

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНСТВО
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ»**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Фельдштейн В.А.

Королев – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЗАДАЧ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ РКТ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВИБРОУДАРНЫХ НАГРУЗОК	14
1.1. Источники виброударных нагрузок	14
1.2. Задачи испытаний на виброудар.....	16
1.2.1. Автономные испытания.....	16
1.2.2. Функциональные испытания в составе опытных сборок	17
1.2.3. Испытания крупногабаритных изделий.....	19
1.3. Количественное описание и прогнозирование предельных значений амплитуды виброударного нагружения.....	19
1.3.1. Ударный спектр виброударной нагрузки	19
1.3.2. Требования к проведению испытаний на виброударное нагружение ...	22
1.3.3. Метод нормальных толерантных пределов.....	27
1.3.4. Метод статистического бутстрэпа.....	28
1.3.5. Метод численного моделирования.....	29
1.4. Экспериментальные средства отработки на виброударные нагрузки.....	31
1.4.1. Требования к испытательному оборудованию	31
1.4.2. Стенды взрывного действия.....	31
1.4.3. Устройства локального нагружения	35
ГЛАВА 2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ УСТРОЙСТВА ЛОКАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ.....	37
2.1. Модель горения пороха	38
2.1.1. Образование пороховых газов	38
2.1.2. Расчетные соотношения для определения исходных данных модели горения	42
2.1.3. Определение исходных данных модели горения для пороха.....	45
2.2. Численное моделирование процесса горения	48
2.3. Определение исходных данных модели горения для патронов Д1-Д4	52
2.4. Расчет скорости ударника для устройства локального нагружения.....	55
ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОУДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ОТРАБОТКЕ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВ ЛОКАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ	57
3.1. Численное моделирование ударного нагружения фрагмента конструкции	57
3.1.1. Модели материалов.....	58
3.1.2. Метод решения	61

3.1.3. Построение математической модели фрагмента конструкции	63
3.1.4. Результаты численного расчета ударной нагрузки	65
3.2. Численное моделирования виброударного нагружения конструкции	67
3.2.1. Метод решения	68
3.2.2. Построение математической модели типовой конструкции	68
3.2.3. Результаты численного моделирования виброударного нагружения типовой конструкции	71
3.3. Экспериментальная отработка устройства локального нагружения	72
ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА СТАЦИОНАРНОГО ВИБРОУДАРНОГО СТЕНДА.....	75
4.1. Исходные данные для численного расчета нагрузки от взрывного источника	75
4.1.1. Уравнение состояния ВВ.....	76
4.1.2. Уравнение состояние резины.....	76
4.1.3. Уравнение состояния пористых материалов.....	78
4.1.4. Уравнение состояние стали.....	81
4.2. Численное моделирование ударно-волнового нагружения пакета материалов	81
4.2.1. Метод решения	83
4.2.2. Верификация методики численного моделирования	84
4.2.3. Валидация результатов численного моделирования.....	88
4.3. Расчет типового взрывного устройства для стационарного стенда.....	94
ГЛАВА 5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ВИБРОУДАРНОГО СТЕНДА ВЗРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ	101
5.1. Динамическая схема стенда	101
5.2. Модальный анализ виброударного стенда	104
5.3. Численное моделирование виброударного нагружения	110
5.3.1. Метод решения	111
5.3.3. Соединительные элементы.....	114
5.3.5. Средства регистрации виброударного ускорения	119
5.4. Результаты численного моделирования	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	134

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БА	–	бортовая аппаратура
ВВ	–	взрывчатое вещество
БУ	–	баллистическая установка
КА	–	космический аппарат
КЭМ	–	конечно-элементная модель
МПН	–	максимальное поле нагрузок
НТП	–	нормальные толерантные пределы
НЭО	–	наземная экспериментальная отработка
ОИ	–	объект испытаний
РКТ	–	ракетно-космическая техника
РН	–	ракета-носитель
СР	–	средства разделения
СИ	–	система измерений
УВ	–	ударная волна
УЛН	–	устройство локального нагружения
УС	–	ударный спектр
ЭКВ	–	электрический капсюль-воспламенитель
ESA	–	European Space Agency
NASA	–	National Aeronautics and Space Administration
SPH	–	smoothed particle hydrodynamics (метод сглаженных частиц)

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Важной составляющей комплексной программы экспериментальной отработки изделий ракетно-космической техники (РКТ) является их отработка на виброударные нагрузки от срабатывания пиротехнических устройств и сопутствующих с ними переходными процессами, возникающими, например, при разделении ступеней ракеты-носителя (РН), отделения головного обтекателя, запуска и остановки работы двигателей и т.д. Срабатывание пиротехнических устройств сопровождается разрушением механических связей в конструкциях ракеты-носителя или космического аппарата и распространением по конструкции быстрозатухающей волны деформации. Аналогичный процесс может возникнуть и при разрыве механических стягивающих устройств, например, бандажных лент. Раскрытие последних эквивалентно сбросу нагрузки, которая создает предварительно напряженное состояние на объекте.

Вопросы отработки бортовой аппаратуры изделий РКТ на широкополосные виброударные нагрузки, вызванные срабатыванием штатных пиротехнических средств разделения (СР) в составе РН и космических аппаратов (КА), получили активное развитие в 80-х годах XX века. Это было обусловлено качественным изменением элементной базы, расширением номенклатуры электронных компонент в изделиях РКТ, требующих отработки на прочность и стабильность функционирования в условиях воздействия виброударных нагрузок.

Следует отметить, что указанные нагрузки носят локальный характер, не приводят к изменению скорости центра масс РН или КА, и, как правило, безопасны для конструкции в целом. Однако динамические перегрузки могут привести к преждевременному срабатыванию, замыканию, выходу из строя, физическому повреждению электронных компонент и систем, находящихся в непосредственной близости от СР и, как следствие, привести к аварийной ситуации [9].

Значительный вклад в вопрос обеспечения защиты и проведения испытаний бортовой аппаратуры (БА) на виброударные нагрузки внесли представители отечественных академических институтов и ведущих конструкторских бюро отрасли и связаны 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. [1, 5, 7, 8, 16, 34]. Активная работа по указанному направлению ведется и в зарубежных испытательных центрах следует особо отметить работы Н.Т. Дэви, В.И. Бэйтмана, А.Г. Пирсола, С.М. Харриса, Д. Дилана, С. Кириенко, Е. Филлипи. [6, 9, 13, 14, 25, 30, 33].

Несмотря на активный интерес к данной проблеме, до сих пор не существует единого подхода к отработке виброударной прочности БА. Это связано с необходимостью разработки и внедрения специализированных стендов, воспроизводящих режимы нагружения в требуемых амплитудно-частотных диапазонах от 0,1 до 10 кГц, от 100 до 5000 g; такие стенды серийно не выпускаются ни в России, ни за рубежом [2,3,4]. Применяемые в практике взрывные устройства и стенды являются уникальными и для своего использования нуждаются в специальной отработке испытательных режимов, что представляет собой сложную и трудоемкую задачу, которая до настоящего времени решалась эмпирически ценой большого объема отладочных испытаний. Одним из путей решения этой задачи является внедрение в практику наземной отработки изделий РКТ математического моделирования, однако это сдерживается отсутствием научно-методической базы. Поэтому разработка методик численного моделирования виброударного нагружения конструкций на стендах взрывного действия при имитации нагрузок от срабатывания пиротехнических средств разделения является актуальной для ракетно-космической техники.

Степень разработанности темы. В настоящее время в России и за рубежом создан ряд испытательных установок, реализующих виброударные

нагрузки. Стенды взрывного типа, воспроизводящие режимы нагружения в частотном диапазоне от 0,1 до 10 кГц, при интенсивности от 100 до 5000 g, относятся к числу уникальных. Практика показывает, что отработка необходимых режимов на таких стендах чисто экспериментальным путем, требует большого объема отладочных испытаний, иногда кратно превосходящего объем зачетных экспериментов. Первые работы, посвященные попыткам численного моделирования виброударных процессов, относящиеся к 2005–2015 гг., были выполнены за рубежом и относились к установкам простейшего типа «взрывной источник энергии – упругая плита-резонатор». Отметим, что численный статический и модальный анализ конструкций получили существенно более 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 взрывного действия и устройств локального нагружения 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 [1,2,3,4,16,34,38,39] работ из них 3 в журналах перечня ВАК [16,38,39].

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы из 78 наименований. Она изложена на 142 страницах, содержит 104 рисунка и 26 таблиц.

Содержание работы

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.

Во второй главе излагается методика расчета горения пороха и образования пороховых газов применительно к устройствам локального нагружения и пороховым баллистическим установкам (БУ). Представлено описание физической модели горения пороха, реализованной в программном комплексе ANSYS Autodyn. Анализ показал, что для моделирования горения пороховых элементов сложной формы (шар, куб, перфорированное 7 канальное зерно) необходимо использовать физический закон, а не геометрический, поскольку последний в полной мере не учитывает изменение формы зерна в процессе его горения. 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.

Для физического обоснования предложенной валидации модели горения пороха проведено численное моделирование метания алюминиевой частицы на пороховой баллистической установке. 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. Применительно к устройству локального нагружения (УЛН) в случае

использования промышленных патронов Д1–Д4 получены зависимости скорости ударника - подвижного штока от времени.

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 в главе 2. Для обоснования расчетной методики проведены эксперименты по определению уровней виброускорений на внутренней стороне обечайки под местом удара. Полученные в первой части главы 3 параметры виброускорений использовались как исходные данные для моделирования виброударного нагружения на оболочечную конечно-элементную модель (КЭМ) бака РН. Для валидации методики использованы экспериментальные данные, полученные при испытании конструкции на ударное воздействие.

В четвертой главе рассмотрено 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. С использованием программных пакетов ABAQUS Explicit и ANSYS Autodyn проведено:

- моделирование демпферов и свойств используемых материалов (резина, вспененный полистирол);

- моделирование режимов работы типового взрывного нагружающего устройства при различных массах ВВ.

Экспериментально 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. КЭМ стенда разработана с использованием программного пакета ABAQUS Standart. Исследовано влияние использования различных типовых конечных элементов в КЭМ стенда. Для верификации и валидации модели стенда использован метод частотного анализа конструкции. С использованием построенной модели стенда проведена серия численных расчетов для различных вариантов нагружения. Изложены результаты экспериментального исследования режимов нагружения, реализуемых стационарным виброударным стендом взрывного действия. Приведены результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных с точки зрения воспроизведения виброударных нагрузок, нормированных по спектру удара.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЗАДАЧ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ РКТ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВИБРОУДАРНЫХ НАГРУЗОК

1.1. Источники виброударных нагрузок

Изделия РКТ испытывают воздействия ударных нагрузок на различных этапах своего жизненного цикла. Ударные нагрузки преимущественно возникают на этапах выведения изделий и функционировании на орбите, в космосе, в следствии разделения ступеней РН, раскрытии и отделении головного обтекателя и космического аппарата [1,5,6,7].

Для обеспечения надежности создаваемых изделий РКТ предусмотрена их полная наземная экспериментальная отработка (НЭО). Экспериментальная отработка предусматривает как автономные испытания отдельных элементов конструкции и бортового оборудования, так и комплексные испытания систем и крупномасштабных опытных сборок, а на заключительных этапах отработки предусмотрены зачетные и летные испытания опытных образцов изделий [8]. При проведении автономных и зачетных испытаний изделий воспроизводимые на стендах режимы нагружения, в соответствии с требованиями государственных и отраслевых стандартов, должны имитировать расчетные нагрузки, соответствующие эксплуатационным, умноженным на принятый коэффициент безопасности.

Пиротехнические устройства широко применяются в ракетно-космической технике в качестве основных элементов систем разделения ступеней РН, воспламенения топлива, перекрытия магистралей горючего и окислителя двигательных установок, отделения головного обтекателя, разгонного блока, космических аппаратов, расчеховки и раскрытия панелей солнечных батарей и антенн [9]. Источником энергии систем разделения являются заряды ВВ и/или пороховые навески, инициирование которых приводит к разрушению механических связей и, как следствие, к динамическому локальному воздействию на конструкцию импульсной нагрузки [6]. Результатом такого динамического воздействия на начальной (волновой) фазе является распространяющийся по

конструкции быстропротекающий затухающий переходной процесс деформирования, характеризующийся высокими частотами и амплитудами волн напряжений. После волновой фазы в конструкции возбуждаются собственные частоты элементов и систем. В ряде случаев, данное воздействие может сопровождаться составляющими от волн разгрузки, возникающими при снятии нагрузки предварительно напряженных узлов связи разделяющихся элементов конструкции [10]. Воздействие от срабатывания пироприборов отличается от других типов механического воздействия тем, что величины ускорения, скорости и перемещения центра масс незначительны по сравнению с нагружением при посадке, стыковке, нестационарных режимах работы двигательных установок. 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 [11].

При срабатывании пироприборов возникает ударная нагрузка, наиболее интенсивная в зоне близлежащих элементов конструкции, вызывающая высокочастотные колебания, которые могут привести к ложному срабатыванию релейных контактов, оказать существенное влияние на работу аппаратуры и нарушить их функционирование или даже привести к разрушению элементов конструкции. Вследствие виброперегрузок, возникающих при срабатывании пироприборов, возможно прохождение ложных команд управления, приводящих к прекращению нормального функционирования КА. Например, в [12] сообщается, что 85 аварий произошло вследствие выхода из строя бортовых систем при срабатывании пиротехнических средств разделения и только 3 аварии из-за вибрационных нагрузок. В настоящее время имеет место тенденция к существенному увеличению количества пиротехнических устройств, применяемых на современных изделиях РКТ. Так, например, на РН «Сатурн» использовалось ~ 150 пироприборов, на многоразовых транспортных системах типа «Шатл» уже более 400 [13]. Системы разделения активно применяются и в процессе всего жизненного цикла спутников, например, спутники связи в

процессе своей эксплуатации могут подвергаться виброударным воздействиям до 50 раз [14].

1.2. Задачи испытаний на виброудар

К основным задачам экспериментальной отработки относятся следующие виды испытаний:

- автономные прочностные испытания приборов и оборудования при действии нормативных ударных режимов нагружения;
- функциональные испытания штатных систем разделения в составе опытных сборок;
- зачетные ударные испытания крупногабаритных динамических макетов натурального изделия.

1.2.1. Автономные испытания

К автономным испытаниям относятся испытания бортовых приборов или их габаритно-массовых макетов с штатными узлами крепления и массой аппаратуры не более 20–50 кг. Данный вид испытаний имеет целью в первую очередь подтверждение требований по стойкости и функционированию оборудования. Помимо этого, полученные при испытаниях данные позволяют уточнить требования к элементной базе оборудования, определить (при необходимости) параметры демпферов и прокладок для снижения ударного воздействия, а также оптимизировать места крепления и ориентацию радиоэлектронных компонентов в пространстве.

Основной проблемой при проведении автономных испытаний является отсутствие в настоящее время общепринятых методов и средств имитации нормированных виброударных нагрузок от пиротехнических систем разделения для обеспечения квалификационных испытаний оборудования на прочность и стойкость. Требования существующих нормативных документов содержат ряд противоречивых положений. Например, при проведении испытаний на ударные нагрузки от пиросредств допускается проводить зачетные квалификационные испытания с использованием штатных пиросистем, т.е. с коэффициентом

безопасности, равным единице. Это противоречит ряду других нормативных документов и вызывает определенные трудности при принятии решений о достаточности наземной экспериментальной отработки изделий РКТ.

1.2.2. Функциональные испытания в составе опытных сборок

К функциональным испытаниям относятся испытания бортовых систем на подтверждение устойчивости их функционирования в условиях виброударного воздействия. Основное внимание при этом уделяется проверке работоспособности оборудования, а также анализу состояния электронных компонентов оборудования и элементов печатных плат. В настоящее время интенсивно развивается радиоэлектронная элементная база, что позволяет конструировать все более сложные высокоинтеллектуальные комплексные системы, такие как системы приема и передачи данных на орбитальные станции и космические аппараты, спутники связи, высокоточную научную аппаратуру, блоки автоматизированных систем управления и т.п. Зачастую электронные компоненты систем, закупаемые за рубежом или производимые отечественной промышленностью, в связи с отсутствием необходимого испытательного оборудования и методического обеспечения, не проходят сертификацию на ударную стойкость, что снижает надежность систем в целом. Характер разрушения основных элементов: реле, полупроводниковых элементов, хрупких деталей на основе полимеров, разъемов и паяных соединений на печатных платах, вследствие воздействия высокоинтенсивных ударных нагрузок, представлен в таблице 1.2.1 [15]. Поскольку повреждение даже одного элемента может привести к отказу оборудования и последующей аварии изделия, функциональным испытаниям уделяется большое внимание как в России, так и за рубежом.

