разработке способа идентификации параметров, используемых в уравнении состояния пороха, по известным энергетическим и геометрическим характеристикам для численного расчета ударных нагрузок, создаваемых пороховыми зарядами в устройствах локального нагружения;

- в разработке модели нагружающего устройства с зарядами взрывчатого вещества и демпфирующими элементами для численного расчета параметров нагружающего устройства виброударного стенда;

- в верификации и валидации методик численного моделирования виброударных нагрузок на конструкции и бортовое оборудование ракет-носителей и космических аппаратов, реализуемых устройствами локального нагружения и стационарными стендами взрывного действия;

- в разработке научно-методических основ совершенствования методов прочностных испытаний конструкций и бортового оборудования ракет-носителей и космических аппаратов на воздействие виброударных нагрузок от срабатывания пиротехнических средств разделения на базе численного моделирования и прогнозирования испытательных режимов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ из них 3 в журналах перечня ВАК [5,6,8].

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 142 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы из 78 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, излагаются цели и задачи работы, новизна и практическая значимость результатов, полученных в процессе проведения экспериментально-теоретических работ.

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.

Пиротехнические устройства широко применяются в ракетно-космической технике в качестве основных элементов систем разделения. Источником энергии средств разделения (СР) являются заряды взрывчатого вещества (ВВ) и/или пороховые навески, инициирование которых приводит к разрушению механических связей и, как следствие, к динамическому локальному воздействию на конструкцию импульсной нагрузки. Воздействия нагрузок от пиротехники, как правило, редко сопровождаются значительными повреждениями или разрушениями несущей конструкции, однако могут быть причиной отказов и/или разрушения электронных, оптических, механических элементов приборов и бортового оборудования [1].

Для обеспечения надежности создаваемых изделий РКТ в соответствии с действующими нормативными документами предусмотрена их полная наземная экспериментальная отработка (НЭО), в том числе испытания на воздействие виброударных нагрузок, включая автономные испытания отдельных элементов конструкции и бортового оборудования, функциональные испытания штатных СР в составе опытных сборок и зачетные ударные испытания крупногабаритных динамических макетов натурального изделия [1].

Виброударная нагрузка на входе (интерфейсе) объекта испытаний характеризуется максимальной амплитудой ускорения (m/s^2) или перегрузкой (g), полосой частот и длительностью воздействия. В настоящее время существует ряд экспериментальных средств отработки элементов изделий РКТ на виброударные нагрузки. Анализ литературных источников позволяет провести условную классификацию стендов по принципу их работы:

- бросковые стенды;
- электродинамические вибростенды;
- маятниковые (пневматические, баллистические) стенды;
- стенды взрывного действия;
- взрывные устройства локального нагружения.

Из представленного перечня, виброударные нагрузки в диапазоне от 100 Гц до 10 кГц и амплитудой до 10 000 g, в соответствии с требованиями нормативных документов, могут быть воспроизведены только с использованием стендов и устройств локального нагружения взрывного действия.

Стенд взрывного действия состоит из одной или нескольких плит-резонаторов прямоугольной формы [2,3,6], на которые устанавливается объект испытаний,

иногда через специальный адаптер (Рисунок 1). Плиты с объектом испытаний вывешиваются на тросах. Важнейшей характеристикой резонаторов являются их собственные частоты и формы колебаний, так как от них зависит ударный спектр воспроизводимой нагрузки

В последнее время получают распространение устройства локального нагружения (УЛН) – генераторы ударных импульсов, состоящие из зарядного устройства, ствола и разгоняемого в нем ударника, который, приобретя заданную скорость, ударяет через демпфер в испытываемую сборку или в резонирующую конструкцию (Рисунок 2) [4,5,6]. Ускорение ударника осуществляется с использованием пороховых или взрывных газов. Для регулирования параметров нагрузки на объект испытаний специально выбираются параметры демпфера – формирователи ударного импульса.

Наиболее перспективным представляется применение устройств локального нагружения при испытаниях летных изделий, где невозможно применение штатных средств разделения; кроме того, это позволяет провести квалификационные испытания на расчетные нагрузки, определяемые с учетом коэффициента безопасности.

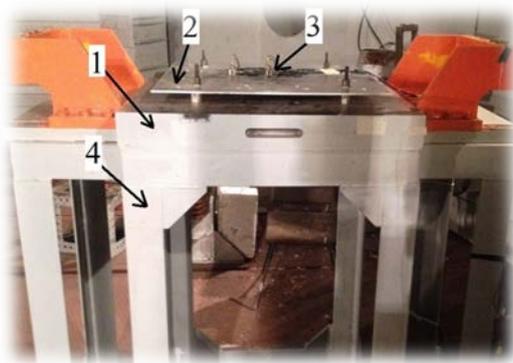


Рисунок 1 – Ударный стенд взрывного типа: 1 – стальная плита; 2 – алюминиевая плита; 3 – место установки объекта испытаний; 4 – каркас стенда

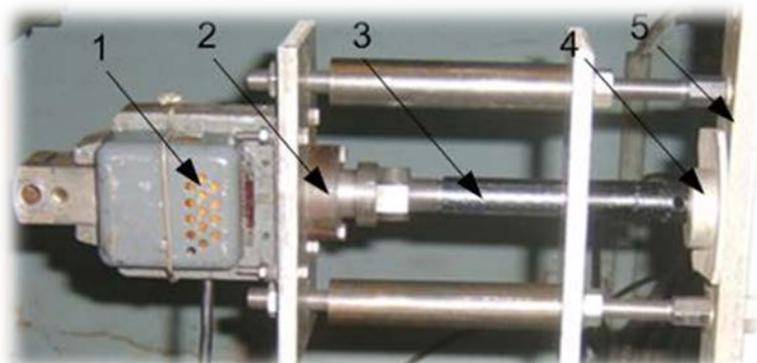


Рисунок 2 – Устройство локального нагружения: 1 – устройство инициирования патронов; 2 – казенник под патрон; 3 – ствол с подвижным поршнем-ударником; 4 – демпфер; 5 – нагружаемая конструкция

Для количественного описания виброударной нагрузки используют ударный спектр (УС): огибающую максимальных относительных ускорений \dot{Y} системы несвязанных осцилляторов при заданном переносном ускорении платформы \ddot{X} . Независимой переменной для УС является собственная частота осциллятора; при расчете УС принимается, что коэффициент усиления на резонансной частоте (добротность), не зависит от частоты осциллятора. Ударные спектры являются обобщением результатов наземных и летных испытаний, поэтому они задаются с определенным допуском, определяемым как предельно допустимая погрешность воспроизведения нормируемого виброударного воздействия.

Необходимой составляющей НЭО является определение виброударных нагрузок для вновь создаваемых изделий и их формализация в терминах УС. Для этого используют следующие подходы:

- испытания опытных сборок с реальными пиросредствами и регистрацией виброударных ускорений;
- метод подобия на основе существующих данных об изделиях и экспериментальных данных;
- аналитические методы с использованием численного моделирования.

Предметом диссертации являются методы численного моделирования для оценки уровней виброударных нагрузок при имитации виброударных нагрузок взрывными испытательными устройствами. Для этого необходимы математические модели и методики численного моделирования, стадии разработки и необходимые элементы которых иллюстрирует блок-схема представленная на рисунке 3.

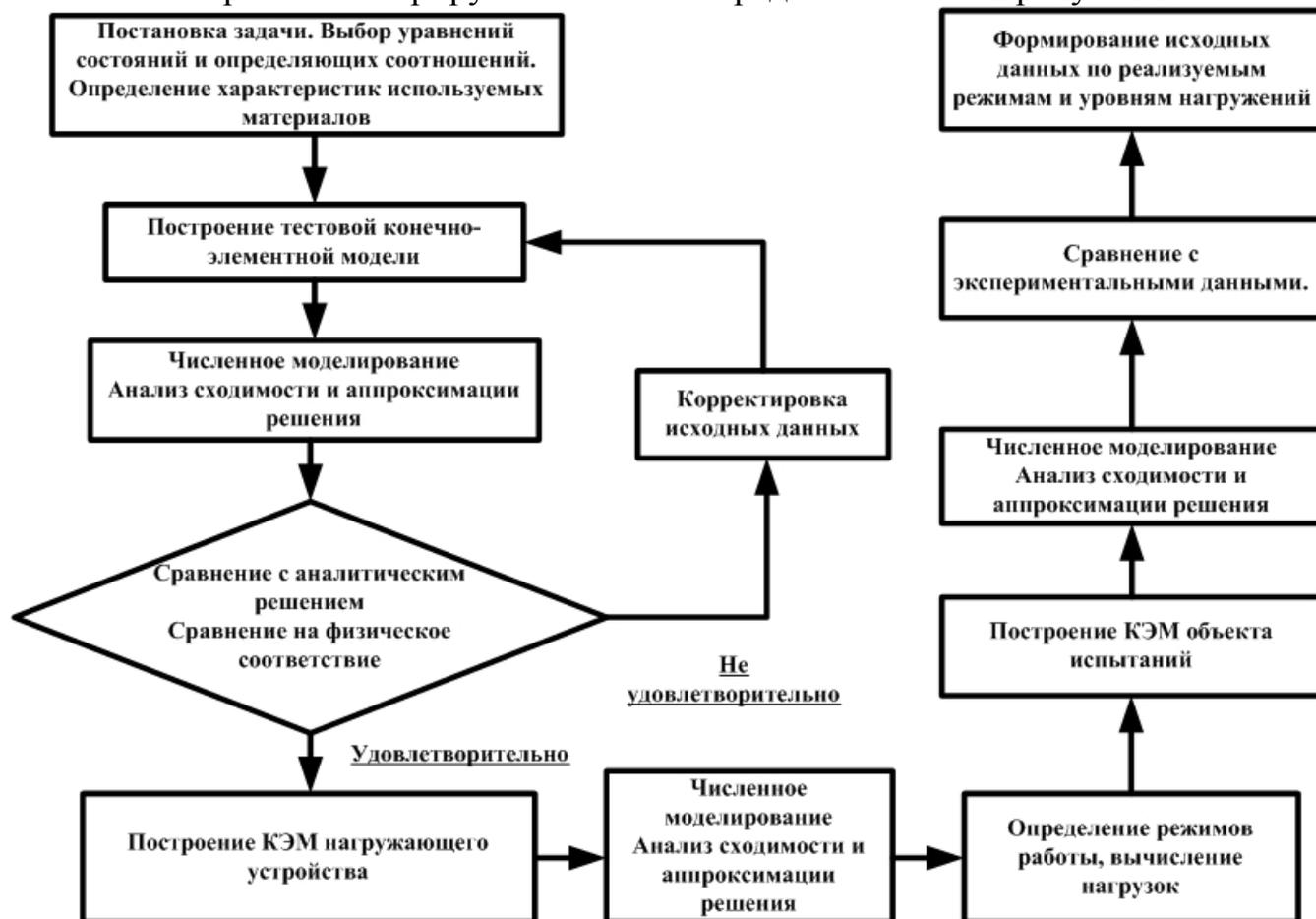


Рисунок 3 – Процесс разработки методик численного моделирования

Во второй главе излагается методика численного моделирования функционирования взрывного устройства локального нагружения, которое по принципу действия может быть отнесено к пороховым баллистическим установкам. Математическое описание процессов горения пороха и ускорения ударника является сложной задачей, однозначное решение которой с применением численного моделирования требует оснащения расчетной модели комплексом физических характеристик. Математические модели в зависимости от поставленной задачи оперируют различными входными параметрами и требуют соответствующих методов решения. Так, при исследовании периода воспламенения, конвективного горения или межфазного взаимодействия необходимо применение методов механики гетерогенных сред, а для оценки дульной скорости снаряда достаточно

геометрического закона образования пороховых газов. Предложен способ расчета характеристик горения пороха и образования пороховых газов, используемых при численном моделировании, на основе стандартных табличных данных, определяемых для элементарных элементов типовых пороховых зарядов, используемых в геометрической модели. Предложенная методика пересчета позволила связать табличные данные элементарных пороховых элементов, типовых зарядов и входные параметры модели горения [7,8].

Процесс горения порохов включает в себя три фазы:

- зажжение, или начало горения, в результате внешнего теплового воздействия;
- воспламенение – процесс распространения пламени по поверхности порохового элемента;
- собственно горение – распространение фронта горения вглубь порохового элемента.

Использована двухфазная модель горения пороха (твердое вещество – газ) на основе физического закона горения в форме Шарбонье и образования пороховых газов на основе экспоненциального закона, позволяющая моделировать горения пороховых элементов сложной формы (шар, куб, перфорированное 7-канальное зерно).

Для физического обоснования предложенной модели горения пороха проведено численное моделирование метания алюминиевой частицы на пороховой баллистической установке (БУ). На рисунке 4 представлена расчетная область математической модели БУ. Для иллюстрации результатов расчетов на рисунке 5 показано распределение давления в стволе БУ в момент времени $t=1,919$ мс



Рисунок 4 - Расчетная область БУ

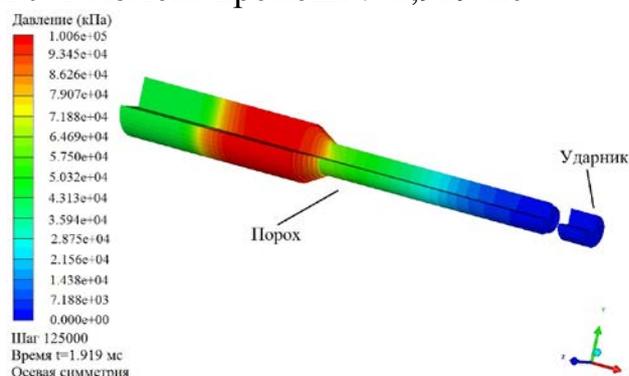


Рисунок 5 - Распределение давления в казенной части и стволе БУ $t=1,919$ мс с момента начала горения пороха

Для физического обоснования предложенной модели горения пороха проведена серия из 10 экспериментов на баллистической установке, где продукты горения толкают ударник по стволу, соединенному с казенной частью. По результатам экспериментов, построена средняя по реализациям зависимость давления от времени в казенной части ствола $P_{ave}(t)$ и определен доверительный интервал $P_{ave}(t) \pm \Delta P$ по уровню вероятности 0,95. В таблице 1 и на рисунке 6 приведены результаты валидации модели на основе сравнения зависимости

давления от времени в камере БУ и скорости ударника на выходе из ствола, полученных расчетным и экспериментальным путем.

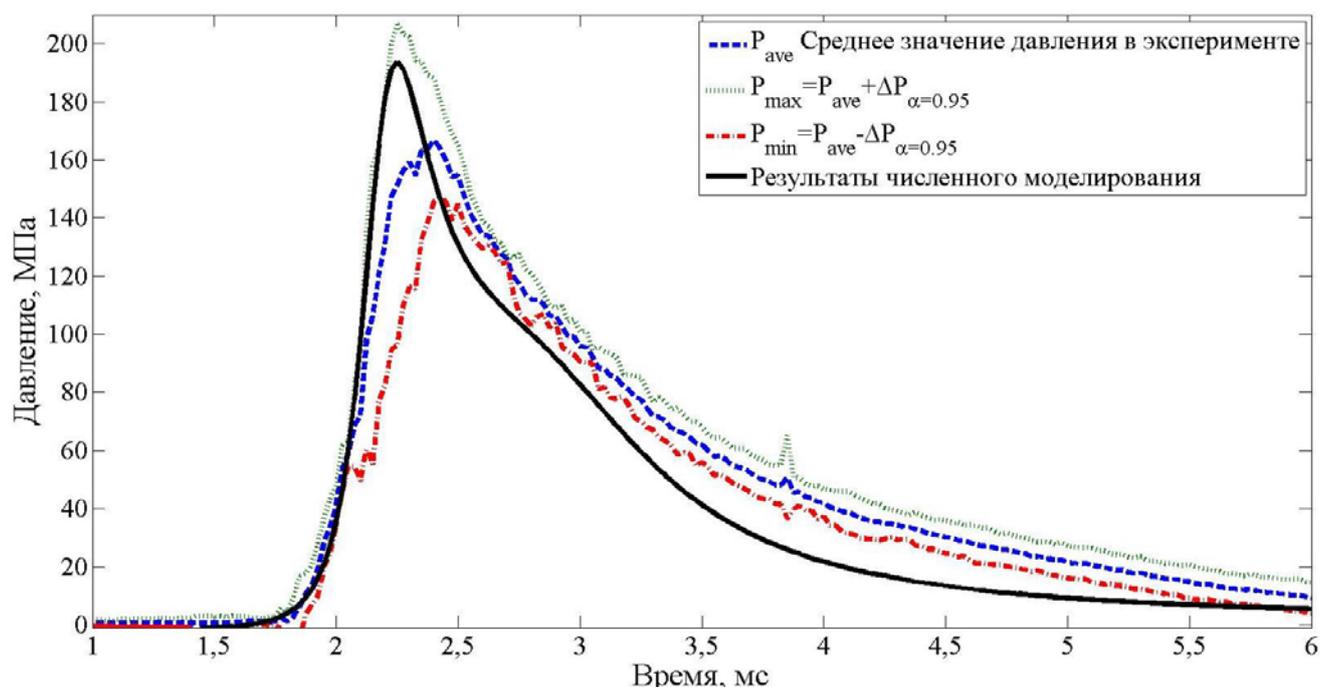


Рисунок 6 – Зависимости давления от времени (расчет и эксперимент)

Таблица 1 – Средние значения результатов испытаний на БУ

Испытание на БУ	Масса пороха, г	Масса ударника, г	Скорость ударника, м/с	Максимальное давление, МПа
Эксперимент (средние значения)	32	5,2	1736	170
Численное моделирование	32	5	1757	192

Для определения эксплуатационных режимов устройства локального нагружения по предложенной методике пересчета были определены константы для модели горения пороха в случае использования патронов Д1-Д4. Разработана математическая модель устройства локального нагружения (Рисунок 7), проведено численное моделирование процесса горения пороха и движения ударника по стволу (Рисунок 8).