Таблица 1.2.1 – Чувствительность электронных компонент к ударным воздействиям

Электронные компоненты	Этапы повреждения			
	Этап 1	Этап 2	Этап 3	Примечание
Реле	Дребезг	Временное или постоянное замыкание	Невозвратимые механические повреждения	
Элементы на основе кварца	Остаточные напряжения в кварце. Возникновение сдвига частот, носящих либо временный характер, либо постоянный	Повреждение целостности места пайки либо развитие трещин в местах склеивания	Повреждение кристалла	Элементы на основе кварца обычно устанавливаются на демпфирующую поверхность
Компоненты на основе магнитов, трансформаторы и т.д.	Развитие трещин в ферритах			Тяжелые по массе компоненты. В конструкции применяются ферриты либо керамика – хрупкие элементы.
Гибридные элементы	Перенос частиц	Отслоение склеенных частей	Разрушение припоя в местах пайки	
Танталовые конденсаторы	Изгибные колебания печатной платы приводят к возникновению обратимого импульса тока вследствие разрушения диэлектрика.	Изгибные колебания печатной платы приводят к возникновению областей высокого напряжения и необратимого повреждения печатной платы.		
Тяжелые компоненты (конденсаторы, трансформаторы)	Возникновение областей перенапряжения в местах крепления.			
Оптические элементы	Расслоение оптоволоконных линий в области разъемов	Повреждение разъемов оптических кабелей		
В случае некачественного соединения разъемов	Разъединение элементов			
Полупроводниковые компоненты, гибридные компоненты, реле, конденсаторы, имеющие полости	Стекание зарядов (неправильное функционирование)			

1.2.3. Испытания крупногабаритных изделий

Испытания крупногабаритных макетов, как правило, проводятся с использованием штатных систем разделения. Данный тип испытаний нацелен в основном на отработку функционирования пиротехнических систем разделения и на определение уровней перегрузки в местах крепления бортовой аппаратуры. В настоящее время испытательные центры по возможности применяют типовые (штатные) системы разделения при наземной отработке изделий РКТ, однако это приводит к существенному удорожанию испытаний, во-первых, из-за высокой стоимости средств разделения, во-вторых, из-за невозможности дальнейшего использования материальной части, в третьих, из-за требований по технике безопасности при проведении работы с взрывчатыми материалами. Кроме этого, при использовании штатных систем разделения ударные воздействия соответствуют эксплуатационным нагрузкам, тогда как для обеспечения надежности отработки, согласно действующим стандартам, предусмотрены квалификационные испытания изделия на расчетные нагрузки повышенного уровня, определяемые нормированным коэффициентом безопасности. В случае летного изделия для технологических испытаний использование штатных средств разделения недопустимо, так после срабатывания последних требуется разборка испытуемого изделия и замена ряда элементов. В этой связи, при проведении технологических испытаний летных изделий можно рекомендовать использовать пиротехнические толкатели с демпфирующими прокладками (алюминий, сталь, резина), способные формировать уровень перегрузок с учетом коэффициента безопасности, не повреждая материальную часть [16, 34].

1.3. Количественное описание и прогнозирование предельных значений амплитуды виброударного нагружения

1.3.1. Ударный спектр виброударной нагрузки

Пиротехнические устройства практически мгновенно создают на конструкции в окрестности установки высокое давление. В результате по конструкции распространяются волны напряжения, в которых присутствует

высокоинтенсивная компонента, быстро затухающая из-за демпфирования материала конструкции, наличия стыков и сварных соединений. Далее, энергия высокочастотных компонент сигнала в процессе распространения переходит в низкочастотные моды колебаний конструкции. Типичный сигнал виброударного ускорения имеет практически нулевое среднее значение по времени.

Нагрузки от пиротехнических устройств кратковременны и мало влияют на движение центра масс конструкции. Длительность суммарного сигнала зависит от величины коэффициентов демпфирования конструкционных и теплозащитных материалов, параметров конструкции и обычно составляет от 50 мкс до 20 мс [6].

Виброударный процесс в исследуемой точке конструкции характеризуется максимальной амплитудой ускорения (m/c^2) или перегрузкой (g), полосой частот и длительностью воздействия. Для количественного описания виброударного процесса используют ударный спектр (УС) как обобщенную характеристику внешнего воздействия. УС - огибающая максимальных относительных ускорений \ddot{Y} системы несвязанных осцилляторов (рисунок 1.3.1) при заданном переносном ускорении платформы \ddot{X} [17,18].

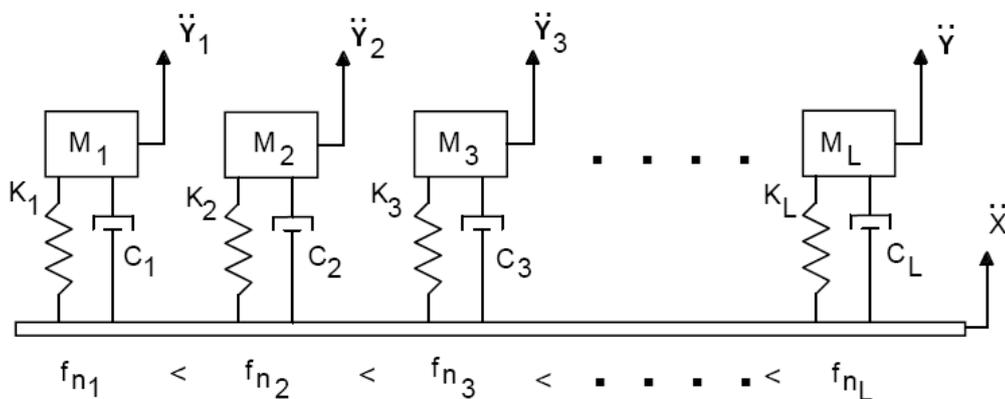


Рисунок 1.3.1 – Система несвязанных осцилляторов.

В соответствии с определением ударный спектр получают при помощи численного решения уравнений вида [9]:

$$\ddot{y} + (2\pi f / Q)\dot{y} + (2\pi f)^2 y = -\ddot{x}, \quad (1.3.1)$$

где \ddot{x} – виброускорение на основании, f – собственная частота осциллятора, которая для УС является независимой переменной, Q – коэффициент усиления на резонансной частоте (добротность), принято считать $Q=10$.

По определению ударного спектра принимается, что влиянием осциллятора на движение основания можно пренебречь, отсутствует взаимодействие между формами колебаний конструкции объекта испытаний, декремент колебаний не зависит от частоты. Расчет УС проводят при постоянном шаге по частоте, например при шаге не более 1/6 октавы.

Характерный вид ударных спектров для дальней зоны воздействия показан на рисунках 1.3.2–1.3.3. УС сначала растет с частотой (угол наклона составляет от 9 до 12 дБ на октаву), далее следует горизонтальный или слегка наклонный участок. Частота, при которой происходит изменение наклона кривой, принято называть частотой излома и она, как правило, соответствует доминирующей частоте. Частота излома обычно находится в диапазоне от 1 до 2 кГц, но в некоторых случаях может выходить за указанные пределы. При этом амплитуда ускорений может достигать 20000 g и более. Пироудар в ближней зоне имеет похожую характеристику, но с более высокой частотой излома (Рисунок 1.3.3) [6].

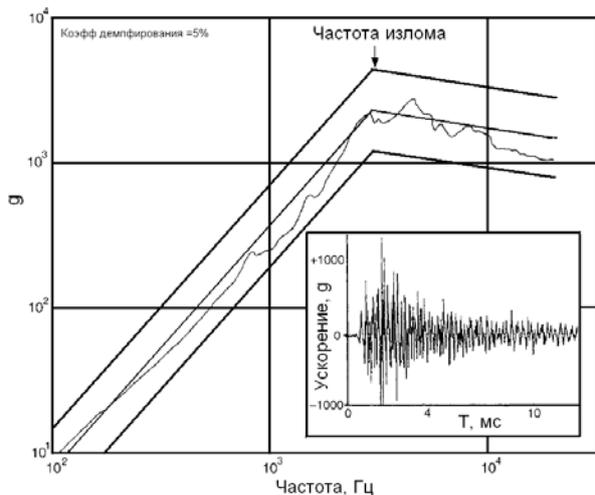


Рисунок 1.3.2 – Ударный спектр и зависимость ускорения от времени для дальней зоны воздействия

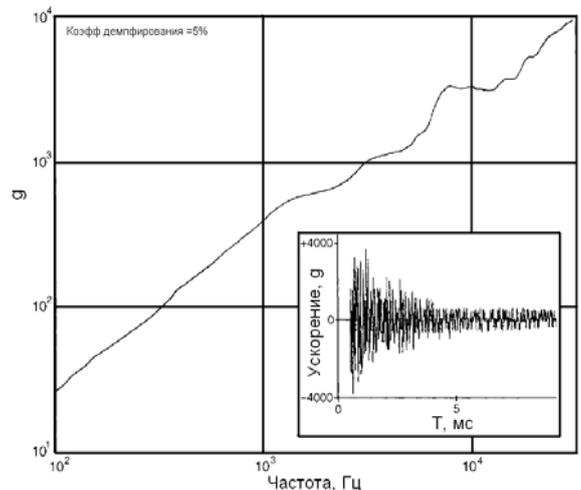


Рисунок 1.3.3 – Ударный спектр и зависимость ускорения от времени для ближней зоны воздействия

Следует отметить, что начальный участок УС при отсутствии характерных составляющих сигнала в низкочастотной области во многом зависит от демпфирования конструкции. При увеличении добротности осциллятора происходит более интенсивный рост УС на начальном участке, диапазон частот которого при этом существенно уменьшается.

1.3.2. Требования к проведению испытаний на виброударное нагружение

Экспериментальная отработка предполагает использование ряда методов, применение которых позволяет с необходимой точностью воспроизвести физические процессы с требуемым уровнем перегрузок и частотным наполнением на реальном объекте испытаний или имитационной модели. Уровни перегрузок и условия проведения автономных испытаний регламентируются стандартами в России и за рубежом. В таблице 1.3.1 представлены параметры виброударного процесса, характеризующие ближнюю, среднюю и дальнюю зоны, согласно зарубежным стандартам [10,19].

Таблица 1.3.1 – Деление на зоны согласно стандартам

Стандарт	Зона	Перегрузка, g	Частота, кГц
NASA-STD-7003	Ближняя зона	>5000	≥ 100
	Средняя зона	1000 – 5000	>10
	Дальняя зона	<1000	<10
IEST-RP-DTE032	Ближняя зона	>10000	≥ 10
	Средняя зона	<10000	3 – 10
	Дальняя зона	<1000	<3

Кроме указанных выше параметров, дополнительно вводят расстояние от средства разделения. Рассмотрим более подробно характеристики каждой из зон.

В ближней зоне распространяются высокоинтенсивные волны сжатия и растяжения от срабатывания средств разделения. Уровни перегрузок от волны деформации могут превышать 50 000 g с частотами более 100 кГц. В связи с этим, в ближней зоне не рекомендуется устанавливать электронное и механическое оборудование. Для высокоэнергетических источников возмущений, в первую очередь кумулятивных ножей, ближняя зона определяется расстоянием в 150 мм от плоскости разделения. Для менее энергетических источников, например, точечных источников, таких как пирочека, пирозамок, ближняя зона распространяется до 30 мм.

Средняя зона характеризуется комбинацией волновой фазы деформирования и отклика конструкции в виде собственных форм колебаний.

Генерируемые уровни перегрузок могут находиться в диапазоне от 2000 до 50000 g и иметь значимые компоненты сигнала свыше 10 кГц. Для высокоэнергетических источников возмущений средняя зона находится в интервале от 150 до 600 мм от пиросредства. Для остальных средств разделения - в интервале от 30 до 300 мм.

В дальней зоне виброударное воздействие формируется в результате затухающих колебаний конструкции на собственных формах с максимальной амплитудой ускорения не более 2000 g и спектральным наполнением не более 10 кГц. Соответственно дальняя зона начинается с 600 мм и 300 мм для высокоэнергетических источников и слабо энергетических источников, соответственно. График ударного спектра для дальней зоны имеет явный излом на определенной частоте, характеризующий доминирующую частоту при отклике конструкции на импульсную нагрузку (Рисунок 1.3.2). Необходимо иметь в виду, что указанные расстояния условны и являются лишь качественной характеристикой процесса.

Поскольку задаваемые при испытаниях ударные спектры являются обобщением результатов наземных и летных испытаний, они задаются с определенным допуском, определяемым как предельно допустимое расхождение нормируемого виброударного воздействия:

$$P = 20 \log_{10} \left(\frac{A_1}{A_0} \right), \quad (1.3.2)$$

где A_1 - измеренное значение амплитуды, A_0 - исходное значение амплитуды.

В таблице 1.3.2 представлены интервалы допустимых значений ударного спектра согласно зарубежным нормативным документам.

Таблица 1.3.2 – Интервал допустимых значений для УС

Нормативный документ	Допустимый диапазон	Примечание
ECSS-E-10-03A	[-6,+6] дБ от 10 Гц до 10 кГц	Не менее 30 % моделируемого УС лежит выше номинального уровня УС
ESSB-HB-E-005 (ESA)	[0,+6] дБ до частоты излома	УС вычисляется в нескольких точках и разница между двумя измерениями менее 6 dB
	[-3,+6] дБ свыше частоты излома	

Нормативный документ	Допустимый диапазон	Примечание
NASA-STD-7003A	[-3,+6] дБ от 10 Гц до 3 кГц	Не менее 50 % моделируемого УС лежит выше номинального уровня УС
	[-6,+9] дБ от 3 кГц до 10 кГц	
MIL-STD-810G	Ближняя зона	Не менее 50 % моделируемого УС лежит выше номинального уровня УС
	[-3,+6] дБ от 100 Гц до 20 кГц	не менее 80 % УС принадлежит диапазону
	[-6,+9] дБ от 100 Гц до 20 кГц	не более 20 % УС принадлежит диапазону
	Средняя зона	Не менее 50% моделируемого УС лежит выше номинального уровня УС
	[-3,+6] дБ от 100 Гц до 10 кГц	не менее 90 % УС принадлежит диапазону
	[-6,+9] дБ от 100 Гц до 10 кГц	не менее 10 % УС принадлежит диапазону
	Дальняя зона	Не менее 50 % моделируемого УС лежит выше номинального уровня СУ
	[-3,+6] дБ от 100 Гц до 3 кГц	не менее 90 % УС принадлежит диапазону
	[-6,+9] дБ от 100 Гц до 3 кГц	не менее 10 % УС принадлежит диапазону

На рисунках 1.3.4-1.3.7 представлены нормированные уровни с интервалами допустимых значений согласно стандартам [10,11,20,21] на примере УС для РН «Рокот» при отстреле головного обтекателя.

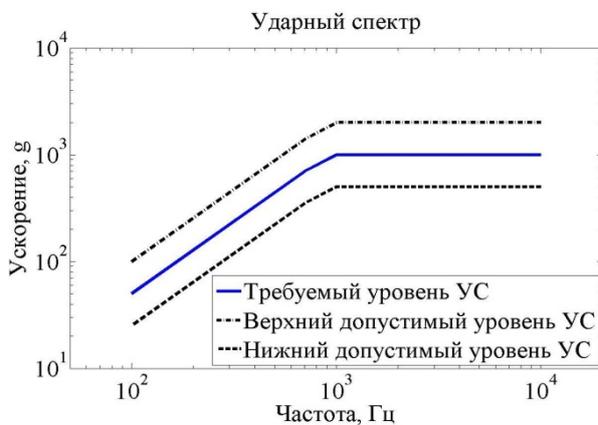


Рисунок 1.3.4 – Допустимый диапазон для УС согласно стандарту ECSS-E-10-03A

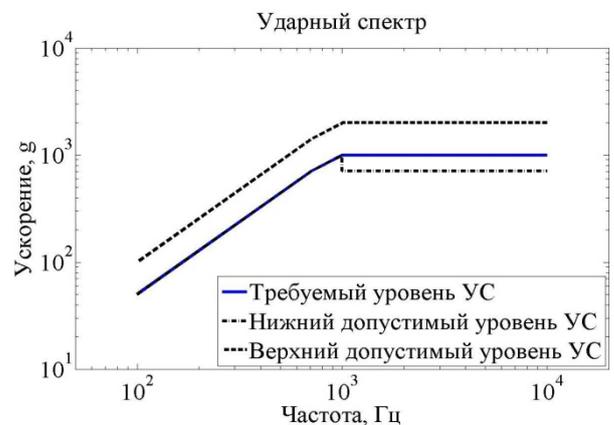


Рисунок 1.3.5 – Допустимый диапазон для УС согласно стандарту ESSB-HB-E-005 (ESA)

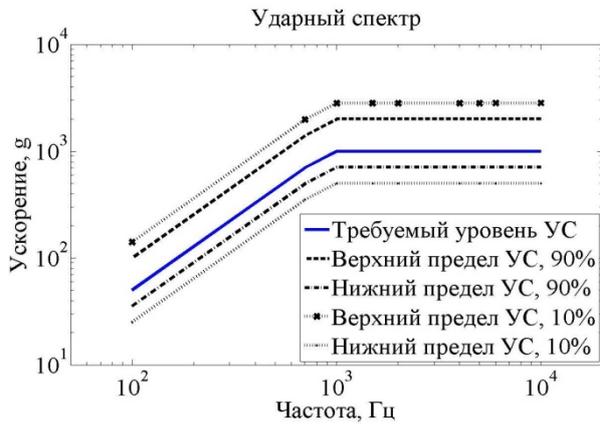


Рисунок 1.3.6 – Допустимый диапазон для УС согласно стандарту MIL-STD-810G (средняя зона)

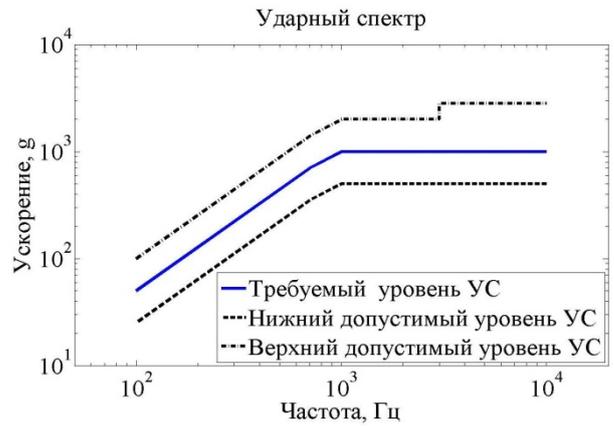


Рисунок 1.3.7 – Допустимый диапазон для УС согласно стандарту NASA-STD-7003A

Как правило, график УС имеет одну точку перегиба на характерной частоте собственных форм колебаний конструкции, но возможны реализации и более сложных графиков УС (Рисунок 1.3.8).