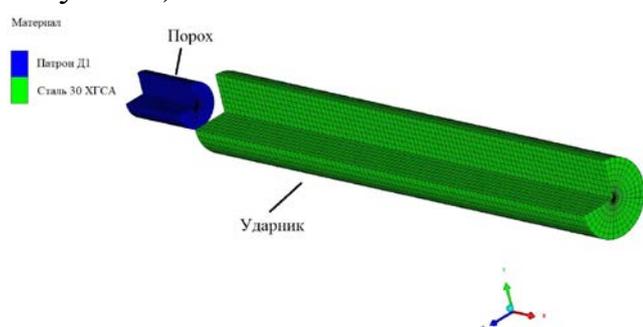


Рисунок 7 – Конечно-элементная модель УЛН

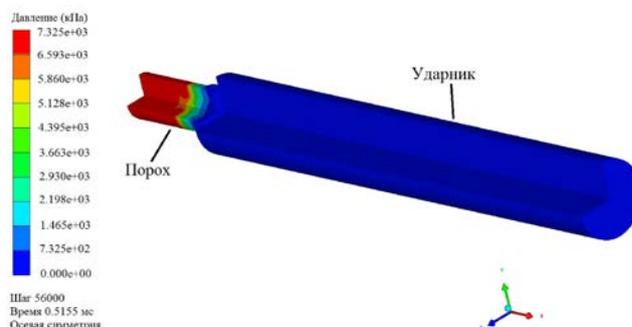


Рисунок 8 – Распределение давления в казенной части и стволе УЛН $t=0,5155$ мс с момента начала горения пороха

На рисунке 9 представлены результаты численного расчета скорости ударника в стволе УЛН при использовании патронов Д1-Д4.

Результаты определения скорости ударников в конструкции УЛН далее использованы при численном моделировании ударно-волнового нагружения типовой конструкций РКТ, при имитации срабатывания штатных систем разделения

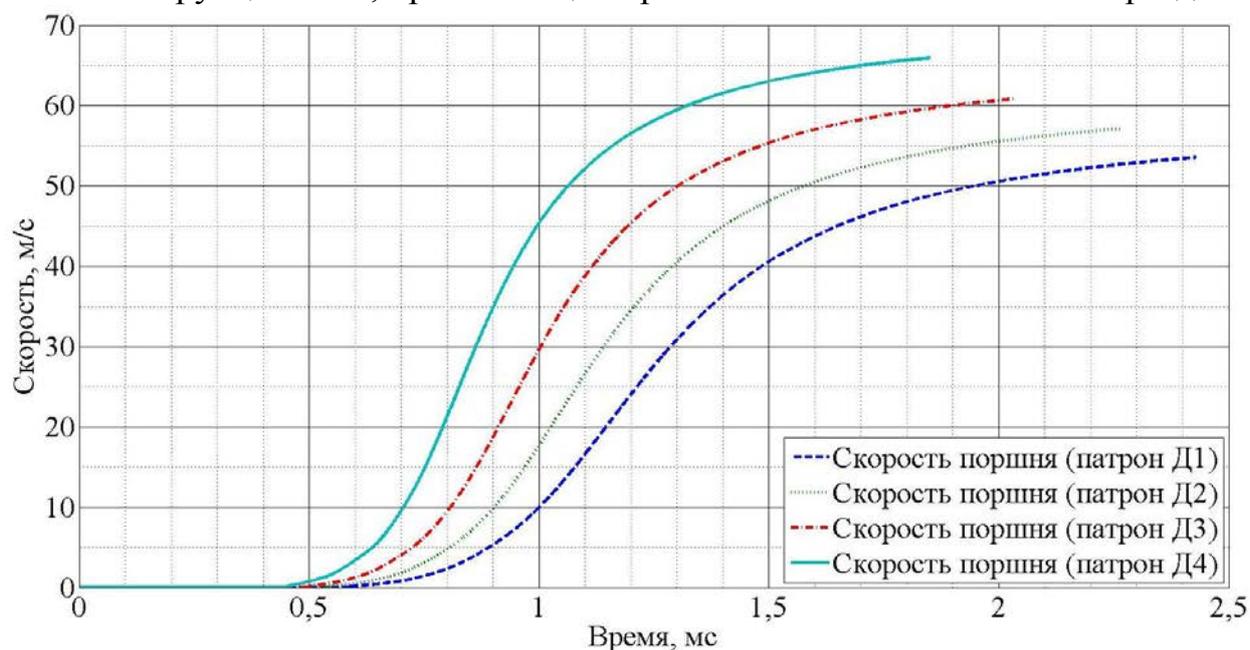


Рисунок 9 – Скорость поршня в стволе для патронов Д1-Д4

В третьей главе представлены результаты численного и экспериментального моделирования виброударного нагружения фрагмента бака РН [4,5], имитирующего срабатывание пиротехнических средств разделения, с использованием исходных данных по скоростям ударника – подвижного штока, полученных в главе 2. Численное моделирование виброударного нагружения фрагмента бака РН разделяется на два этапа:

- решается задача ударно-волнового взаимодействия ударника с демпфирующим элементом и определяется силовое воздействие $F(t)$ в узле крепления штатного средства разделения;

- полученное силовое воздействие $F(t)$ используется как исходная нагрузка для моделирования виброударного нагружения типовой конструкции - бака РН на основе конечно-элементной модели (КЭМ).

Важным элементом механического ударного устройства, формирующего величину и длительность создаваемой нагрузки, является демпфер, состоящий из резиновых и алюминиевых прослоек, которые в процессе удара испытывают гиперупругие и упругопластические деформации. Определяющие уравнения для металлических элементов (стального ударника и алюминиевых частей демпфера) комбинируются на основе соотношений модели пластичности Джонсона–Кука для девиаторов напряжения и уравнения состояния Ми–Грюнайзена для объемного сжатия. Поведение резины описывается на основе модели гиперупругого материала с потенциалом энергии деформации в форме Арруда-Бойса. Решение осуществляется методом конечных элементов (МКЭ) с использованием конечных элементов (КЭ) изопараметрического типа с кубическими функциями формы.

Используемые КЭ относятся к элементам первого порядка с редуцированной схемой интегрирования, позволяющие сократить время расчета и исключить нефизическое поведение - "запирание" элемента в случае слабо сжимаемой резины.

На первом этапе проводились расчеты ударно-волнового процесса. Расчетная область и КЭМ с плоскостью симметрии XOZ представлена на рисунке 10 и включает в себя: стальной ударник, алюминиевый демпфер, резиновый демпфер, фрагмент алюминиевой нагружаемой оболочки (торцевой шпангоут) и алюминиевый куб для крепления акселерометра. Контактное взаимодействие между резинометаллическим демпфером и фрагментом конструкции (торцевым шпангоутом), а также между элементами демпфера моделируется с использованием метода жесткого контакта для нормальной компоненты (вдоль линии удара)) и изотропной модели трения Кулона для касательной компоненты. Отбрасываемая часть торцевого шпангоута и оболочки, находящихся вне расчетной области, заменяется на "полубесконечные" элементы, для которых значение импеданса на свободной границе элемента равняется импедансу материала, что обеспечивает отсутствие отраженной волны.

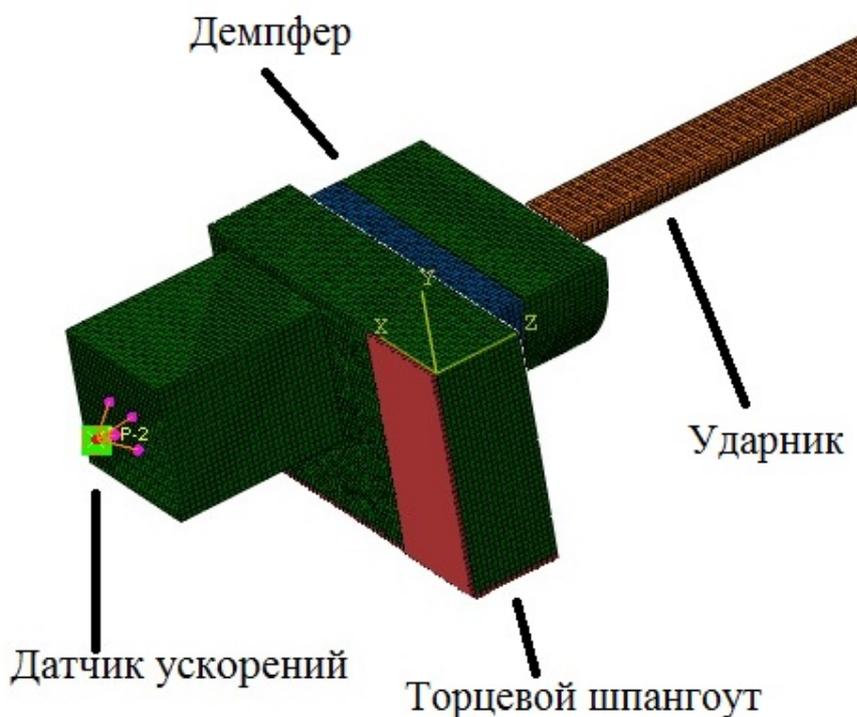


Рисунок 10 – Конечно-элементная модель механического ударника с фрагментом нагружаемой оболочки: конфигурация $t=0$ мс.