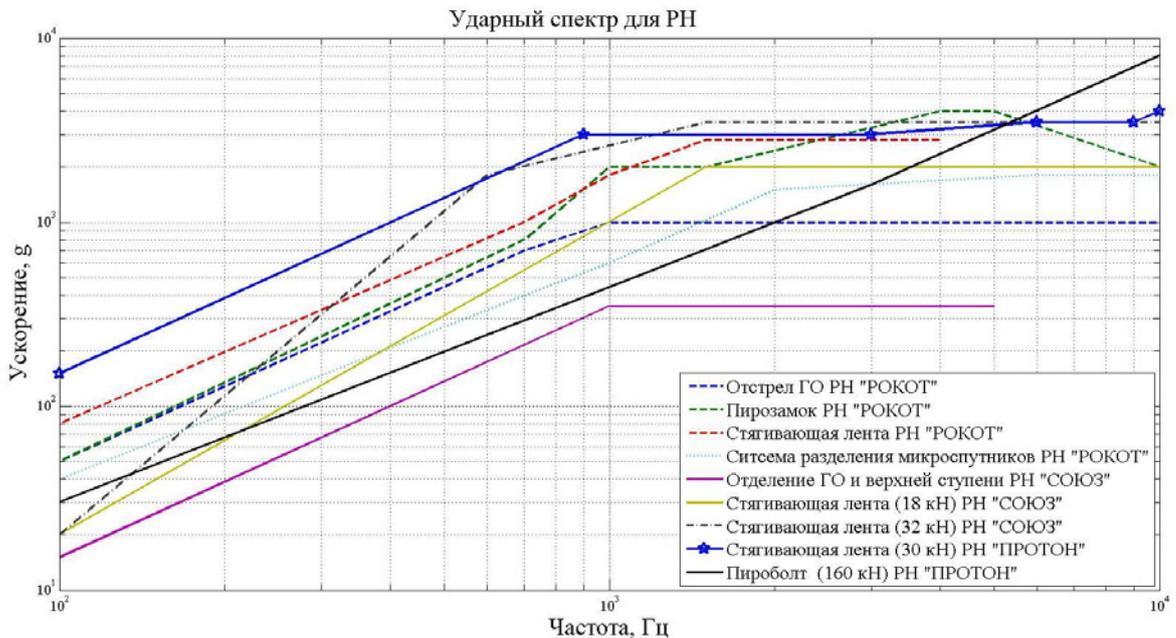


Рисунок 1.3.8 – УС для РН «СОЮЗ», «РОКОТ», «ПРОТОН» [22,23,24]

Важным направлением наземной экспериментальной отработки является определение максимального поля нагрузок и формулирование нормируемых уровней УС для вновь создаваемых изделий. Для этих целей 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.

Самым надежным способом определения реальных значений перегрузок является проведение натуральных испытаний, когда в качестве источников воздействий применяются реальные пиротехнические устройства. На основании полученной при испытаниях информации определяют нагрузки в требуемых узлах и креплениях по всему изделию. Эти данные, преобразованные в ударные спектры, используются при автономных и функциональных испытаниях приборов и оборудования на нагрузки от средств разделения с учетом нормированных коэффициентов безопасности.

Метод подобия заключается в определении ожидаемого максимального поля нагрузок (МПН) от срабатывания средств разделения для нового изделия на основе анализа накопленных ранее экспериментальных данных для подобных изделий-аналогов. Процедура вычисления МПН включает несколько этапов [25]:

- выбор динамически подобного изделия, наземная отработка которого на ударное нагружение проведена в полном объеме;

- разбивка выбранного изделия на зоны по конструктивному принципу (одиночный элемент конструкции, блок, модуль и т.п.), в которых ударные нагрузки имеют один порядок;

- вычисление для каждой из зон коэффициента ударного спектра, определяемого как отношение УС отклика конструкции на УС воздействия;

- УС для каждой из зон изделия определяется как произведение коэффициента ударного спектра изделия-аналога на УС нагрузки для вновь создаваемого изделия.

Полученные при вычислении УС для каждой из зон вновь создаваемого изделия подвергаются статистическому анализу для формирования максимального поля нагрузок. В качестве статистических методов используют

метод предельных значений, распределенных по нормальному закону, и метод статистического бутстрэпа.

1.3.3. Метод нормальных толерантных пределов

Метод нормальных толерантных пределов (НТП) (Normal tolerance limit method) [26] применяется для определения предельных значений перегрузок, возникающих при испытаниях изделий на виброударное нагружение. Метод НТП используется в предположении, что случайная величина имеет нормальное распределение. В качестве случайной величины может выступать набор значений (реализаций) УС для однотипных испытаний. В этом предположении НТП вычисляется следующим образом [27]:

$$НТП_x(n, \beta, \gamma) = \bar{X} + K_{n, \beta, \gamma} \cdot s_x,$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_i^n x_i,$$

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2},$$

где \bar{X} – среднеарифметическое случайной величины x_i , s_x – среднеквадратичное отклонение случайной величины x_i , $K_{n, \beta, \gamma}$ – табулированный нормирующий коэффициент, β – вероятность того, что все значения лежат ниже НТП, n – количество значений вычисленной величины x_i , γ – доверительный интервал для случайной величины x_i .

В случае логнормального распределения случайной величины, НТП вычисляется согласно

$$НТП_y(n, \beta, \gamma) = \log_{10} НТП_x(n, \beta, \gamma).$$

На практике в ракетно-космической отрасли используют два уровня НТП [25]:

- максимально ожидаемый уровень воздействия, вычисляется при $\beta=0,95$, $\gamma=0,5$. Полученный уровень НТП для набора значений УС являются исходным уровнем при проведении наземной экспериментальной отработки.

- экстремальный ожидаемый уровень воздействия, вычисляется при $\beta=0,99$, $\gamma=0,90$. Полученный уровень НТП для набора значений УС являются исходным уровнем при проведении квалификационных испытаний [27].

1.3.4. Метод статистического бутстрэпа

Метод статистического бутстрэпа [29] (statistical bootstrap) является альтернативным способом определения максимально ожидаемого уровня воздействия. Преимущество данного метода заключается в возможности оценивать точность и неопределенность оцениваемых параметров из ограниченного набора данных наблюдаемой величины без каких-либо предположений о её функции распределения (данные не обязательно имеют нормальное распределение, как в случае с методом НТП). Процедура вычисления доверительных интервалов наблюдаемой величины следующая:

- а) формируется массив данных для случайной величины с некоторой функцией распределения (нормальной, Рэлея, Вэйбулла) – $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$;
- б) формируются псевдовыборки X_b , с использованием значений X , посредством случайной выборки с заменой элементов: размерности вновь созданных псевдовыборок равны размерности исходной выборки X . Например, $X=(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$, тогда $X_b=(x_1, x_2, x_2, x_4, x_3)$;
- в) вычисляются среднее значение \bar{X}_b и среднеквадратичное отклонение S_{X_b} ;
- г) б) и в) повторяются требуемое m число раз (1000–10000). Из полученных выборок формируется статистика для интересующей величины;
- д) на основании исходных данных X строится функция распределения случайной величины, определяются значения для доверительной вероятности 95 % и 99 %;
- е) для каждой псевдовыборки X_b вычисляют m значений:

$$P95 = \bar{X}_b + K(P95)S_{X_b},$$

$$P99 = \bar{X}_\sigma + K(P99)S_{X_\sigma};$$

ж) для вычисления доверительного предела, полученные в п. е) значения сортируют и выбирают процентное значение распределения соответствующее требуемому доверительному уровню.

1.3.5. Метод численного моделирования

Развитие вычислительной техники и программно-математических пакетов типа ABAQUS, NASTRAN, ANSYS позволило внедрить численное моделирование для оценки уровней виброударных нагрузок при срабатывании средств разделения [16, 30, 34]. Для получения высокой достоверности и точности таких расчетов, в терминах интервала допустимых значений УС, требуется математическая модель и методики численного моделирования, позволяющие прогнозировать режимы виброударного нагружения. Разработка методик численного моделирования 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. Процесс разработки методик численного моделирования на примере исследования вопросов виброударного нагружения с использованием стендов и нагружающих устройств может быть представлен в виде блок-схемы (Рисунок 1.3.9).

Практика численного моделирования показывает, что при выполнении указанных выше требований, получаемые результаты хорошо коррелируют с экспериментальными данными и достоверная оценка амплитуды отклика конструкции на ударное воздействие при расчетах может быть определена в диапазоне частот от 0,1 до 10 кГц. На рисунке 1.3.10 представлен пример, иллюстрирующий высокую степень достоверности УС моделируемого процесса в сравнении с экспериментальными данными.

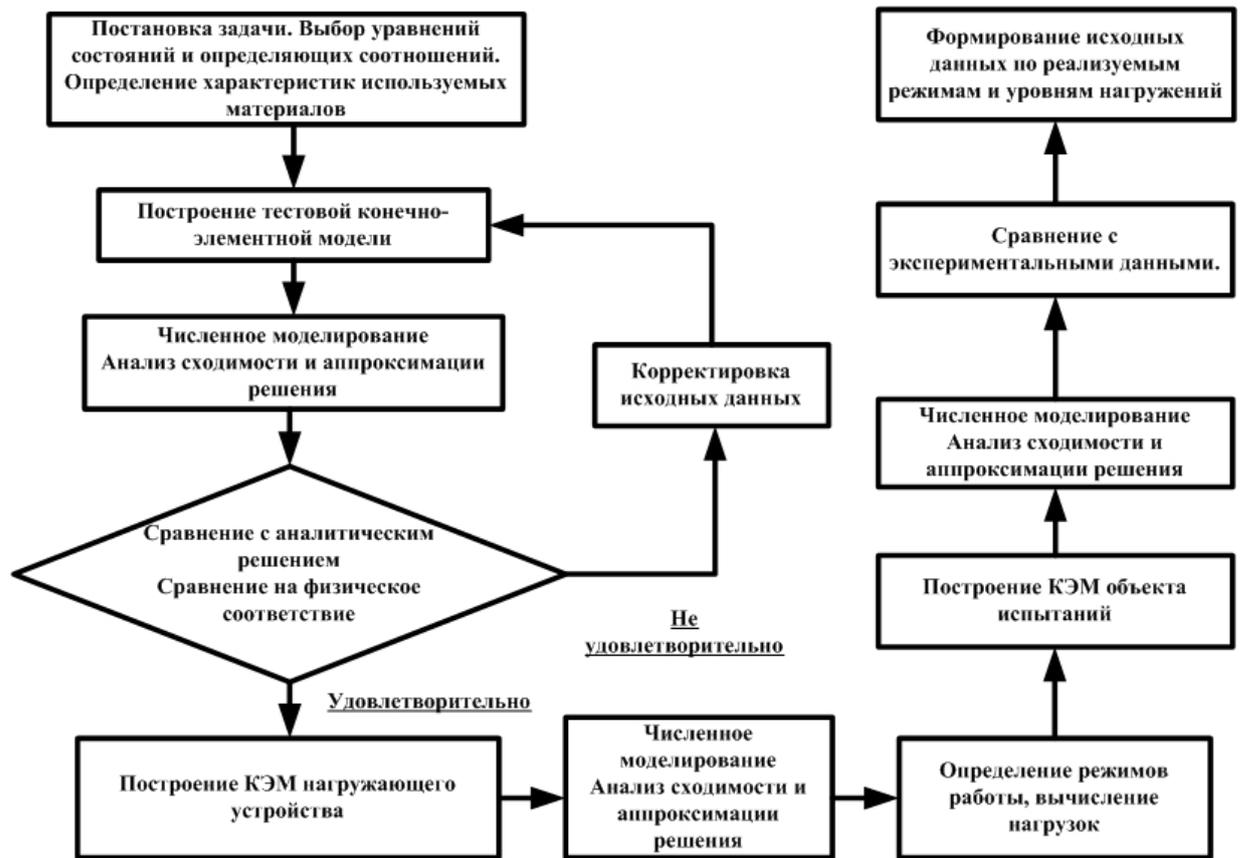


Рисунок 1.3.9 – Процесс разработки методик численного моделирования

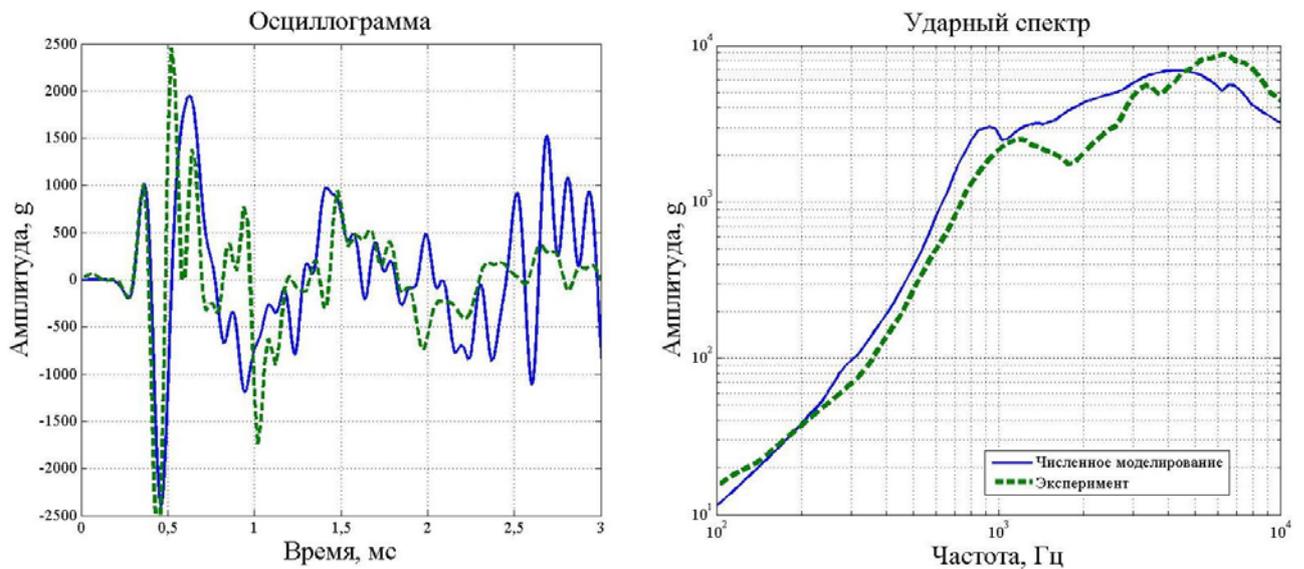


Рисунок 1.3.10 – Результаты численного моделирования в сравнении с экспериментальными данными [16]

1.4. Экспериментальные средства обработки на виброударные нагрузки

1.4.1. Требования к испытательному оборудованию

В настоящее время существует много экспериментальных средств обработки элементов изделий РКТ на виброударные нагрузки. В испытательных центрах космической техники в России и за рубежом активно разрабатываются и внедряются ударные (виброударные) стенды, с помощью которых моделируются виброударные нагрузки при испытаниях изделий.

Основные требования, предъявляемые к испытательным ударным установкам, следующие:

- широкий диапазон воспроизводимого ударного ускорения по пиковому значению и частоте;
- малое влияние массы и механической структуры испытываемого изделия на воспроизводимое ударное ускорение;
- соответствие реализуемых режимов нагружения, заданным в ТЗ или предусмотренным стандартами.

Анализ открытых источников позволяет провести условную классификацию стендов по принципу их работы [30, 31]:

- 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.

1.4.2. Стенды взрывного действия

Стенд взрывного действия состоит из одной, двух или трех металлических плит-резонаторов квадратной, реже прямоугольной формы, с установленным на

ней объектом испытаний, зачастую через специальный адаптер. Плиты с объектом испытаний вывешиваются горизонтально либо вертикально на тросах, тем самым обеспечивается условие свободных границ. Важнейшей характеристикой резонаторов являются их собственные частоты и формы колебаний [32]. В таблице 1.4.1 представлены данные о применяемых в России и в зарубежных испытательных центрах виброударных стендах [33].

Таблица 1.4.1 – Виброударные стенды взрывного типа

Конструкция	Метод нагружения	Организация
Резонирующая двойная плита	Детонационный шнур	Alcatel ETCA (Бельгия)
Резонирующая плита	Детонационный шнур	EMR (Бельгия)
Резонирующая двойная плита	Пластическое ВВ	EADS-ST (Франция)
Резонирующая плита	Устройства локального нагружения (взрывного типа)	Dassault Aviationc (Франция)
Резонирующая двойная плита	Пластическое ВВ	ФГУП ЦНИИмаш (Россия)

Стенды взрывного действия обладают более широким функционалом, в части реализуемых перегрузок и частотным наполнением на графиках УС, по сравнению со стендами с механическим источником энергии [30].

При использовании взрывных стендов к обычному набору варьируемых параметров, таких как:

- материал, размеры основной плиты и последующих проставок;
- количество и расположение демпфирующих элементов;
- конструкция, материал переходного адаптера,

добавляются:

- масса, тип взрывчатого вещества;
- расположение заряда взрывчатого вещества;
- конструктивное исполнение заряда (демпферы, проставки из различных материалов).