Для обоснования расчетной методики проведены эксперименты по определению уровней виброускорений на внутренней стороне торцевого шпангоута под местом удара. На рисунке 11 представлены результаты расчета и экспериментальные данные для скорости ударника 50 м/с. В начале процесса наблюдается хорошее соответствие результатов численного моделирования и эксперимента. Последующее расхождение обусловлено идеализированной конечно-элементной моделью, в которой не учитывается демпфирование материала нагружаемой оболочки.

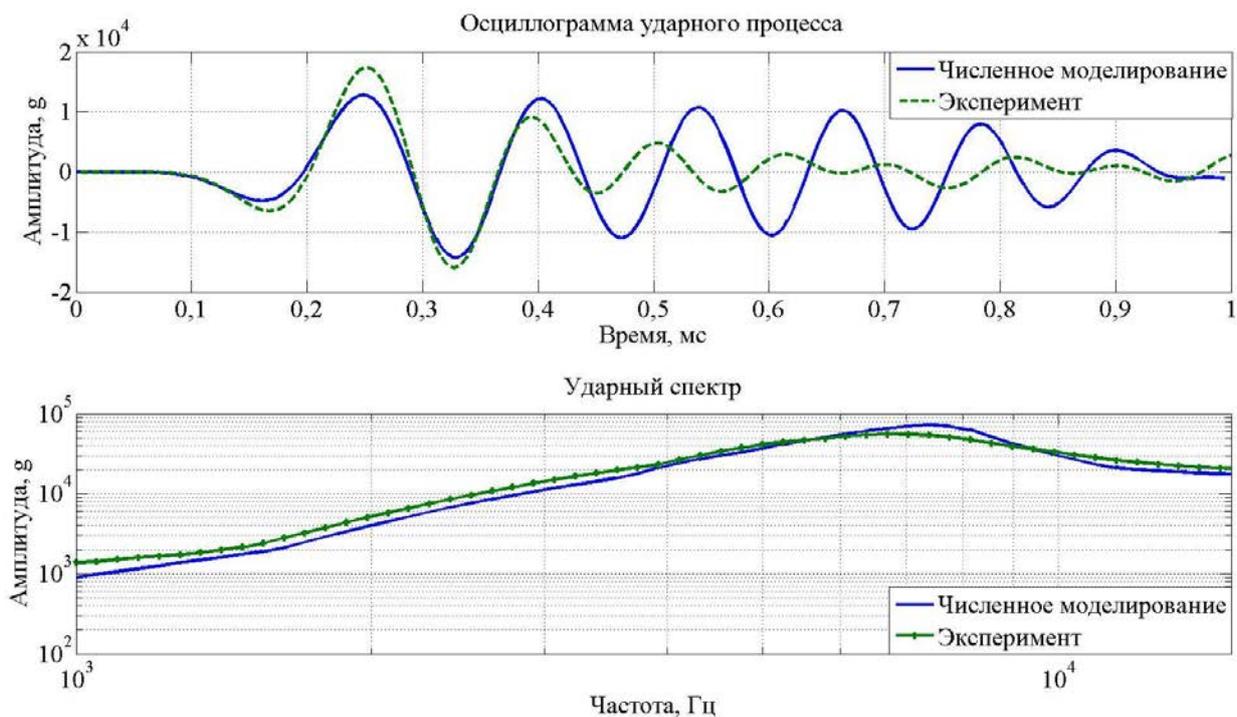


Рисунок 11 – Осциллограмма процесса в точке RP-2 и ударный спектр для первого этапа расчета

Поскольку активная фаза взаимодействия ударника с демпфером и, соответственно, нагружение оболочки составляет менее 0,3 мс, дальнейшее расхождение расчета с экспериментом не влияет на точность моделирования на втором этапе. Полученные параметры виброускорений использовались как исходные данные для моделирования виброударного нагружения на оболочечную конечно-элементную модель (КЭМ) бака РН (Рисунок 12).

Моделирование динамического отклика конструкции на примере бака РН осуществлялось с использованием МКЭ. Помимо КЭ сплошной среды, в расчете использовались КЭ изопараметрического типа, использующие допущения теории оболочек Кирхгофа-Лява. Шаг конечно-элементной сетки (аппроксимация) выбирался из расчета не менее четырех КЭ на длину волны изгиба, соответствующую максимальной значимой частоте исследуемого процесса, которая при характерной частоте $f_{ch} \approx 10$ кГц не превышает $\lambda_{ch} \approx 70$ мм. Таким образом, характерный размер расчетного элемента для тонкостенной части бака РН – 10 мм. Физико-механические характеристики материала бака принимались стандартными для сплава АМг-6, расчет проводился с использованием упругой модели материала. На рисунке 13 представлены результаты численного моделирования отклика бака РН на динамическую нагрузку $F(t)$, характерную для режимов, воспроизводимых УЛН совместно с резинометаллическим демпфером.