В качестве источника взрывного нагружения используются высокоэнергетические взрывчатые вещества. Наиболее распространенные ВВ – детонационный шнур и пластическое (листовое) ВВ. Непосредственное нагружение резонирующей конструкции взрывом вызывает распространение по конструкции высокоинтенсивных (более 10000 g), высокочастотных (более 10 кГц) колебаний. Для изменения высокочастотной компоненты в резонирующей сборке используют заряды с резиновыми, пенопластовыми и стальными демпферами. Типовые средства нагружения представлены на рисунках 1.4.1–1.4.2.



Рисунок 1.4.1 – Средство нагружения с детонационным шнуром



Рисунок 1.4.2 – Средство нагружения с листовым (пластическим) взрывчатым веществом

Следующим варьируемым параметром является материал плиты-резонатора в конструкции ударного стенда. Обычно основная (базовая) плита, воспринимающая взрывную нагрузку изготавливается из стали, последующие плиты для двойных и тройных стендовых сборок - из алюминия. Плиты скрепляются между собой с использованием болтовых соединений и алюминиевых (стальных) втулок. Высота втулок, их количество - следующий варьируемый параметр, влияющий на интенсивность ударной нагрузки. На рисунке 1.4.3 представлена типовая схема виброударного стенда на основе двойной резонирующей сборки.

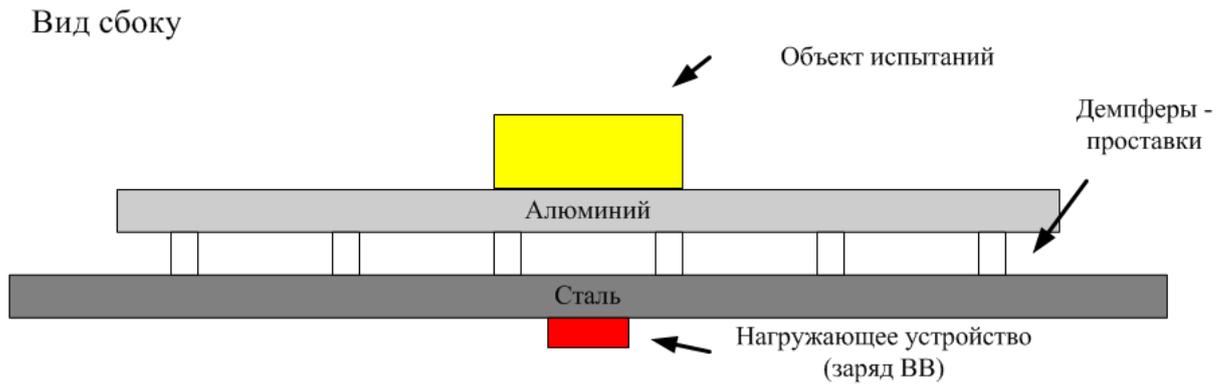


Рисунок 1.4.3 – Схема типового ударного стенда взрывного действия

На рисунках 1.4.4 и 1.4.5 представлены экспериментальные средства Thales Alenia Space. Данные испытательные стенды предназначены для моделирования нагрузки, характерной для средней и дальней зоны.



Рисунок 1.4.4 – Ударный стенд взрывного типа, вариант 1



Рисунок 1.4.5 – Ударный стенд взрывного типа, вариант 2

В конструкциях стендов взрывного типа применяется алюминий, который обладает меньшим акустическим импедансом по сравнению со сталью. При падении волны на границу раздела двух сред, часть энергии будет отражаться, а часть – проходить далее. В случае, если резонирующие плиты изготовлены из одного материала, в конструкции стенда возникают ударные волны высокой интенсивности от подрыва заряда ВВ, что будет соответствовать характеру воздействия для ближней зоны. Поэтому для воспроизведения нагрузки, характерной для средней и дальней зоны следует фильтровать высокочастотные компоненты ударного спектра, конструируя резонатор из плит с различным

импедансом и используя известные соотношения для интенсивности проходящей и отраженной волн:

$$\alpha = \left(\frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right)^2. \quad (1.4.1)$$

Для алюминия $Z_0 = 14,58 \cdot 10^6$, а для стали $Z_1 = 40,56 \cdot 10^6$. Коэффициент отражения (1.4.1), при падении плоской волны на границу раздела сталь-алюминий $\alpha = 0,22$, т.е. 22 % всей энергии отразится, что позволит снизить амплитуду ударного нагружения в высокочастотной области на графике ударного спектра.

1.4.3. Устройства локального нагружения

В последнее время получают распространение устройства локального нагружения (УЛН) – генераторы ударных импульсов [16, 34, 33, 36, 37]. Генераторы состоят из ствола и разгоняемого ударника, который ударяет с заданной скоростью в испытуемую сборку или в резонирующую конструкцию (виброударный стенд) (Рисунки 1.4.6–1.4.7). Разгон ударника осуществляется с использованием пороховых или взрывных газов и достигаемая скорость не превышает 60 м/с [16, 33]. Для изменения параметров нагрузки используются специальные демпферы–формирователи ударного импульса. Использование устройств локального нагружения при испытаниях натуральных сборок позволяет реализовать расчетные, а не эксплуатационные нагрузки, как при срабатывании штатных пирострел, то есть проводить квалификационные испытания.

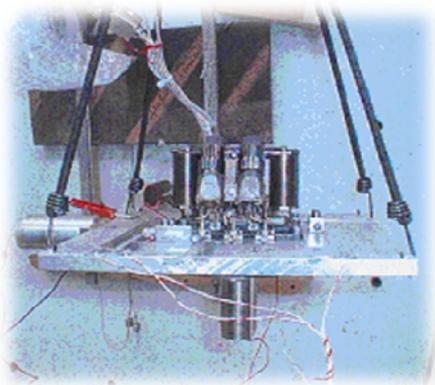


Рисунок 1.4.6 – Устройство локального нагружения Dassault Aviationc (Франция)

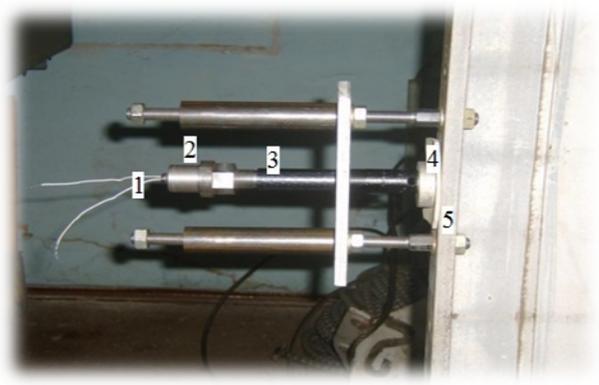


Рисунок 1.4.7 – Устройство локального нагружения ФГУП ЦНИИмаш: 1 – ЭКВ; 2 – пробка; 3 – ствол 14,5 мм с ударником; 4 – демпфер; 5 – шпангоут отсека

Генераторы позволяют реализовать трехкомпонентное воздействие путем одновременного нагружения резонирующей плиты по трем ортогональным направлениям.

Наиболее перспективным представляется применение устройств локального нагружения при испытаниях летных изделий, где невозможно применение штатных средств разделения, кроме того, это позволяет провести квалификационные и функциональные испытания.

ГЛАВА 2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ УСТРОЙСТВА ЛОКАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Данная глава посвящена определению режимов работы устройства локального нагружения (УЛН) (рисунок 2.1), в котором для разгона механического поршня-ударника используется энергия продуктов горения пороха (индустриальные патроны Д1-Д4). Режим работы устройства определяется двумя основными параметрами: массой поршня-ударника и его скоростью. Экспериментальное определение последней представляет значительные трудности ввиду небольшого размера устройства и ограниченной длины хода поршня (порядка 60 мм). Поэтому использовался подход определения скорости на основе численного моделирования процесса метания ударника пороховыми газами. Далее рассмотрены вопросы определения исходных данных для модели горения пороха, проведение численного моделирования, сравнение получаемых результатов с экспериментальными данными, вычисление скорости ударника в УЛН при использовании патронов Д1-Д4.

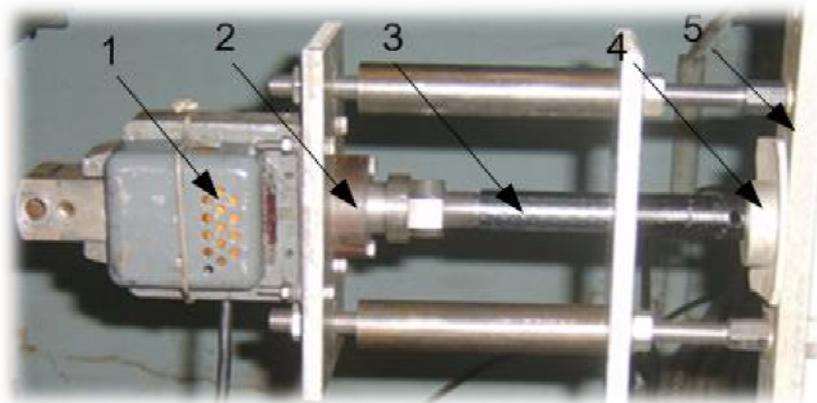


Рисунок 2.1 – Устройство локального нагружения: 1 – устройство иницирования патронов; 2 – казенник под патрон; 3 – ствол с подвижным поршнем-ударником; 4 – демпфер; 5 – нагружаемая конструкция

Методика моделирования процесса горения пороха, образования продуктов горения и ускорения ими ударников представляет интерес также для расчета режимов метания ударников более широким классом взрывных устройств [38,39].

2.1. Модель горения пороха

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 [40]. При этом математические модели, в зависимости от поставленной задачи имеют различные входные параметры и требуют соответствующих методов решения. Так, при исследовании воспламенительного периода, конвективного горения или межфазного взаимодействия необходимо применение методов механики гетерогенных сред [41], а для оценки дульной скорости снаряда достаточно известного геометрического закона образования пороховых газов [42].

В программном пакете ANSYS Autodyn реализована модель горения пороха Powder Burn (Beta) (далее - модель горения) [43]. Преимущество данной модели заключается в использовании физического закона горения, что, как будет показано далее, позволяет частично преодолеть неточности, свойственные геометрическому закону. Данная модель горения пороха является двухфазной, в которой при реализации численной схемы в одной расчетной ячейке в один и тот же момент времени находятся и газ и материал [44]. Масса вещества в каждой расчетной ячейке определяется как сумма массы газа и твердого вещества.

Использование модели горения для баллистических расчетов сопряжено с необходимостью определения исходных данных методом пересчета по известным физико-химическим параметрам [45,46] элементарных пороховых зерен (пластинки, трубки и т.д.), входящих в состав пороховых зарядов.

2.1.1. Образование пороховых газов

Процесс горения порохов согласно [46,47] включает в себя следующие стадии:

- 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.

Согласно современным представлениям [40, 45, 47] фронт горения порохового элемента состоит из четырех зон. Первая зона – зона прогрева, примыкающая к конденсированному элементу. Вторая зона – зона газификации, где происходят превращение пороха в газообразные продукты по достижении на поверхности пороха некоторой критической температуры T_{II} (эндотермическая реакция). Третья зона – зона прогрева продуктов газификации вследствие теплообмена и слабых экзотермических реакций, до температуры реакции T_p . Четвертая зона – зона экзотермической химической реакции (Рисунок 2.1.1).

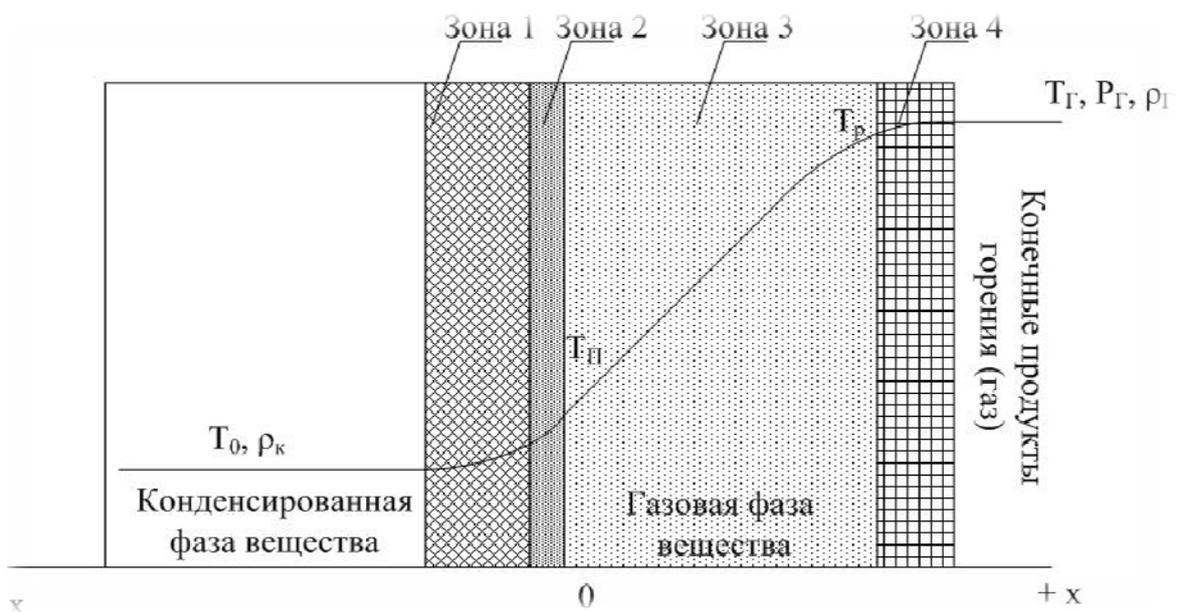


Рисунок 2.1.1 – Структура фронта горения

При достаточно больших давлениях конечных продуктов $P_{\Gamma} > 15$ МПа, толщина фронта горения незначительна и может рассматриваться как поверхность разрыва (поверхность горения). Скорость плоскопараллельного перемещения поверхности горения называется собственной скоростью горения U .

Результат, получаемый при использовании уравнений для оценки дульной скорости снаряда на основе геометрического закона, не всегда согласуется с экспериментальными данными, несмотря на достаточно точное выполнение гипотезы о горении пороха параллельными слоями, лежащей в его основе. Следует выделить несколько основных недостатков геометрической модели:

- предполагается, что воспламенение заряда происходит мгновенно [42];
 - скорость горения пороховых элементов U во всех точках поверхности одинакова, одинакова и зависимость ее от давления в течение всего процесса; однако для трубчатых и многоканальных пороховых элементов зависимость U от P_g может быть различной на разных этапах процесса;

- коэффициенты формы и индивидуальные геометрические характеристики пороховых элементов принимаются в предположении об их постоянстве, что не соответствует действительности;

- в момент окончания горения коэффициент прогрессивности $\sigma(t)$ (отношение площади поверхности горения в момент t к площади поверхности в начальный момент t_0) равен нулю, но в геометрическом законе это не выполняется.

Для моделирования процесса горения в программном пакете решается система уравнений вида [43]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dF}{dt} = G \cdot \sigma(t) \cdot U \\ U = H(P_g) \\ P_g = \rho_g E_g e^{\rho_g/D} \\ V = C_1 + C_2(H(P_g))(1 + \gamma(\rho_s)) \\ F_T(t) = F(t) \cdot I(t) \end{array} \right. \quad (2.1.1)$$

В первом уравнении dF/dt – относительное количество газа (газоприход), 1/с, выделяемого при горении в единицу времени в одной расчетной ячейке, устанавливаемое через следующие величины:

- G – коэффициент формы порохового зерна, 1/м;
- $\sigma(t) = (1 + F(t))^c$ – относительная поверхность горения или коэффициент прогрессивности пороха (физический закон горения в форме Шарбонье) [42,43];
- U – скорость собственного горения пороха, 1/м, зависящая от давления пороховых газов P_g .

В третьем уравнении P_g – давление пороховых газов, зависящее от следующих параметров:

- ρ_g – плотность продуктов горения, кг/м³;
- E_g – внутренняя энергия пороховых газов на единицу массы, Дж/кг;
- D – константа, определяемая по экспериментальным данным, кг/м³.

В четвертом уравнении V – скорость воспламенения (процесс распространения пламени по поверхности порохового элемента), определяемая через следующие величины:

- C_1 , м/с, и C_2 – константы, определяемые по экспериментальным данным;
- $H(P_g)$ – зависимость скорости горения от давления пороховых газов;
- $\gamma(\rho_s)$ – зависимость показателя адиабаты от средней плотности твердого вещества по всему объему.

В последнем уравнении $F_T(t)$ – суммарный коэффициент реакции, показывающий долю конденсированного вещества, перешедшего в газообразное состояние, вычисляемый для совокупности расчетных элементов, в которых начался процесс собственного горения, зависящий от следующих величин:

- $F(t)$ – объем образовавшихся газов в каждой расчетной ячейке;
- $I(t)$ – коэффициент реакции, зависящий от скорости воспламенения и численно равный доле расчетных ячеек, в которых начался процесс собственного горения.

Сравнение физического закона с геометрическим законом горения, позволяет заключить следующее:

- наличие в модели функции $H(P_g)$ позволяет задавать нелинейную собственную скорость горения (будет показано далее) для порохового элемента при различных внешних условиях;

- наличие в модели горения скорости воспламенения V позволяет моделировать постепенное горения порохового заряда. Типовая зависимость превращения из твердого в газообразное состояние представлена на рисунке 2.1.2;

- применение физического закона горения в форме Шарбонье позволяет учитывать уменьшение поверхности горения порохового элемента до нуля, при котором прекращается газоприток.

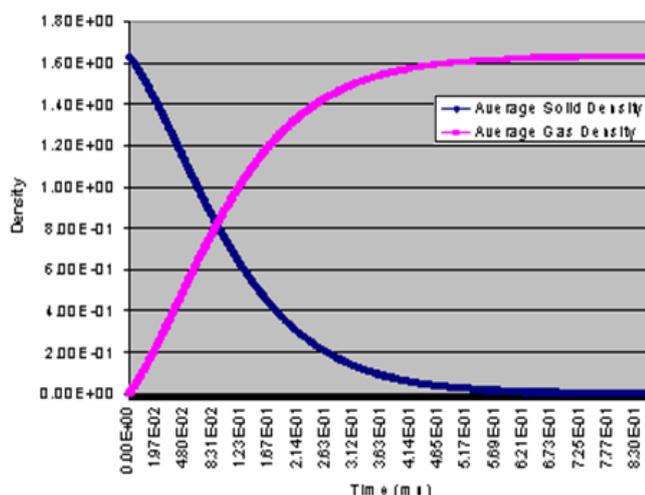


Рисунок 2.1.2 – Процесс нарастания давления пороховых газов P_g и уменьшения плотности конденсированного вещества ρ_s , в одной расчетной ячейке, при решении системы уравнений 2.1.1 [44].

2.1.2. Расчетные соотношения для определения исходных данных модели горения

Для описания формы и размеров поверхности горения в [42] предложен геометрический закон горения, связывающий количество образующихся пороховых газов с геометрическими характеристиками пороховых зерен. К геометрическим характеристикам пороховых зерен относятся (Рисунок 2.1.3):

- толщина горящего свода $2e_1$;
- ширина $2b$;
- длина $2c$;
- диаметр каналов d_0 .

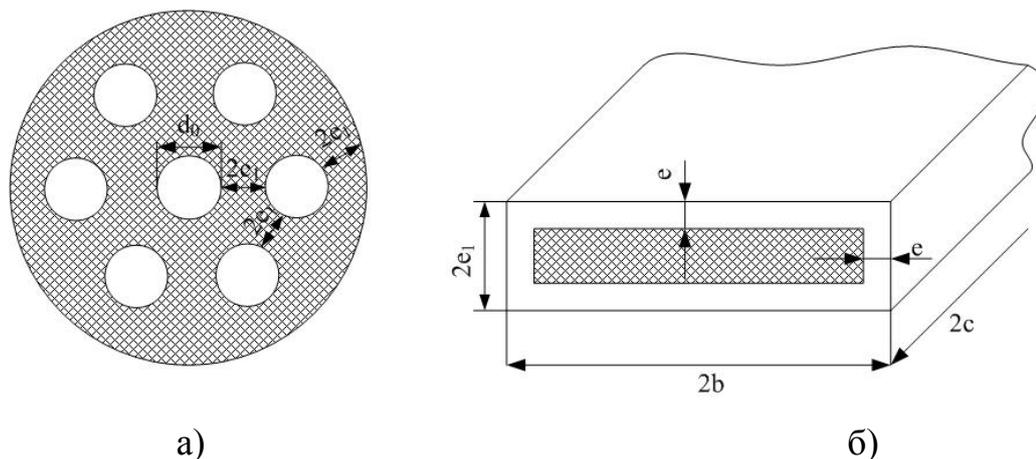


Рисунок 2.1.3 – Геометрические размеры пороховых элементов:

а) – семиканальное зерно, б) – лента, параметр e соответствует толщине сгоревшего слоя в момент времени t

Характеристиками формы порохового зерна являются безразмерные параметры χ , λ , μ , устанавливаемые экспериментальным путем.

Согласно [48] относительное количество газов, выделяемых при горении пороха в единицу времени, согласно геометрическому закону образования пороховых равно:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{S_0}{V_0} \cdot \sigma \cdot \frac{de}{dt}, \quad (2.1.2)$$

где de/dt – собственная скорость горения пороха. В [39] показано, что можно принять $S_0/V_0 = \chi/e_1$, тогда:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\chi}{e_1} \cdot \sigma \cdot \frac{de}{dt}. \quad (2.1.3)$$

Сравнивая (2.1.2) и первое уравнение системы (2.1.1), из соображений размерности можно найти, что:

$$G = \frac{\chi}{e_1}; \quad (2.1.4)$$

$$H(P_g) = \frac{de}{dt}; \quad (2.1.5)$$

$$\sigma(t) = (1 + F(t))^c. \quad (2.1.6)$$

При высоких давлениях справедлив линейный закон горения:

$$\frac{de}{dt} = U(t) = u_0 + u_1 P_g^\nu, \quad (2.1.7)$$

где u_0 , u_1 , v – эмпирические коэффициенты. При давлениях свыше 15 МПа можно принять $u_0=0$ и $v=1$ [43]. В уравнении (2.1.7) u_1 – коэффициент скорости горения, м³/с·Н. Для бездымных порохов опытным путем определена зависимость [48]:

$$u_1 = (-76,6 + 0,2 \cdot Q_w) \cdot 1,019 \cdot 10^{-11}, \quad (2.1.8)$$

где Q_w – калорийность пороха, ккал/кг.

Константа c – коэффициент прогрессивности горения пороха (2.1.6): для ленточных порохов $c=0,2$ для пластинчатых порохов $c=0,5$. Для более сложных порохов [42] (бронированные трубки, семиканальное зерно, шар и пр.) была предложена экспериментальная зависимость:

$$c = \frac{2 \cdot |\lambda|}{\chi} + \frac{150 \cdot 10^6 - P_I}{2000 \cdot 10^6}, \quad (2.1.9)$$

где P_I – давление, Па, при котором происходит воспламенение продуктов горения.

Полное пиростатическое давление пороховых газов в момент окончания горения определяется по формуле [48]:

$$P_g = \frac{f \cdot \Delta}{1 - \alpha \cdot \Delta}, \quad (2.1.10)$$

где f – сила пороха, Дж/кг; α – коволюм пороховых газов, м³/кг; Δ – плотность заряжения, кг/м³, которая определяется как отношение массы пороховой навески в заряде к объему, занимаемому этим зарядом. Поскольку при $\Delta=1/\alpha$, $P_g \rightarrow \infty$ то формула (2.1.10) не может быть использована для плотностей заряжения близких к $1/\alpha$. Для определения коэффициентов в экспоненциальном законе горения (третье уравнение системы (2.1.1)) проводится аппроксимация методом наименьших квадратов расчетных значений давления, полученных при различных плотностях заряжения согласно (2.1.10). При известной калорийности пороха Q_w , сила f может быть определена по формуле [48]:

$$f = (6956 + 4,048 \cdot Q_w) \cdot 98,1. \quad (2.1.11)$$

Использование расчетного пакета ANSYS Autodyn требует определенного набора исходных параметров пороха и процесса горения. Однако наиболее полно изучены характеристики порохов, используемые в геометрической модели

горения. Поэтому целесообразно определить соответствие известных параметров и параметров, входящих в модель Powder Burn (Beta).

2.1.3. Определение исходных данных модели горения для пороха

Для моделирования процесса горения выбран один из самых распространенных видов порохов – графитированный пироксилиновый семиканальный порох «4/7» [49]. В таблице 2.1.1 представлены характеристики пороха, необходимые для вычисления давлений пороховых газов по формулам (2.1.8), (2.1.10), (2.1.11).

Таблица 2.1.1 – Баллистические характеристики пороха марки «4/7»

Q_w , ккал/кг	f , МДж/кг	α , м ³ /кг	u_1 , м ³ /(Н·с)
775	0,99	10 ⁻³	7,99·10 ⁻¹⁰

Используя формулу (2.1.10) и значения коэффициентов из таблицы 2.1.1, можно найти полное пиростатическое давление пороховых газов для различных плотностей заряжания в диапазоне 0,001 – 940 кг/м³. Далее определяются коэффициенты для третьего уравнения системы (2.1.1) с использованием метода наименьших квадратов по графику полного пиростатического давления. Принимается во внимание, что при вычислении полного пиростатического давления плотность образовавшегося газа равна плотности заряжания (в силу действия закона сохранения массы). В соответствии с результатами вычислений коэффициентов, согласно закону образования пороховых газов, удельная энергия $E_g=0,71$ МДж/кг; константа $D=472$ кг/м³. Константы скорости воспламенения для четвертого уравнения системы (2.1.1) принимаются равными $C_1=300$ м/с и $C_2=0$ [49].

На рисунке 2.1.4 представлена экспоненциальная аппроксимация зависимости полного пиростатического давления P_g от плотности заряжания.

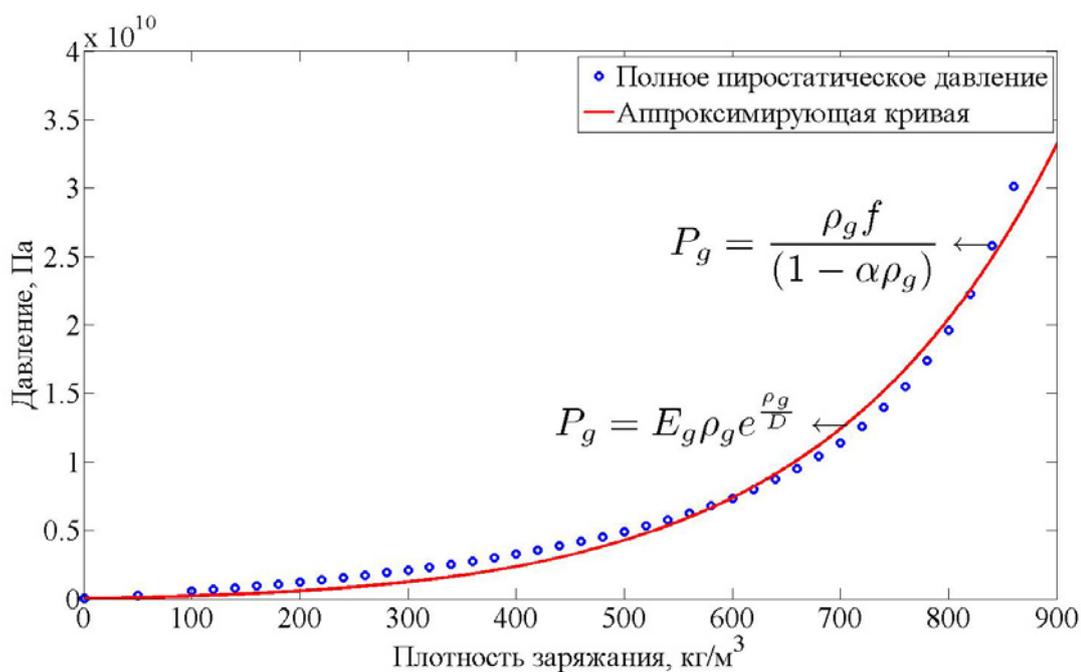


Рисунок 2.1.4 – Зависимость давления от плотности заряжения

Введем энергию на единицу объема

$$E_{gp} = E_g \rho_g, \quad (2.1.12)$$

где E_g – удельная энергия; ρ_g – плотность заряжения. В дальнейшем для обоснования и валидации методики проводились эксперименты по метанию алюминиевой частицы с помощью пороховой баллистической установки, где в качестве рабочего тела использовался порох с навеской 32 г и плотностью заряжения 884 кг/м³. В этом случае энергия на единицу объема (2.1.12) $E_{gp} = 625$ МДж/кг.

Согласно таблице 2.1.2, где представлены характеристики формы и геометрические размеры для семиканального элементарного порохового зерна (диаметр каналов $d_{\text{зерна}} = 2$ мм) [42], используя (2.1.4) и (2.1.9), получим: $G = 9,94$ 1/мм, $c = 0,5542$ (при вычислении параметра c принималось давление $P_f = 15$ МПа).

Таблица 2.1.2 – Геометрические размеры и характеристики формы зерна

Размеры, мм			Характеристики формы		
2e1	2b	2c	χ	λ	μ
$2/11 \cdot d_{\text{зерна}}$	-	$23 \cdot d_{\text{зерна}}$	1,808	-0,44	-

Скорость собственного горения элементарного порохового зерна вычисляется согласно (2.1.7), при этом учитывается, что воспламенение продуктов горения проходит при $P_l=15$ МПа. С помощью определенных выше коэффициентов для давления пороховых газов и коэффициента скорости горения u_l (Таблица 2.1.1), строится зависимость $U(P_g)$ (Рисунок 2.1.5).

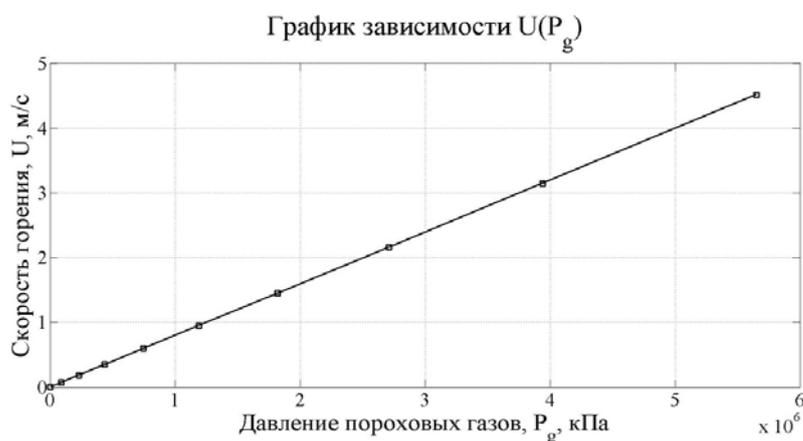


Рисунок 2.1.5 – Зависимость скорости собственного горения от давления пороховых газов

Зависимость показателя адиабаты пороховых газов от плотности заряжания, принимается постоянной: $\gamma(\rho_s)=1,27$ [41]. Исходные данные для модели горения пироксилинового пороха, при плотности заряжания 884 кг/м³, приведены в таблице 2.1.3.

Таблица 2.1.3 – Исходные данные для модели горения пороха

Параметр	Значение
Плотность заряжания	884 кг/м ³
Уравнение состояния	Линейное
Модуль объемного сжатия	13,5 ГПа
Температура	293 К
Уравнение состояния продуктов горения	Экспоненциальное
Параметр G	9,94 1/мм
Параметр c	0,5542
Параметр C1	300 м/с
Параметр D	0.472 кг/м ³
Энергия на единицу объема	$6.25 \cdot 10^5$ кДж/м ³

Полученные данные использовались в дальнейшем при численном моделировании метания ударника в составе математической модели баллистической установки (БУ).

2.2. Численное моделирование процесса горения

Моделирование динамических процессов с характерным временем $\tau \approx 0,1 - 100$ мс при деформациях среды более 50 % в современных расчетных пакетах реализовано с использованием ряда численных методов: метод конечных разностей, конечных элементов, метод сглаженных частиц (SPH) [50].

При расчете горения и образования пороховых газов исходный материал – порох испытывает фазовое превращение из твердого в газообразное состояние и распространяется в канале ствола, претерпевая в процессе движения большие деформации. Моделирование таких процессов целесообразно вести в переменных Эйлера. Уравнения сохранения массы, импульса и энергии совместно с уравнением состояния, связывающего энергию, плотность и давление, имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_i)}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial(\rho \cdot u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_i \cdot u_j - \sigma_{ij})}{\partial x_i} = \rho \cdot F_i \\ \frac{\partial[\rho(e + u_i \cdot u_i / 2)]}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_j (e + u_i \cdot u_i / 2) - u_k \cdot \sigma_{kj} + q_j)}{\partial x_j} = \rho \cdot u_k \cdot F_k + Q \\ p = p(\rho, E) \end{array} \right. \quad (2.2.1)$$

где $\rho = \rho(x_1, x_2, x_3, t)$ – плотность материала; $u_i = u_i(x_1, x_2, x_3, t)$ – компоненты скорости; F_i – компоненты вектора плотности массовых сил; e – внутренняя энергия на единицу массы; $\rho \cdot \frac{u_i \cdot u_i}{2} = \rho \cdot \frac{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}{2}$ – кинетическая энергия в единице объема; q_i – компоненты вектора потока тепла; Q – объемная область источников тепла; p – давление; $E = e + \frac{u^2}{2}$ – полная энергия.

Принятая модель горения предполагает двухфазное представление материала в каждой расчетной ячейке, поэтому в процессе расчета в каждой

расчетной ячейке решаются две системы уравнений (2.2.1), одна для конденсированного вещества, для которого:

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = S_{ij} - p\delta_{ij} \\ p = -K \cdot (\rho_0 / \rho - 1), \end{cases}$$

вторая – для газообразного вещества, для которого:

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = -p \cdot \delta_{ij} \\ p = \rho \cdot E \cdot e^{\rho/D}, \end{cases}$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; S_{ij} – компоненты девиатора напряжений; δ_{ij} – символ Кронекера; K – модуль объемного сжатия; p – среднее нормальное напряжение (гидростатическое давление).

Схема реализации алгоритма расчета поведения материала на неподвижных сетках с использованием законов сохранения и уравнения состояния (2.2.1) представлена на рисунке 2.2.1.