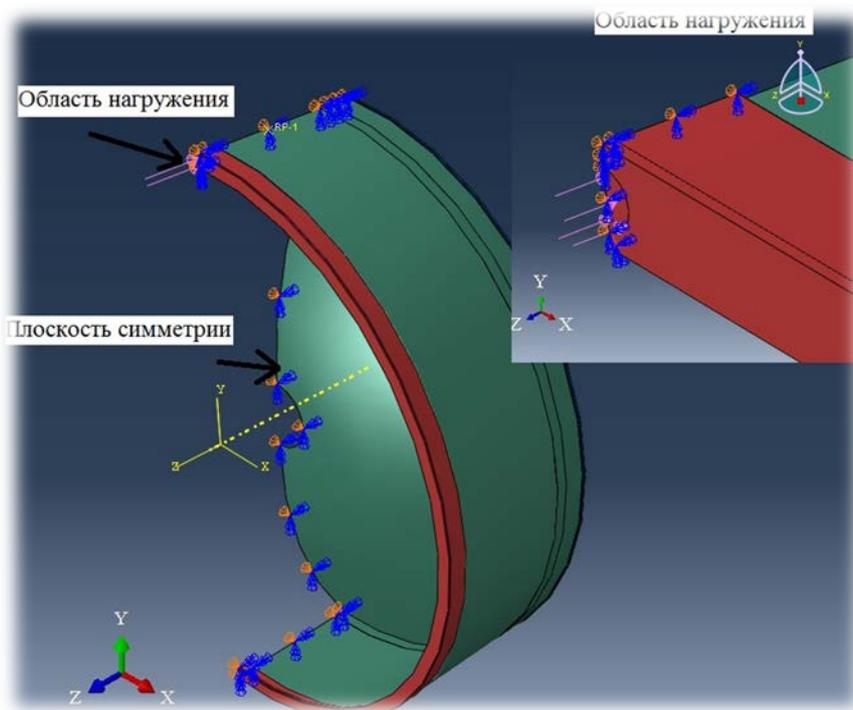


Рисунок 12 – Конечно-элементная модель бака РН

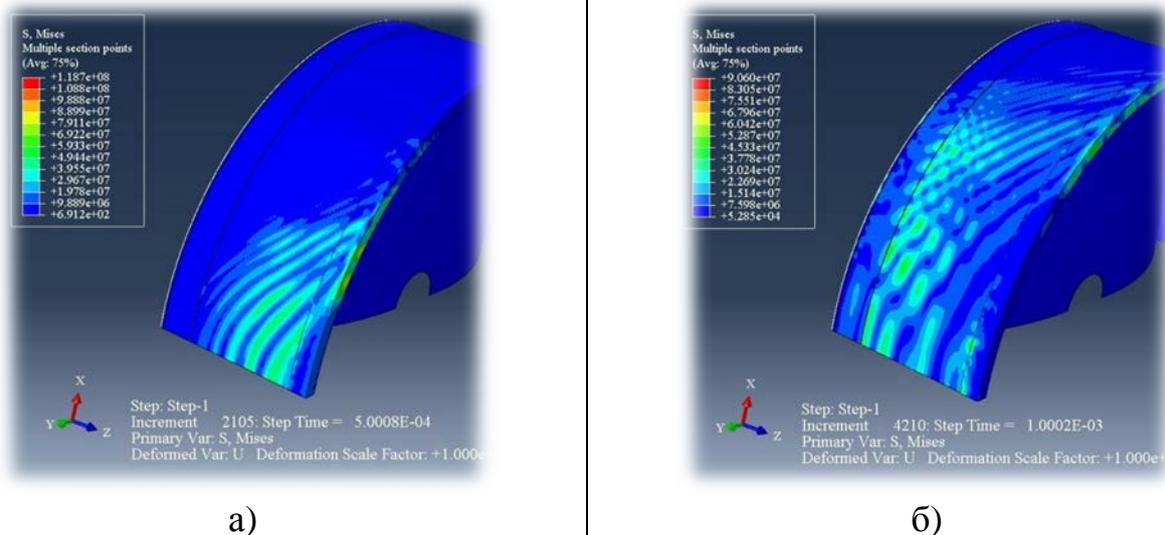
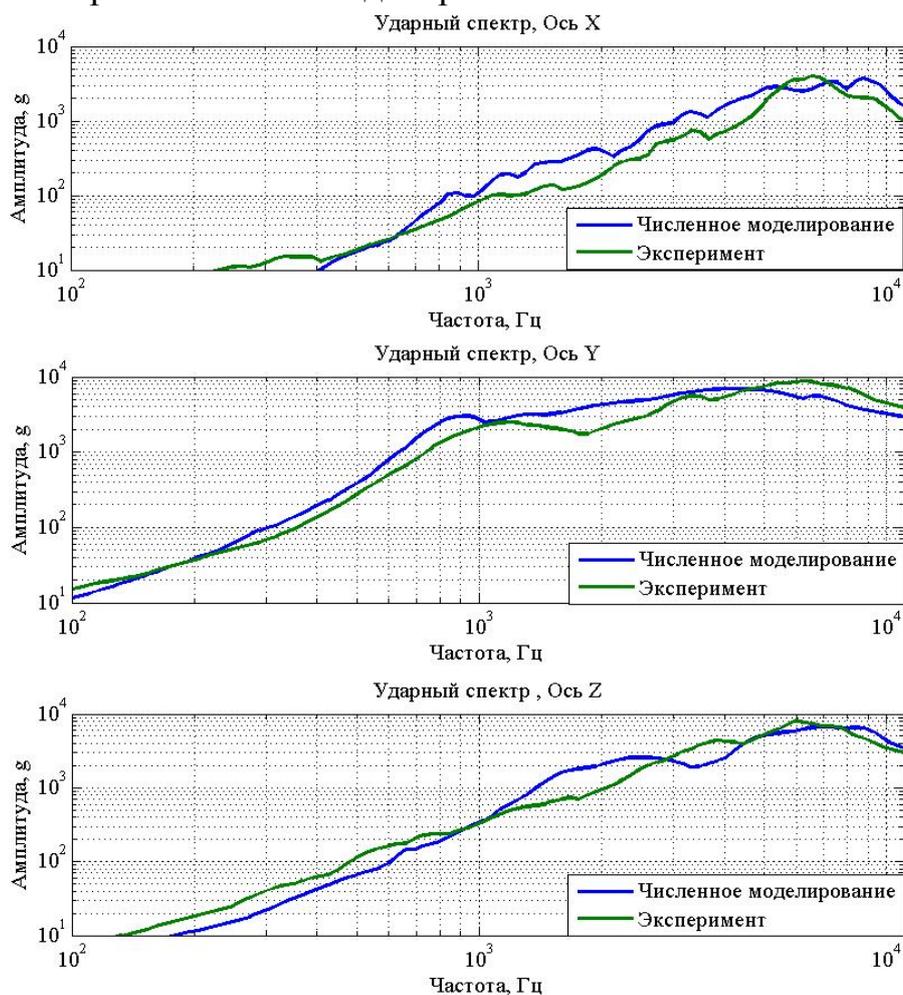


Рисунок 13 – Конечно-элементная модель бака РН. Результаты расчета для $t=0,5$ мс (а) и 1 мс (б)

С целью подтверждения точности и достоверности результатов, получаемых с использованием разработанной методики, проведены испытания на экспериментальной сборке в составе: динамическая модель бака РН, устройство локального нагружения, резинOMETаллический демпфер. Для ускорения поршня-ударника в УЛН использовался индустриальный патрон Д1. Регистрация виброударного ускорения осуществлялась с использованием ортогональной розетки датчиков виброударных ускорений типа РСВ М350В23 совместно с информационно-измерительной системой на базе модулей NI PXIe-4496. Розетка датчиков устанавливалась на монтажный куб, который крепился к внешней поверхности оболочки бака РН. Частота опроса составляла 50 кГц, длительность регистрируемого процесса 2 с.

На рисунке 14 представлены графики ударных спектров нагрузки полученные в эксперименте и при численном моделировании.



Рисунке 14 – УС при численном моделировании и в эксперименте

Следует отметить наличие экстремальных значений ускорений в окрестности 1 и 7 кГц, что достаточно хорошо соответствует характерным пикам УС в условиях эксперимента.

В четвертой главе рассмотрено численное моделирование взрывных нагружающих устройств, применяемых в стационарных стендах. Основными элементами этих устройств являются специально подбираемые заряды взрывчатого вещества (ВВ) и демпферы, предназначенные для формирования воздействия на объект испытаний. Задачами моделирования является определение удельного импульса и закона изменения силы во времени, действующих на нагружаемую поверхность стенда. Типовая конструкция нагружающего устройства, используемая при испытаниях на виброударном стенде взрывного действия, включает в себя: листовое ВВ и демпфер из резины (типа ТМКЩ) и вспененного полистирола (ПС-1-200) [7]. В расчете взрывного нагружения использован метод сглаженных частиц (SPH), что обусловлено его высокой точностью моделирования распада-разрыва на фронте детонационной волны по сравнению с сеточными методами.

Для описания процессов детонации ВВ и разлета продуктов взрыва используется полуэмпирическое уравнение состояния продуктов детонации в форме

Джонса-Вилкинса-Ли (JWL). Для описания процессов динамического сжатия и распространения ударных волн в пористых материалах применяется уравнение состояния в форме $P-\alpha$. Характеристики полимерных материалов в условиях высоких скоростей деформаций претерпевают изменения; так у резины, практически несжимаемой в статике, при ударном нагружении коэффициент Пуассона снижается с 0,4998 до 0,36, поэтому при расчете ударно-волнового нагружения резины учитывалось объемное сжатие на основе уравнения состояния в форме Ми-Грюнайзена.

Физическое обоснование (валидация) используемых методов моделирования и выбранных уравнений состояний осуществлялось путем сравнения расчетных значений профилей скоростей фронтов ударных волн с экспериментальными данными. Экспериментальная сборка представляла собой пакет из слоя вспененного полистирола толщиной 13 мм, слоя резины ТМКЩ толщиной 10 мм и слоя листового ВВ толщиной 1,5 мм (Рисунок 15). В процессе испытаний, на системе измерений (СИ) регистрировалась скорость V движения рамок (красные линии на рисунке 15) в магнитном поле B . На рисунке 16 представлены результаты численного расчета и экспериментальные данные, полученные для одного и того же пакета материалов. Процесс движения поверхности контакта резины и полистирола совпадает с расчетными данными. Из-за недостаточной разрешающей способности систем измерения для графика скорости фронта ПС-1-200 в эксперименте было получено превышение сигнала и этим объясняется прямая линия на графике в момент времени 35 мкс.

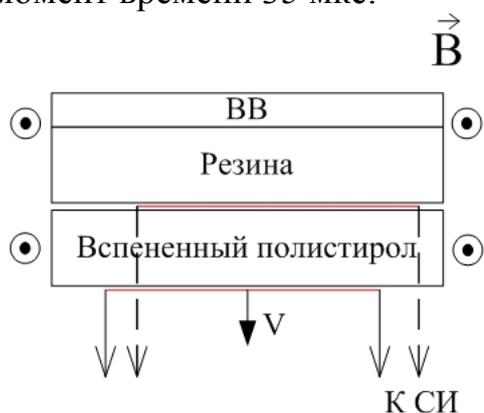


Рисунок 15 –
Экспериментальная сборка

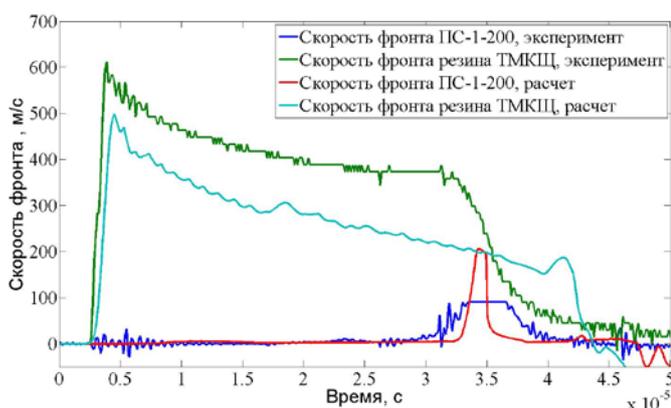


Рисунок 16 – Изменение скорости фронта волны в отдельных материалах демпфера (расчет и эксперимент)

Полученные результаты свидетельствует о достаточной точности предложенной методики: конечно-элементной аппроксимации расчетной области, моделей материалов, исходных данных по физико-механическим свойствам материалов, а также дают оценку точности моделирования.