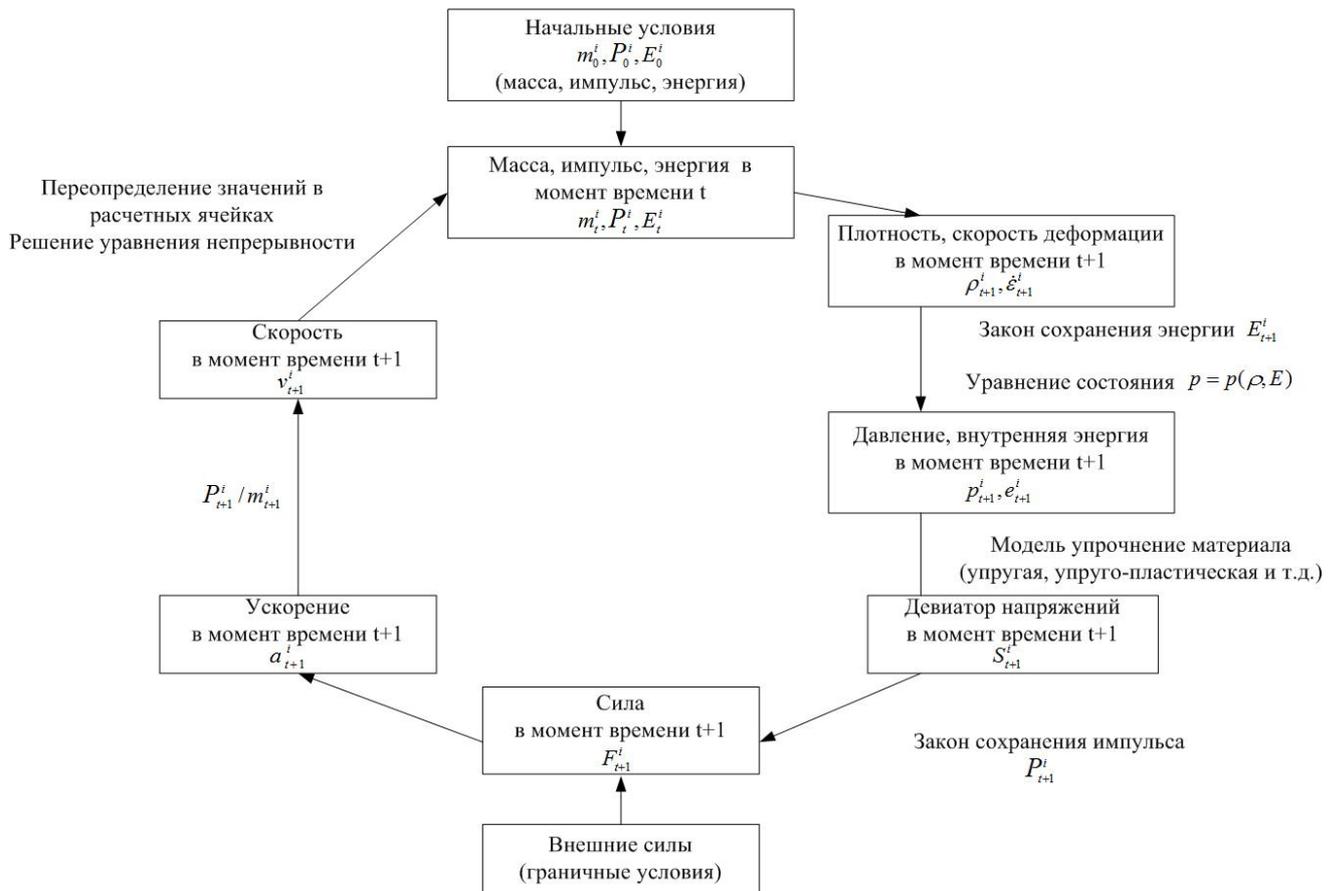
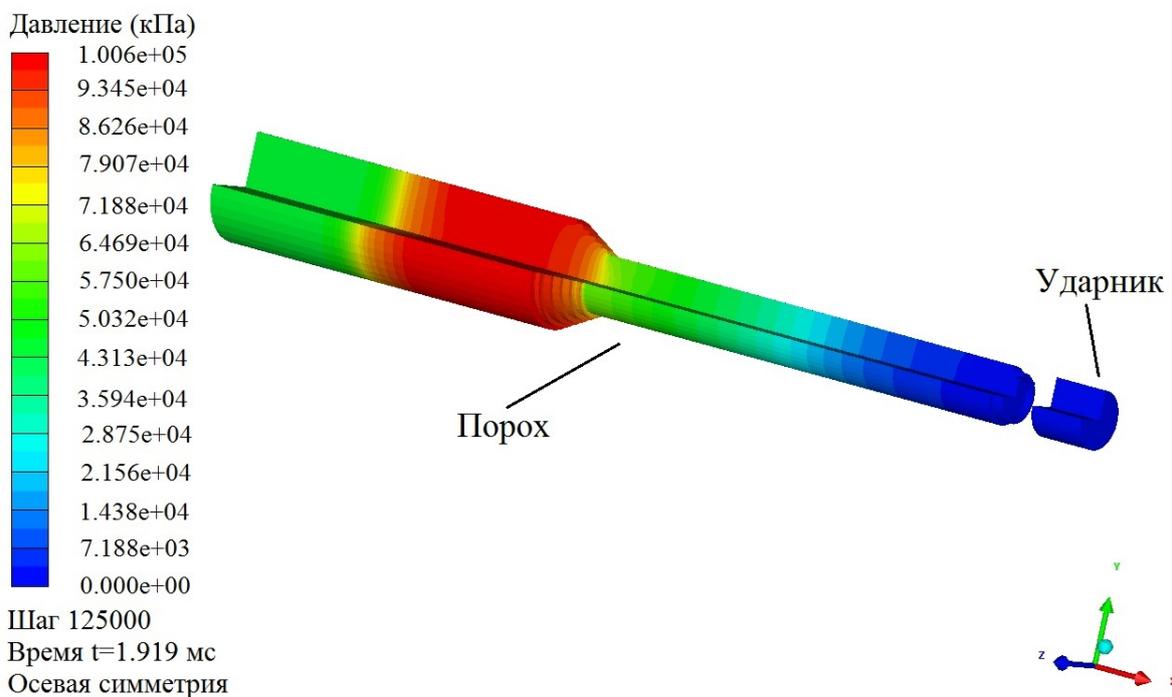
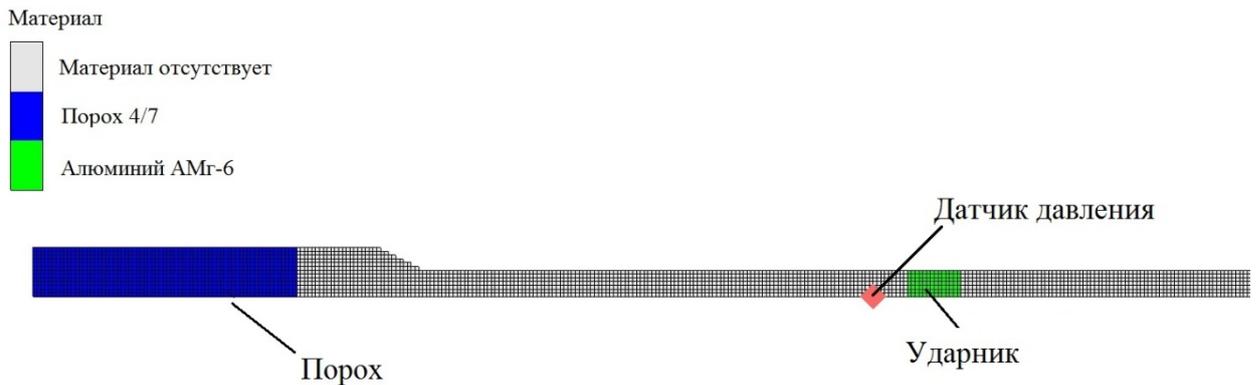


Рисунок 2.2.1 – Реализация алгоритма расчета на неподвижных сетках на примере i-й ячейки

Для моделирования процесса горения пороха и движения ударника по стволу была разработана математическая модель баллистической установки (БУ). Расчеты проводились в осесимметричной постановке в программном комплексе ANSYS Autodyn. На рисунке 2.2.2 представлена схема расчетной области Шаг расчетной сетки 1 мм. Для иллюстрации результатов расчетов на рисунке 2.2.3 показано распределение давления в стволе БУ в момент времени $t=1,919$ мс



Для проверки правильности вычисления исходных данных, необходимых в модели горения пороха, и подтверждения результатов расчета была проведена серия из 10 экспериментов на БУ, где продукты горения толкают ударник по стволу, соединенному с казенной частью, где происходит сгорание пороха. Схема установки представлена на рисунке 2.2.4.

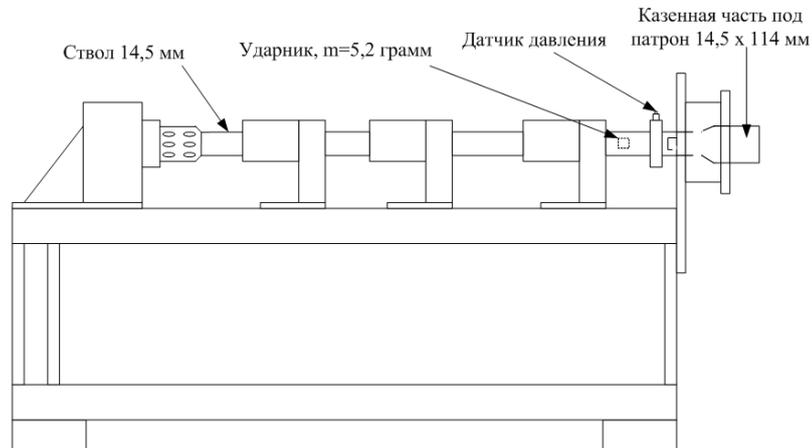


Рисунок 2.2.4 – Схема баллистической установки (БУ)

По результатам экспериментов, была 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. Максимальное значение измеренной амплитуды избыточного давления в казенной части ствола и средняя скорость ударника на выходе из ствола представлены в таблице 2.2.1.

Таблица 2.2.1 – Средние значения результатов испытаний на БУ

Масса пороха, m_{ave_p} , Г	Масса ударника, m_{ave_u} , Г	Скорость ударника, V_{ave} , м/с	Максимальное давление P_{ave} , МПа
32	5,2	1736	170

Сравнение результатов экспериментов и расчета представлены на рисунке 2.2.4.

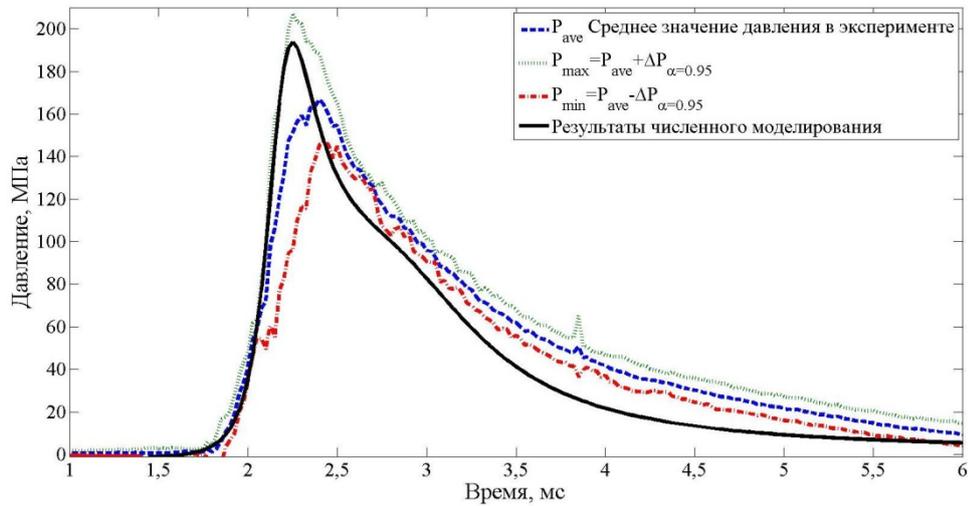


Рисунок 2.2.4 – Зависимости давления от времени (расчет и эксперимент)

Профиль скорости ударника на выходе из ствола представлен на рисунке 2.2.5.

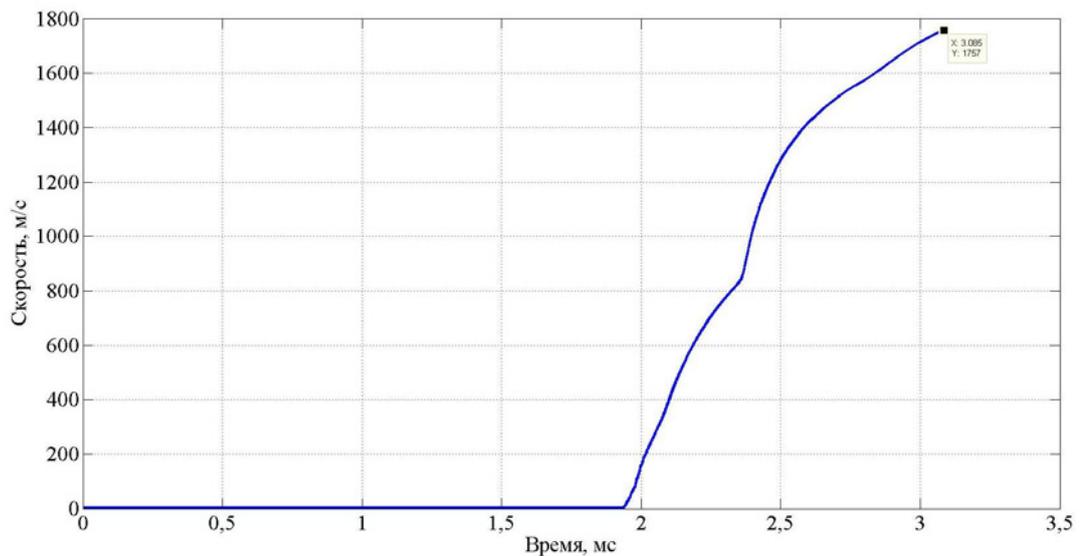


Рисунок 2.2.5 – Зависимость скорости ударника от времени

Проведенные расчеты показали хорошее соответствие с экспериментальными данными. Это является экспериментальным подтверждением предложенной методики определения исходных данных, используемых в модели горения пороха, и разработанной методики расчета скорости поршня в баллистических устройствах.

2.3. Определение исходных данных модели горения для патронов Д1-Д4

Баллистические характеристики пироксилинового пороха для стрелкового оружия представлены в таблице 2.3.1 [42].

Таблица 2.3.1 – Баллистические характеристики пороха

Q_w , ккал/кг	f , МДж/кг	α , м ³ /кг	u_1 , м ³ /(Н·с)
890	1,056	0,001	$1,03 \cdot 10^{-9}$

В соответствии с результатами вычислений коэффициентов согласно закону образования пороховых газов удельная энергия $E_g=0,74$ МДж/кг; константа $D=472$ кг/м³. Константы скорости воспламенения для четвертого уравнения системы (2.1.1) принимаются равными $C_1=100$ м/с и $C_2=0$ [42].

На рисунке 2.3.1 представлена экспоненциальная аппроксимация зависимости полного пиростатического давления P_g от плотности заряжания

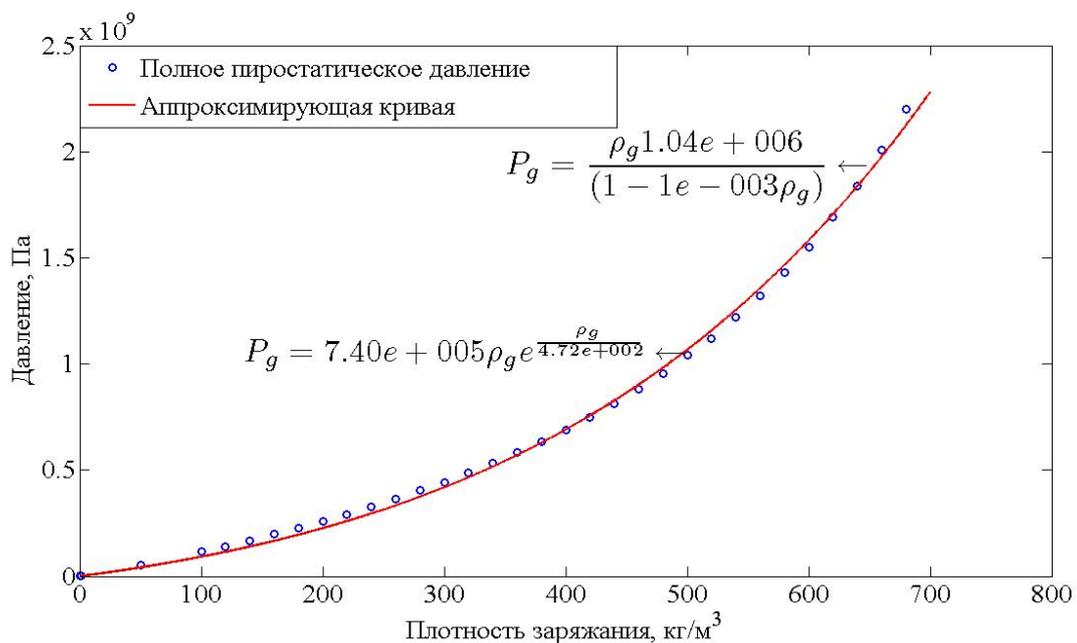


Рисунок 2.3.1 – Зависимость давления от плотности заряжания

Энергия на единицу объема $E_{g,r}$ определяется произведением удельной энергии на плотность заряжания. Для патронов Д1-Д4 плотность заряжания, и соответственно, энергия на единицу объема различны. В таблице 2.3.2 представлены характеристики формы и геометрические размеры порохового зерна в форме шара [48].

Таблица 2.3.2 – Геометрические размеры и характеристики формы зерна

Размеры, мм			Характеристики формы		
$2e_1$	$2b$	$2c$	χ	λ	μ
$2r$	-	-	3	-1	0,33

Используя (2.1.4) и (2.1.9), получим: $G=24$ 1/мм, $c=0,7342$ (при вычислении параметра c принималось давление $P_T=15$ МПа).

С помощью определенных ранее коэффициентов для давления пороховых газов и коэффициента скорости горения u_1 (Таблица 2.3.1), строится зависимость $U(P_g)$ (Рисунок 2.3.1).

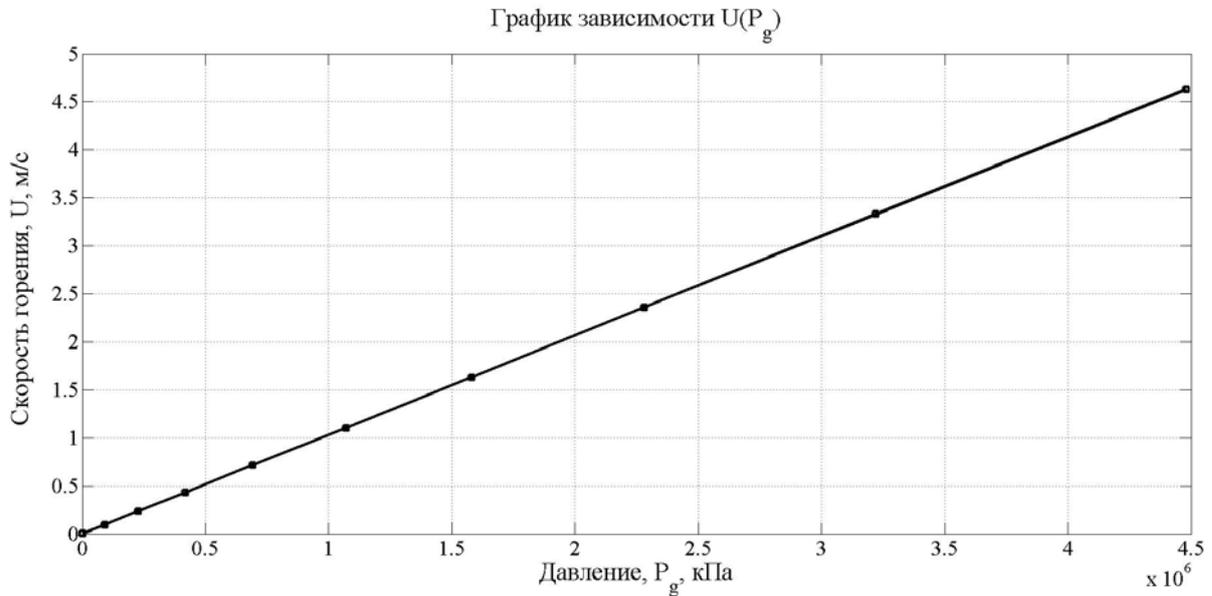


Рисунок 2.3.1 – Зависимость скорости собственного горения от давления пороховых газов

Зависимость показателя адиабаты пороховых газов от плотности заряжания, принимается постоянной: $\gamma(\rho_s)=1,27$ [41]. Исходные данные для модели горения пироксилинового пороха в промышленных патронах Д1–Д4, при различных плотностях заряжания, приведены в таблице 2.3.3.

Таблица 2.3.3 – Исходные данные для модели горения пироксилинового пороха

Параметр	Тип патрона			
	Д1	Д2	Д3	Д4
Плотность заряжания, кг/м ³	470	520	580	660
Уравнение состояния	Линейное			
Модуль объемного сжатия, ГПа	13,5			
Температура, К	293			
Уравнение состояния продуктов горения	Экспоненциальное			
Параметр G , 1/мм	24			
Параметр c	0,7342			
Параметр C_1 , м/с	100			

Параметр	Тип патрона			
	Д1	Д2	Д3	Д4
Параметр D, кг/м ³	0,472			
Энергия на единицу объема, кДж/м ³	$3,48 \cdot 10^5$	$3,85 \cdot 10^5$	$4,29 \cdot 10^5$	$4,89 \cdot 10^5$

Определенные по данной методике исходные данные для пороха были использованы для моделирования движения ударника УЛН по стволу и оценки скорости ударника на выходе из ствола, в случае использования различных патронов Д1–Д4.

2.4. Расчет скорости ударника для устройства локального нагружения

Для моделирования процесса горения пороха и движения ударника по стволу была разработана математическая модель устройства локального нагружения (УЛН). Постановка задачи и алгоритм расчета были изложены в разделе 2.2. На рисунках 2.4.1 и 2.4.2 представлены модель УЛН и профиль давления в момент времени $t=0,5155$ мс, соответственно. Шаг расчетной сетки 1 мм. Масса пороха и ударника соответствуют параметрам реального устройства.

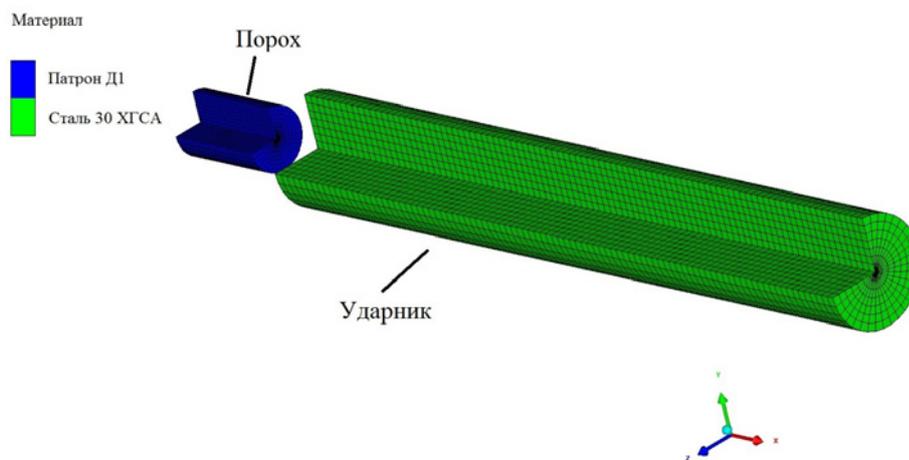


Рисунок 2.4.1 – Конечно-элементная модель УЛН

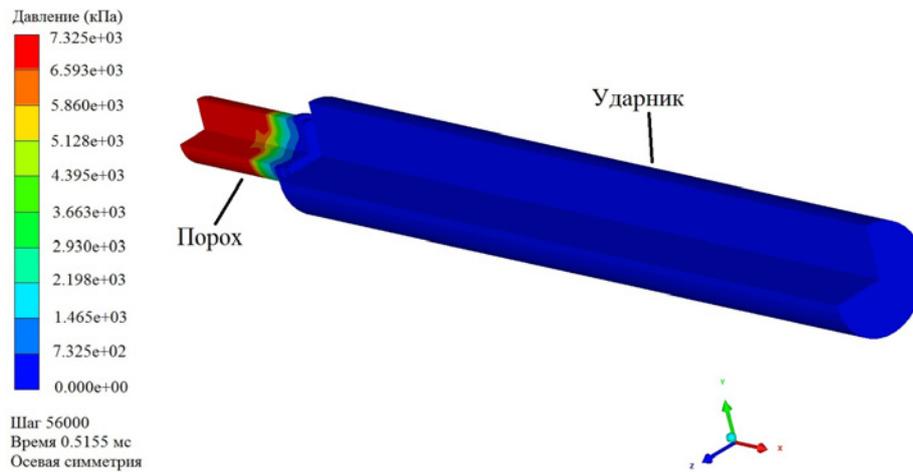


Рисунок 2.4.2 – Распределение давления в казенной части и стволе УЛН, $t=0,5155$ мс с момента начала горения пороха

На рисунке 2.4.3 представлены результаты численного расчета скорости ударника в стволе УЛН при использовании патронов Д1–Д4.

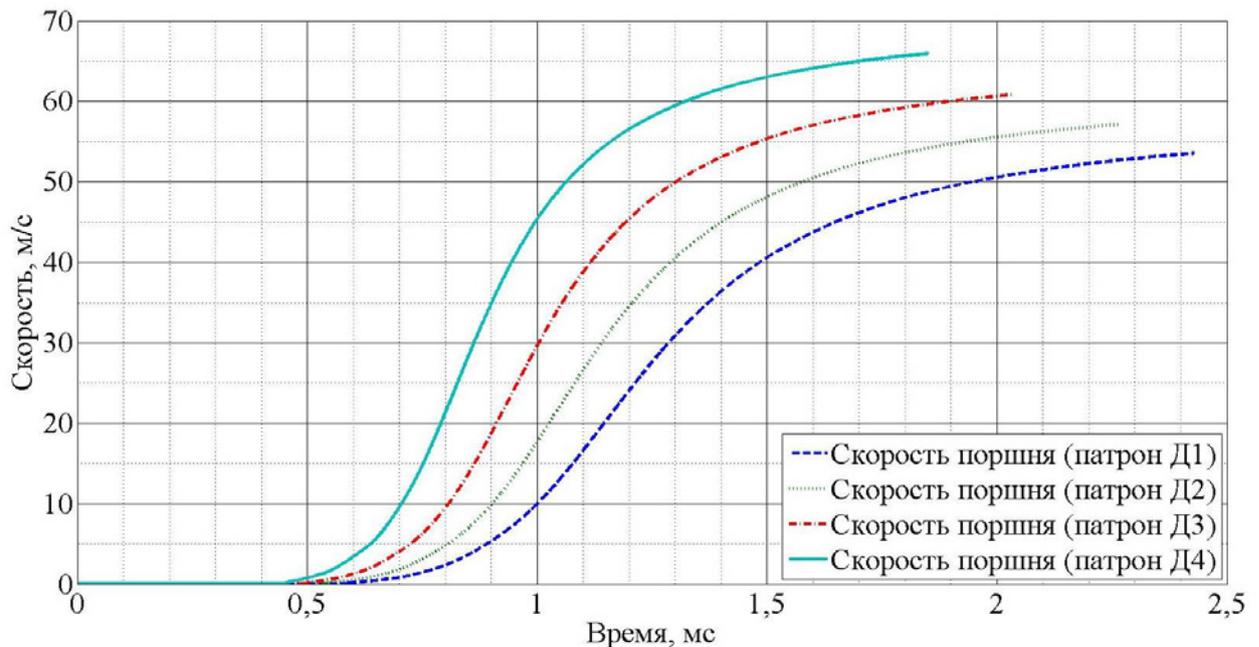


Рисунок 2.4.3 – Скорость поршня в стволе для патронов Д1–Д4

Результаты определения скорости ударников в конструкции УЛН далее использованы при численном моделировании ударно-волнового нагружения типовой конструкций РКТ, при имитации срабатывания штатных систем разделения (глава 3).

ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОУДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ОТРАБОТКЕ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВ ЛОКАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ

В данной главе рассматривается имитация виброударного нагружения от срабатывания штатных средств разделения с использованием УЛН на примере типовой конструкции – бака РН. Показано, что применение УЛН совместно с резинометаллическими демпферами позволяет моделировать виброударные нагрузки в окрестности срабатывания средств разделения с требуемой точностью. Подбор демпфирующего элемента требует большого объема отладочных испытаний на динамическом макете, а в случае испытаний летного изделия отладочные испытания не представляются возможными вовсе. В связи с этим, целесообразно проводить предиспытательное численное моделирование режимов нагружения и тем самым определять оптимальную конструкцию резинометаллического демпфера и соответствующий режим работы УЛН.

Численное моделирование разделяется на два этапа:

- на первом этапе решалась задача ударного-волнового взаимодействия ударника с демпфирующим элементом и определялось силовое воздействие $F(t)$ в узле крепления штатного средства разделения;
- на втором этапе полученное силовое воздействие $F(t)$ используется как исходная нагрузка для моделирования виброударного нагружения на примере конечно-элементной модели (КЭМ) типовой конструкции – бака РН.

3.1. Численное моделирование ударного нагружения фрагмента конструкции

Ниже излагается методика расчета локального ударного воздействия на конструкцию, которое реализуется при ударе поршня, ускоряемого пороховым зарядом УЛН через резинометаллическую демпфирующую прослойку. Реализуемая нагрузка зависит от упругих свойств испытываемой конструкции, которые должны быть учтены. Так как эффект воздействия нагрузки от

пиросредств на конструкцию носит локальный характер, особенно на интервале времени соударения, в расчет включается только часть нагружаемой конструкции, непосредственно примыкающая к месту удара – торцевой шпангоут корпуса. Основное внимание уделяется моделированию свойств материала демпфера. Результатом является силовое воздействие на шпангоут $F(t)$ в месте контакта с демпфером. Контроль нагружения осуществляется по графику УС, построенного по осциллограмме ускорения от времени регистрируемой с внутренней стороны шпангоута.

3.1.1. Модели материалов

Критическим элементом механического ударного устройства, формирующим амплитуды и длительности создаваемой нагрузки, является демпфер, который может иметь различную форму и включать в себя различные материалы. Применяемые в УЛН демпферы состоят 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 Джонсона–Кука [51] для определения напряжения на поверхности текучести и уравнения состояния Ми–Грюнайзена [52] для объемного сжатия:

$$\begin{cases} \sigma_y = [A + B \cdot (\bar{\epsilon}^{pl})^n] \cdot \left[1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \cdot (1 - \hat{\theta}^m) \\ p = \frac{\rho_0 \cdot c_0^2 \cdot \eta}{(1 - s \cdot \eta)^2} \cdot \left(1 - \frac{\Gamma_0 \cdot \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \cdot \rho \cdot E_m \end{cases} \quad (3.1.1)$$

где в первом уравнении системы $A, B, C, \dot{\epsilon}_0, n, m$ – параметры материала, определяемые экспериментальным путем; $\bar{\epsilon}^{pl}$ – эквивалентные пластические деформации; $\hat{\theta}$ – безразмерная температура, определяемая как:

$$\hat{\theta} = \begin{cases} 0 & \text{при } \theta < \theta_{transition} \\ (\theta - \theta_{transition}) / (\theta_{melt} - \theta_{transition}) & \text{при } \theta_{transition} \leq \theta \leq \theta_{melt} \\ 1 & \text{при } \theta > \theta_{melt} \end{cases}$$

где θ – текущее значение температуры; θ_{melt} – температура плавления материала; $\theta_{transition}$ – температура перехода, ниже которой напряжение текучести не зависит от температуры.

Во втором уравнении системы (3.1.1), p – давление; ρ_0 – начальная плотность; c_0, s – параметры линейного закона, связывающего скорость распространения ударной волны и массовую скорость (ударная адиабата); $\eta = l - \rho_0 / \rho$ – объемная деформация сжатия; Γ_0 – коэффициент Грюнайзена; E_m – удельная внутренняя энергия.

Для описания поведения резины при динамических деформациях используется гиперупругая модель, которая задается в форме полных напряжений и полных перемещений [53]. Система уравнений для гиперупругой модели резины записывается в виде:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\sigma} = p \cdot \mathbf{I} - \mathbf{S} \\ p = -\frac{\partial U}{\partial J} \\ \mathbf{S} = \frac{2}{J} DEV \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \bar{I}_1} + \bar{I}_1 \frac{\partial U}{\partial \bar{I}_2} \right) \bar{\mathbf{B}} - \frac{\partial U}{\partial \bar{I}_2} \cdot \bar{\mathbf{B}} \cdot \bar{\mathbf{B}} \right] \\ U = U(\bar{I}_1, \bar{I}_2, J) \end{cases}$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ – компоненты напряжений Коши, p – давление; \mathbf{I} – единичная матрица, $J = \det(\mathbf{F})$ – объемная упругая деформация (\mathbf{F} – градиент деформации), $\bar{\mathbf{B}} = J^{-2/3} \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T$, \bar{I}_1, \bar{I}_2 – первый и второй инварианты тензора деформации $DEV(\bullet) = (\bullet) - 1/3(\bullet) : \mathbf{I}$.

Известны различные формы потенциала энергии деформаций; наиболее простой и не требующий большого числа входных параметров материала – потенциал энергии деформации в форме Арруда–Бойса [66]:

$$U = \mu \cdot \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (\bar{I}_1^i - 3^i) + \frac{1}{D} \cdot \left(\frac{J^2 - 1}{2} - \ln J \right),$$

где

$$C_1 = \frac{1}{2}, C_2 = \frac{1}{20}, C_3 = \frac{11}{1050}, C_4 = \frac{19}{7000}, C_5 = \frac{519}{673750}, J = \det(\mathbf{F}),$$

λ_m – коэффициент деформаций записания, показывающий, при каких деформациях происходит резкое увеличение напряжения в материале. Начальный модуль сдвига μ_0 связан с текущим μ соотношением:

$$\mu_0 = \mu \cdot \left(1 + \frac{3}{5 \cdot \lambda_m^2} + \frac{99}{175 \cdot \lambda_m^4} + \frac{513}{875 \cdot \lambda_m^6} + \frac{42039}{67375 \cdot \lambda_m^8} \right).$$

Начальный модуль объемной деформации определяется как $K_0 = 2/D$.