Следующий этап валидации – сравнение законов изменения давления, сообщаемого нагружаемой поверхности, в расчете и эксперименте. Схема эксперимента представлена на рисунке 17. Для регистрации давления использовались манганиновые датчики P1 и P2, питаемые от импульсного источника питания напряжением 400 В. Датчики располагались вдоль направления

распространения фронта детонационной волны. В качестве нагружаемой поверхности использовалась плита из полистирола. Датчики давления устанавливались между двумя образцами из полистирола для предотвращения короткого замыкания при запитывании датчика и для беспрепятственного прохождения ударной волны сквозь сборку с целью минимизации интерференции волн.

Численное моделирование ударно-волнового нагружения пакета материалов осуществлялось с использованием МКЭ и метода сглаженных частиц. Для полистирола использовалось уравнение состояния в форме Ми-Грюнаизена в сочетании с моделью пластичности Мизеса. На рисунке 18 представлено сравнение амплитуды и профиля давления, полученных в расчетах и эксперименте для датчика давления P2.

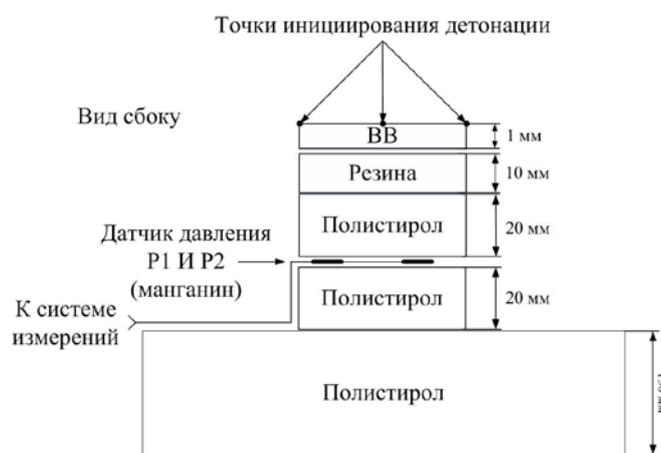
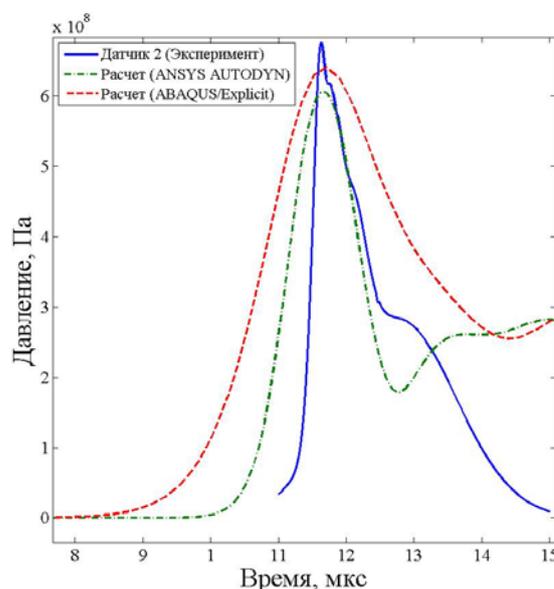


Рисунок 17 - Экспериментальная сборка



Рисунке 18 - Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных

В результате проведенных расчетных и экспериментальных работ была получена оценка точности разработанной методики, подтверждающая возможность использования ее для расчета импульсных устройств и определения результирующей силы, сообщаемой нагружаемой поверхности стенда при использовании накладного заряда ВВ.

Типовое взрывное устройство состоит из слоев вспененного полистирола ПС–1–200 толщиной 10 мм, резины типа ТМКЦ толщиной 10 мм и взрывчатого вещества толщиной 1,5 мм (Рисунок 19). Устройство устанавливается в нагружающую камеру виброударного стенда диаметром 50 мм.

Целью моделирования являлось определение среднего давления - P_{ave} и импульса силы - I_F , сообщаемого нагружаемой поверхности, в области контакта вспененного полистирола и поверхности стенда. Результаты расчета через $t=15$ мкс после инициирования заряда ВВ приведены на рисунке 20.

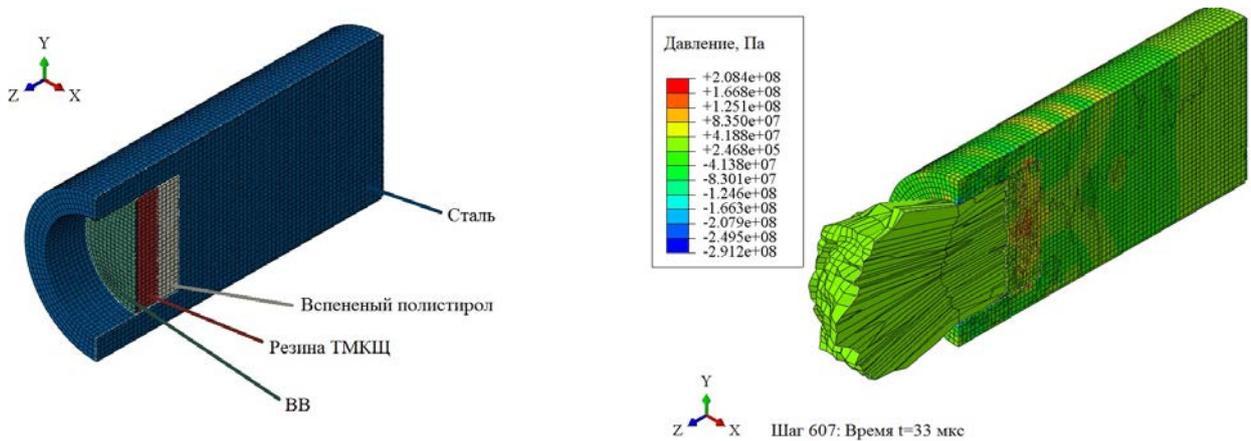


Рисунок 19 – КЭМ импульсного устройства

Рисунок 20 – Давление в момент времени $t = 33$ мкс

На рисунке 21 представлены зависимости силы от времени для различных масс заряда ВВ.

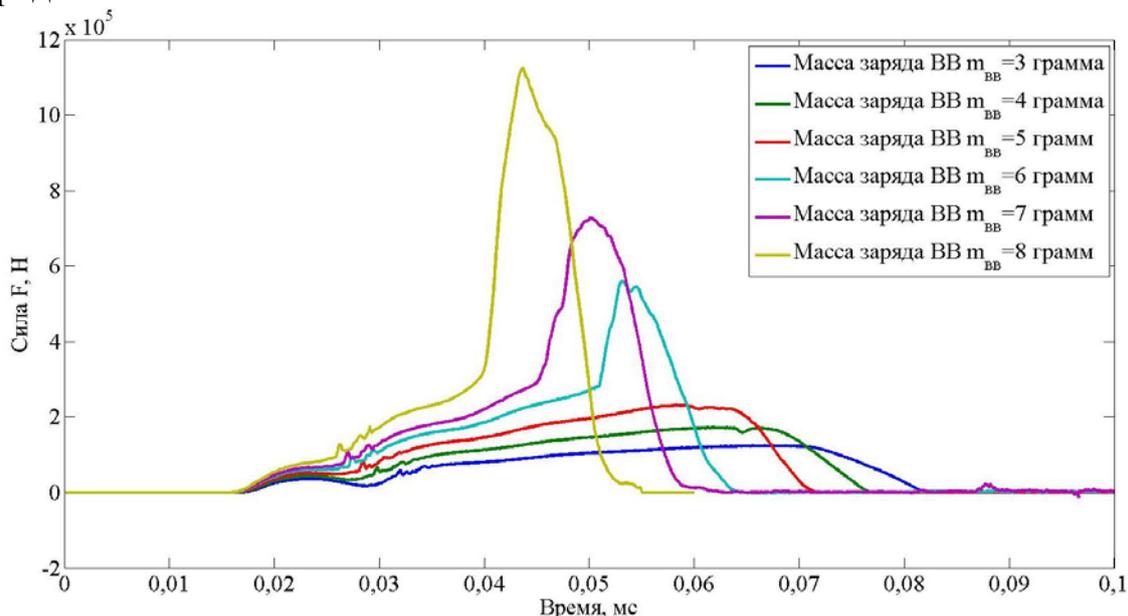


Рисунок 21 – Сила для различных масс заряда ВВ

Полученные зависимости силы от времени использованы в пятой главе для последующего численного моделирования виброударного нагружения стенда взрывного действия.

В пятой главе изложена методика прогнозирования виброударных режимов на стационарном стенде взрывного действия с использованием моделей импульсного нагружающего устройства. Для верификации и валидации модели стенда использован метод частотного анализа конструкции. Изложены результаты экспериментального исследования режимов нагружения, реализуемых стационарным виброударным стендом взрывного действия [6,7]. Конструктивно виброударный стенд выполнен по принципу резонатора из двух пластин. Основная стальная плита предназначена для восприятия нагружения от взрыва заряда ВВ и последующей передачи виброударной нагрузки через крепежные элементы вторичной плите (алюминий) с установленным на ней объектом испытаний (Рисунок 22). Приведены результаты сопоставления расчетных и

экспериментальных данных с точки зрения воспроизведения виброударных нагрузок, нормированных по ударному спектру.

С целью оптимизации процесса численного моделирования путем учета только значимых элементов конструкции, ответственных за формирование "изломов" на графике УС и, как следствие, сокращения времени необходимого для решения задачи виброударного нагружения в целом, целесообразно провести предварительный модальный анализ конструкции стенда с применением численного моделирования. Полученные результаты в дальнейшем сопоставляются с экспериментальными данными в диапазоне частот от 100 до 2000 Гц по графикам спектральных характеристик ускорений, вычисленных для ортогональной розетки датчиков ускорений, установленных в центре верхней плиты стенда и классической теории колебаний пластин и балок.

Для проведения модального анализа конструкции стенда построена КЭМ стенда с упругой моделью материалов и соответствующих физико-механических характеристик. В модели использовались КЭ сплошной среды и теории пластин. Шаг сетки составлял 0,01 м. Граничные условия задавались как отсутствие поступательных и вращательных степеней свободы в местах крепления стенда к силовому полу. Частотный анализ осуществлялся с применением метода Ланцоша в диапазоне частот от 100 Гц до 2000 Гц.

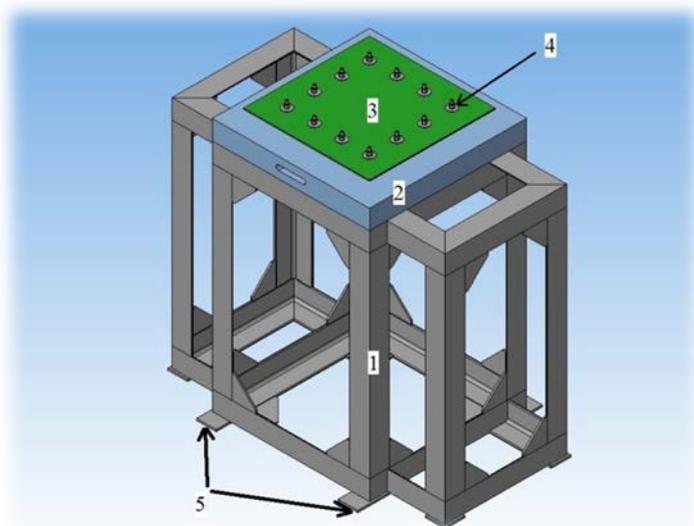


Рисунок 22 – Виброударный стенд: 1 - каркас; 2 - нижняя плита; 3 - верхняя плита; 4 – крепежные элементы (втулки, шпильки), 5 – места крепления типа "сухарь"

элементами, моделирующими трехмерное тело – верхнюю плиту стенда. Дополнительным отличием являлось наличие или отсутствие предварительно-напряженного состояния от болтового соединения в КЭ-модели стенда. Расчет конструкции с предварительным НДС проводился в 2 этапа. На первом этапе прикладывалась статическая нагрузка в требуемых узлах стенда. На втором этапе прикладывалась динамическая нагрузка от взрывного источника нагружения при постоянной статической нагрузке. Моделирование на первом и на втором этапе

Проведено сопоставление результатов определения собственных форм и частот колебаний стенда с применением модального анализа, классической теории и выделения значимых частот по графику спектральных характеристик ускорений (Таблица 2). Близость полученных результатов подтверждает обоснованность предложенного выделения основных элементов стенда, влияющих на получаемый при испытаниях спектр удара.

При построении КЭ-модели было реализовано 12 вариантов моделей стенда, отличающихся различными конечными

осуществлялось с использованием явной схемы интегрирования. Виброударные ускорения, найденные экспериментально и расчетным путем, сравнивались по величине среднеквадратичного отклонения (далее – величине соответствия).

Таблица 2 – Резонансные частоты стенда

Элемент конструкции стенда	Номер тона	Экспериментальные данные, Гц	Модальный анализ, Гц	Расчет по классической теории колебаний, Гц
Верхняя плита	1	320	285	307
	2	560	587	626
	2	590	588	
Нижняя плита	1	950	1010	1007
				1835
				668
				945
Каркас	1	~240	288	300
	2	900	823	828
	3	1540	1606	1623

Поскольку ударное ускорение регистрируется в трех взаимно-перпендикулярных направлениях для одной розетки датчиков, целесообразно помимо построения УС для каждой компоненты ускорения (X, Y, Z), рассмотреть 3D-вектор УС, определяемого как:

$$УС_{3D} = \sqrt{УС_X^2 + УС_Y^2 + УС_Z^2} . \quad (1)$$

В таблице 3 приведены сводные результаты вычисления величин соответствия ударных спектров, полученных при численном моделировании виброударного нагружения с использованием КЭ-моделей стенда в сравнении со средними значениями по серии испытаний.

Таблица 3 – Результаты вычисления величин соответствия

Модель	Розетка 1			Розетка 2			Розетка 3			3 D Вектор		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	Розетка 1	Розетка 2	Розетка 3
Модель 1	0,21	0,18	0,21	0,14	0,20	0,20	0,15	0,14	0,16	0,20	0,23	0,16
Модель 2	0,34	0,14	0,14	0,37	0,13	0,11	0,37	0,20	0,24	0,13	0,10	0,24
Модель 3	0,37	0,17	0,13	0,39	0,17	0,13	0,37	0,20	0,26	0,14	0,14	0,25
Модель 4	0,34	0,12	0,13	0,31	0,11	0,11	0,40	0,24	0,26	0,10	0,1	0,24
Модель 5	0,18	0,18	0,17	0,16	0,22	0,18	0,15	0,17	0,15	0,19	0,23	0,19
Модель 6	0,21	0,17	0,15	0,15	0,16	0,12	0,24	0,11	0,14	0,14	0,15	0,12
Модель 7	0,24	0,17	0,15	0,20	0,15	0,12	0,26	0,14	0,14	0,12	0,14	0,15
Модель 8	0,29	0,19	0,10	0,24	0,17	0,13	0,29	0,15	0,14	0,12	0,15	0,14
Модель 9	0,12	0,21	0,19	0,14	0,22	0,23	0,13	0,18	0,21	0,22	0,23	0,21
Модель 10	0,29	0,12	0,16	0,20	0,16	0,19	0,29	0,17	0,14	0,14	0,16	0,13
Модель 11	0,30	0,16	0,16	0,18	0,16	0,20	0,30	0,18	0,13	0,16	0,17	0,17
Модель 12	0,34	0,23	0,14	0,25	0,22	0,20	0,33	0,19	0,16	0,15	0,22	0,15

На рисунке 23 представлен вычисленный 3D-вектор ударного спектра для моделей 2, 6 и 10 (1) в сравнении с 3D-вектором ударного спектра по серии испытаний.

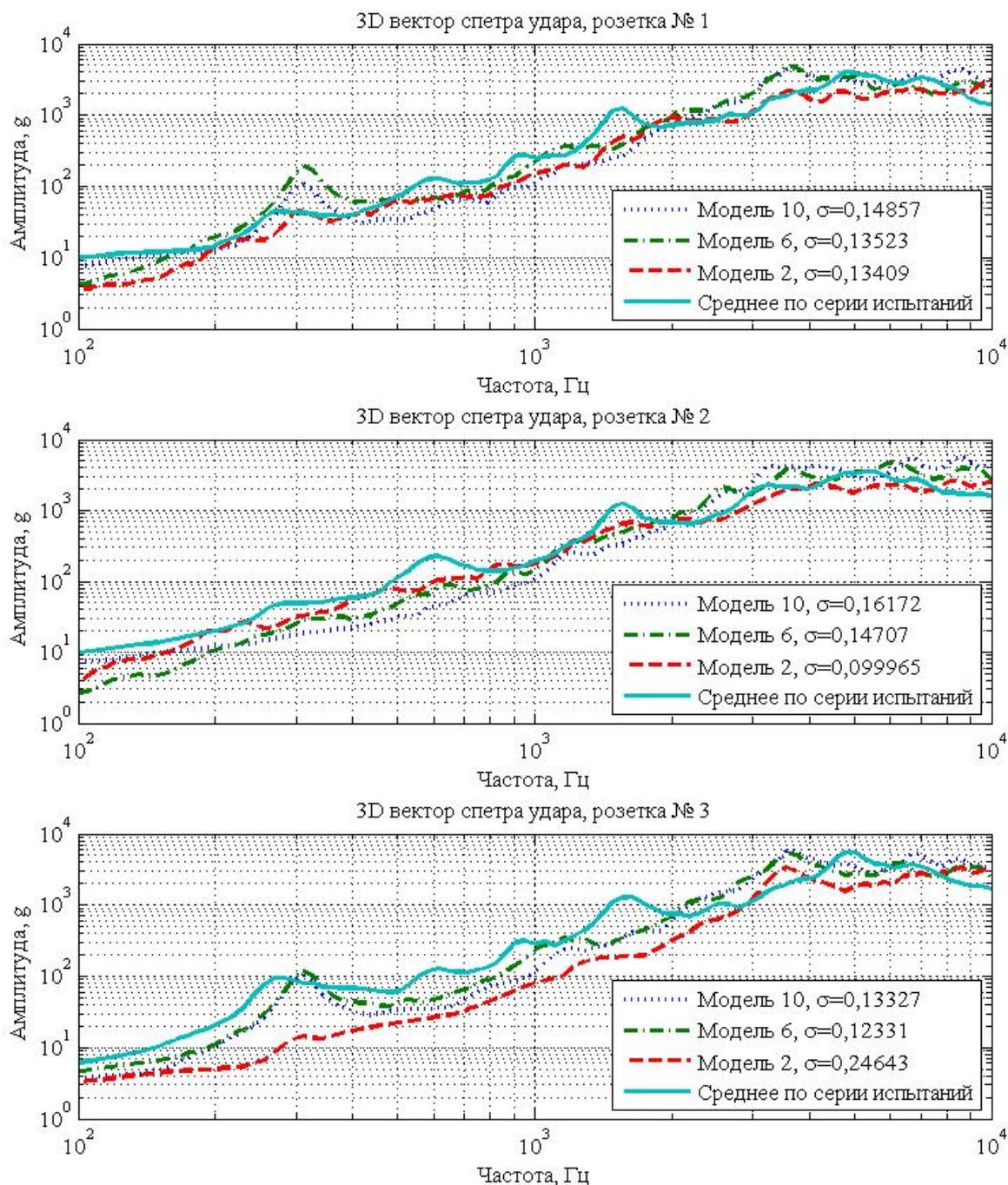


Рисунок 23 - Численное моделирование виброударного нагружения. Модель 2, 6, 10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и экспериментально обоснован комплекс методик для численного моделирования и прогнозирования режимов испытаний изделий ракетно-космической техники на воздействие виброударных нагрузок от срабатывания пиротехнических средств разделения с использованием мобильных ударных устройств и стационарных виброударных стендов.

1. Для определения нагрузок, реализуемых в устройствах локального нагружения и метательных установках взрывного типа, предложен способ определения неизвестных констант, входящих в уравнения состояния горения пороха, по известным значениям энергетических, физических и геометрических величин заряда, позволивший разработать методику численного расчета.

2. Предложенный способ использован для определения необходимых констант в уравнениях состояния пороха, используемых в пороховой баллистической установке и в устройстве локального нагружения с индустриальными патронами типа Д1-Д4. Проведена валидация численной методики определения динамических нагрузок, создаваемых продуктами горения порохов, на основе экспериментов на пороховой баллистической установке. Экспериментально подтверждена обоснованность применения методики для прогнозирования испытательных режимов, реализуемых устройством локального нагружения.

3. Разработана методика численного моделирования виброударных процессов в типовых конструктивных элементах ракет-носителей и космических аппаратов, при имитации срабатывания пиросредств с помощью устройства локального нагружения взрывного типа. Методика позволяет моделировать составные конструкции, включающие тонкостенные оболочки и конструктивные элементы, которые при расчете кратковременных процессов деформации в ближней зоне от источника нагрузки должны рассматриваться как трехмерные.

4. Проведена валидация разработанной численной методики на основе экспериментов по ударному нагружению типовой конструкции тонкостенного корпуса с соединительным шпангоутом с использованием устройства ударного нагружения. Экспериментально обоснована возможность применения разработанной методики численного моделирования для расчета виброударного нагружения изделий РКТ на локальные виброударные нагрузки от срабатывания пиросредств и прогнозирования напряженно-деформированного состояния конструкций при экспериментах с целью сокращения объема испытаний.

5. Для определения нагрузок, реализуемых в стационарных виброударных стендах взрывного типа, разработана методика численного моделирования режимов работы источников нагрузки - импульсных устройств на основе ВВ и демпфирующих элементов.

6. Проведена верификация методики численного моделирования работы импульсных устройств и расчета параметров нагрузки, сообщаемой импульсным устройством упругой плите стенда, на основе известных аналитических решений в одномерном приближении. Валидация методики выполнена с использованием проведенных экспериментов по определению скорости фронта и давления в ударной

волне, проходящей из демпфирующего пакета импульсного устройства в упругую плиту стенда. Соответствие экспериментальных и численных результатов подтверждает обоснованность предложенной методики и возможность использования её для определения параметров нагрузки, создаваемой взрывным источником энергии виброударного стенда.

7. Для проведения предиспытательных расчетов с целью прогнозирования испытательных режимов, сокращения объема испытаний и повышения их информативности, разработана методика и проведено численное моделирование виброударных режимов, реализуемых на стационарном стенде взрывного действия.

8. Проведена серия экспериментов на стационарном стенде взрывного действия с целью валидации методики прогнозирования испытательных режимов. Показано, что расхождение прогнозируемых и реализуемых режимов по ударному спектру не превосходит нормативного значения.

9. Результаты работы являются научно-методической основой совершенствования методов прочностных испытаний изделий ракетно-космической техники путем внедрения численного моделирования в практику наземной имитации виброударного нагружения от срабатывания пиротехнических средств разделения и создания стационарных виброударных стендов и устройств взрывного действия.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Комаров, И.С. Методологические основы научных исследований при обосновании направлений космической деятельности, облика перспективных космических комплексов и систем и их научно-технического сопровождения: В 5 томах. Т.5: Методология исследований прочности и динамики ракет-носителей и космических аппаратов [Текст] / И.С. Комаров, А.В. Анисимов, В.С. Асатурьян, Ю.Г. Балакирев и др. - М.: "Издательско-торговая корпорация "Дашков и К", 2016. - 376 с. ISBN 978-5-394-02605-8

2. Комаров, И.С. Анализ численного моделирования виброударного нагружения [Текст] / И.С. Комаров // Труды 52-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть III. Аэрофизика и космические исследования, Том 1. - М.: МФТИ, 2009. - с. 111-112.

3. Комаров, И.С. Применение Wavelet-преобразований для анализа результатов испытаний конструкций на воздействие широкополосных виброударных воздействий [Текст] / И.С. Комаров // Тезисы докл. всероссийской научно-технической конференции «Измерения и испытания в ракетно-космической промышленности». - М.: МАПИП, 2009. - с. 100-101.

4. Комаров, И.С. Наземная экспериментальная отработка изделий РКТ на ударное воздействие от пиротехнических средств разделения [Текст] / И.С. Комаров // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2013». – М.: МАИ, 2013. - с. 283-284.

5. Комаров, И.С. Наземная экспериментальная отработка изделий ракетно-космической техники на ударное воздействие от пиротехнических средств разделения [Электронный ресурс] // Труды МАИ. Электронный журнал. - 2013.- № 71. - Режим доступа <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=46931>

6. Комаров, И.С. Перспективы развития экспериментальной базы для исследования ударной прочности [Текст] / И.С. Комаров, Б.И. Абашкин, Е.П. Буслов, О.С. Покровский, А.Ю. Ренжин, А.Д. Судомоев, В.В. Устинов, В.А. Фельдштейн, Т.И. Ходцева // Космонавтика и ракетостроение. - 2014 – № 4(77). - с. 178-184.

7. Комаров, И.С. Направления развития информационно-измерительных систем в обеспечение обработки ударной прочности перспективных изделий РКТ [Текст] / И.С. Комаров // Тезисы докл. IV всероссийской научно-технической конференции «Измерения и испытания в ракетно-космической промышленности».-М.: МАПИП, 2015. - с. 42-45

8. Комаров, И.С. Численное прогнозирование режимов ударного нагружения, реализуемого пороховыми баллистическими установками [Текст] / И.С. Комаров, В.А. Фельдштейн // Космонавтика и ракетостроение. - 2015. - № 3 (82). – с. 89-95.