Исходные данные по физико-механическим характеристикам материалов, необходимые для описания поведения стали (ударника) и алюминия (составная часть демпфера) в процессе ударного нагружения с использованием моделей материалов в форме 3.1.1, представлены в таблицах 3.1.1 и 3.1.2.

Таблица 3.1.1 – Параметры в уравнениях Ми–Грюнаизена [52]

Материал	Плотность, кг/м ³	Γ_0	Параметр c_0 , м/с	Параметр, s	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
Сталь	7750	2,17	4569	1,49	476
Алюминий	2785	2,00	5382	1,338	863

Таблица 3.1.2 – Параметры модели Джонсона–Кука [51]

Материал	A, МПа	B, МПа	n	Θ_{melt} , К	Θ_{trans} , К	m	C	1/c
Сталь	1539	477	0,18	1763	1000	1	0,012	1
Алюминий	337	343	0,41	1220	1000	1	0,01	1

Исходные данные по физико-механическим характеристикам резины представлены в таблице 3.1.3.

Таблица 3.1.3 – Параметры для модели Арруда–Бойса [54]

Материал	Плотность, кг/м ³	μ_0 , МПа	λ_m	D, 1/Па
Резина	1150	19,7	7.9	10^{-9}

3.1.2. Метод решения

Решение задачи динамического нагружения осуществляется методом конечных элементов (МКЭ), основанном на принципе виртуальных скоростей [53], [55]:

$$\int_V \boldsymbol{\Sigma} \cdot \delta \mathbf{D} dV = \int_S \mathbf{t}^T \cdot \delta \mathbf{v} dS + \int_V \mathbf{f}^T \cdot \delta \mathbf{v} dV, \quad (3.1.2)$$

где $\boldsymbol{\Sigma}$ – тензор напряжений Коши; $\mathbf{t} = \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Sigma}$ – распределенная нагрузка по поверхности S; \mathbf{f} – объемные силы, включающие силы инерции; $\delta \mathbf{v}$ – поле бесконечно малых виртуальных скоростей, удовлетворяющих, наложенным на систему кинематическим связям; $\delta \mathbf{D}$ – скорость виртуальных деформаций. Левая часть уравнения (3.1.2) представляет скорость изменения виртуальной работы внутренних сил и может быть заменена интегралом от скорости изменения виртуальной работы на единицу базового объема [53]:

$$\int_{V^0} \boldsymbol{\sigma} : \delta \boldsymbol{\varepsilon} dV^0 = \int_S \mathbf{t}^T \cdot \delta \mathbf{v} dS + \int_V \mathbf{f}^T \cdot \delta \mathbf{v} dV, \quad (3.1.3)$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ и $\boldsymbol{\varepsilon}$ сопряженная пара напряжений и деформаций в материале для рассматриваемой единицы базового объема. Выбор $\boldsymbol{\varepsilon}$ зависит от типа используемого конечного элемента.

Вектор перемещений для конечного элемента выражается через узловые перемещения с помощью функций формы:

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}^e \mathbf{u}^e, \quad (3.1.4)$$

где \mathbf{u}^e – вектора узловых переменных элемента сплошной среды в базисе пространственных координат {X,Y,Z}; \mathbf{N}^e – функции формы в локальном базисе параметрических координат конечного элемента {g,r,h}; \mathbf{u} – искомая функция перемещения в пределах конечного элемента в базисе пространственных

координат $\{X, Y, Z\}$. Поле бесконечно малых виртуальных скоростей $\delta \mathbf{v}$ представляется аналогично:

$$\delta \mathbf{v} = \mathbf{N}^e \delta \mathbf{v}^e. \quad (3.1.5)$$

Поле скоростей изменения виртуальных деформаций $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$ можно выразить через $\delta \mathbf{v}$:

$$\delta \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D} \delta \mathbf{v}, \quad (3.1.6)$$

где \mathbf{D} – матрица, состоящая из операторов дифференцирования по пространственным координатам $\{X, Y, Z\}$. С учетом (3.1.5) выражение (3.1.6) можно представить в виде:

$$\delta \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D} \mathbf{N}^e \delta \mathbf{v}^e = \mathbf{B} \delta \mathbf{v}^e, \quad (3.1.7)$$

где \mathbf{B} – матрица градиентов. Подставив (3.1.7) в уравнение равновесия (3.1.3) и учитывая, что $\delta \mathbf{v}$ – независимая переменная, получим систему нелинейных уравнений равновесия:

$$\int_{V^0} \mathbf{B}^e : \boldsymbol{\sigma} dV^0 = \int_S \mathbf{t}^T \cdot N^e dS + \int_V \mathbf{f}^T \cdot N^e dV. \quad (3.1.8)$$

Полученная система уравнений лежит в основе стандартного расчета методом конечных элементов в перемещениях. Объемные силы можно представить в виде:

$$\mathbf{f} = \mathbf{F} - \rho \ddot{\mathbf{u}}, \quad (3.1.9)$$

где \mathbf{F} – внешние силы; $\rho \ddot{\mathbf{u}}$ – силы инерции. После замены интегрирования по объему V_0 , V и поверхности S суммированием по элементам, с учетом уравнений (3.1.4)-(3.1.9) дискретный аналог системы (3.1.8) может быть представлен в виде:

$$[\mathbf{M}] \{\ddot{\mathbf{U}}\} = \{\mathbf{F}\} - \{\mathbf{I}\}, \quad (3.1.10)$$

где $[\mathbf{M}]$ – диагональная матрица масс; $\{\ddot{\mathbf{U}}\}$ – вектор ускорений узлов КЭ; $\{\mathbf{F}\}$ – векторы результирующих (внешних) узловых сил КЭ; $\{\mathbf{I}\}$ – векторы результирующих (внутренних) узловых сил в пространственной системе координат $\{X, Y, Z\}$. Система (3.1.10) численно интегрируется по центрально-разностной схеме вида:

$$\begin{cases} \dot{x}^{(i+1/2)} = \dot{x}^{(i-1/2)} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \cdot \ddot{x}^{(i)} \\ x^{(i+1/2)} = x^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \cdot \dot{x}^{(i+1/2)} \end{cases} .$$

Вычислительная эффективность явной схемы интегрирования обусловлена диагональностью матрицы масс элементов.

Шаг интегрирования по времени выбирается согласно критерию Куранта [56].

При использовании элементов сплошной среды, расчетная область разбивалась с использованием конечных элементов изопараметрического типа с кубическими функциями формы [57]. Используемые КЭ относятся к элементам первого порядка с редуцированной схемой интегрирования, позволяющие сократить время расчета и исключить нефизическое поведение – "запирание" элемента в случае использования практически несжимаемого материала (резины) [58].

Алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния методом МКЭ реализован в различных программных пакетах и может быть представлен блок-схемой, изображенной на рисунке 3.1.1.

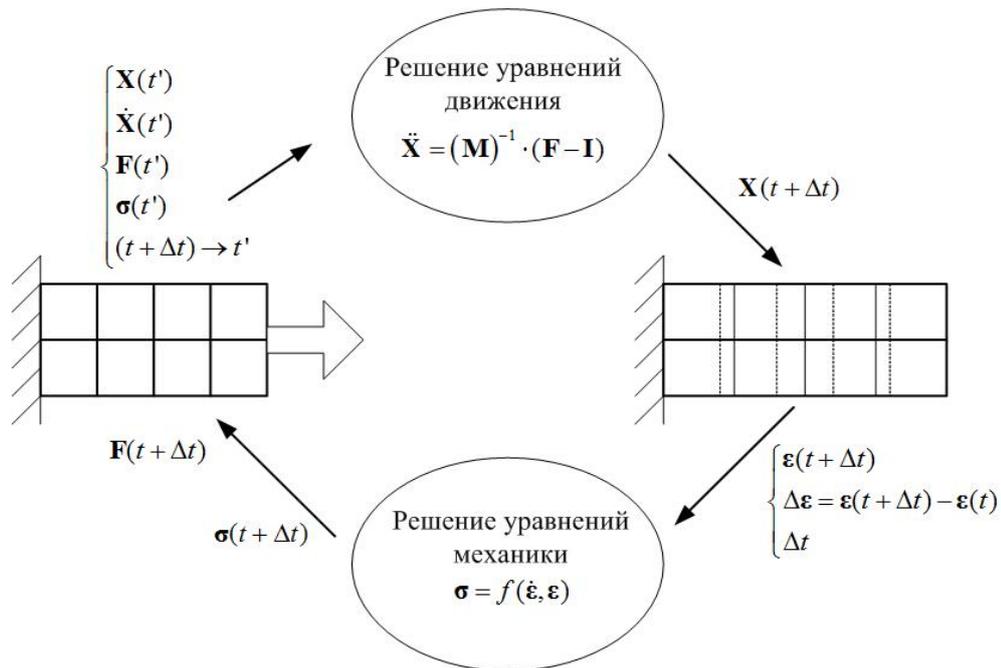


Рисунок 3.1.1 – Реализация алгоритма расчета методом МКЭ

3.1.3. Построение математической модели фрагмента конструкции

На первом этапе проводились расчеты ударно-волнового процесса. Расчетная область и КЭМ с плоскостью симметрии XOZ представлена на рисунке

3.1.2. 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.

Согласно модели “жесткого” контакта [53] контактное давление p между двумя поверхностями определяется как функция от взаимного проникания h контактирующих поверхностей друг в друга. Для определения $p=p(h)$ используется модель:

$$\begin{cases} p = 0 \text{ при } h < 0 \\ h = 0 \text{ при } p > 0. \end{cases} \quad (5.3.12)$$

В модели трения Кулона, предполагается, что относительное движение тел, находящихся в контакте отсутствует, если эквивалентное напряжение от трения

$$\tau_{\text{эк}} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}, \quad (5.3.13)$$

где τ_1 и τ_2 – ортогональные компоненты касательного напряжения на поверхности контакта, не превышает критического напряжения $\tau_{\text{крит}}$, которое пропорционально контактному давлению p

$$\tau_{\text{крит}} = \mu \cdot p, \quad (5.3.14)$$

где μ – коэффициент трения скольжения, одинаковый во всех направлениях и принимаемый 0,83 [59].

Расчетная модель реализована в программном комплексе ABAQUS с использованием 8-ми узловых шестигранных конечных элементов с редуцированной схемой интегрирования C3D8R. Отбрасываемая часть торцевого шпангоута и оболочки, находящихся вне расчетной области, заменяется на "полубесконечные" элементы CIN3D8R, для которых значение импеданса на свободной границе элемента равняется импедансу материала, что обеспечивает отсутствие отраженной волны.

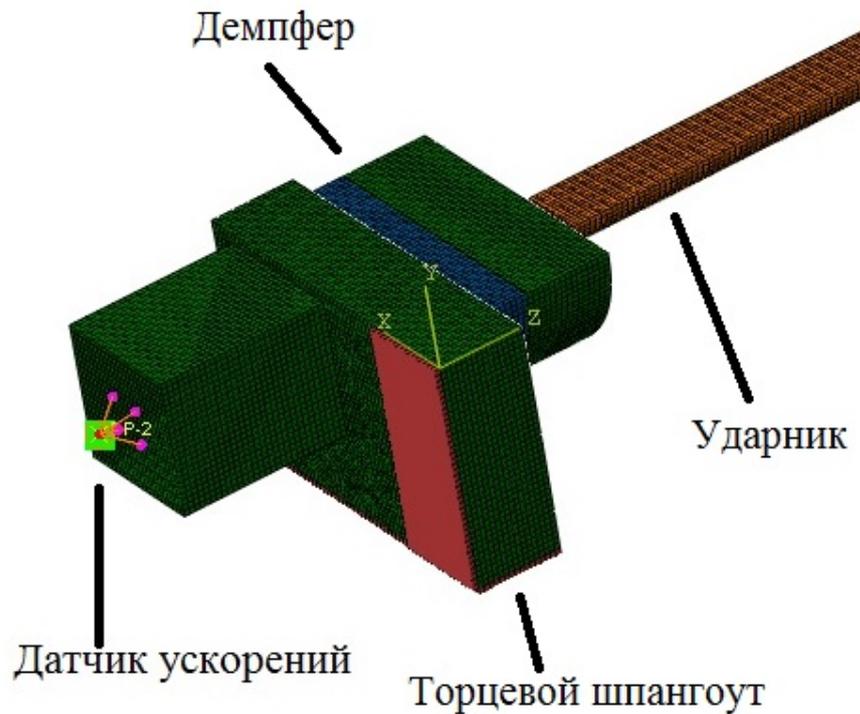


Рисунок 3.1.2 – Конечно-элементная модель механического ударника с фрагментом нагружаемой оболочки: конфигурация $t=0$ мс.

В точке RP-2, расположенной в плоскости XOY на кубе, регистрировались ускорения вдоль оси Z для последующего сравнения с экспериментальными данными. Для предотвращения эффекта «подмены частот», выходные данные (ускорение) сохранялись на каждом итерационном шаге. Для использования результатов моделирования в последующих расчетах регистрировалось контактное усилие $F(t)$ в месте контакта демпфера и торцевого шпангоута.

Количество расчетных элементов в модели 100343, количество узлов – 116222, характерный размер расчетного элемента – 1 мм. Длительность моделируемого процесса – 1 мс.

3.1.4. Результаты численного расчета ударной нагрузки

На рисунке 3.1.3 представлен результат расчета в моменты времени $t = 0,24$ мс и $t = 0,28$ мс.

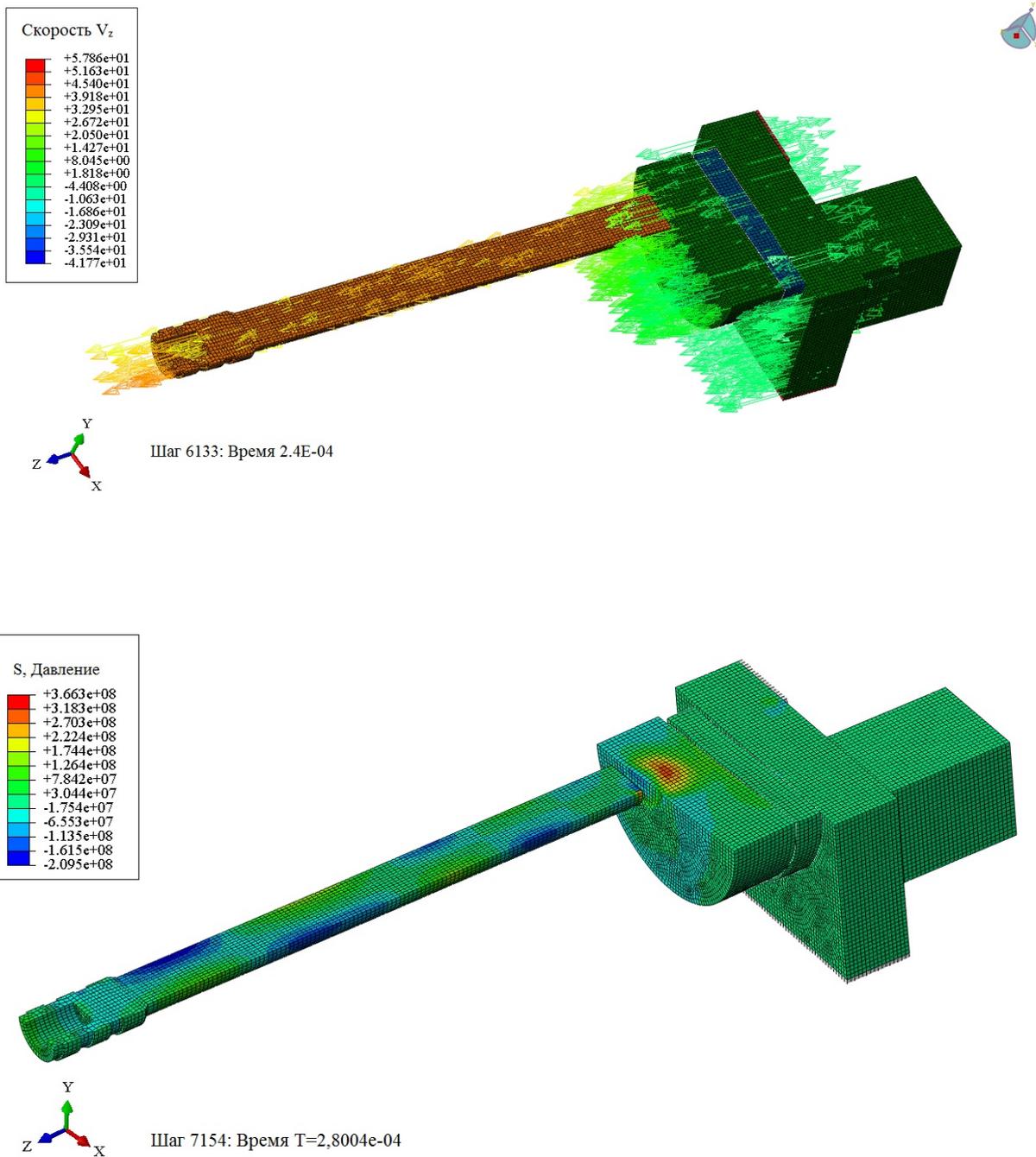


Рисунок 3.1.3 – Конечно-элементная модель механического ударника с фрагментом нагружаемого шпангоута; результаты расчета: $t=0,24$ мс (вверху), $t=0,28$ мс (внизу)

На рисунке 3.1.4 представлены результаты расчета для скорости ударника 50 м/с и экспериментальные данные. 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.

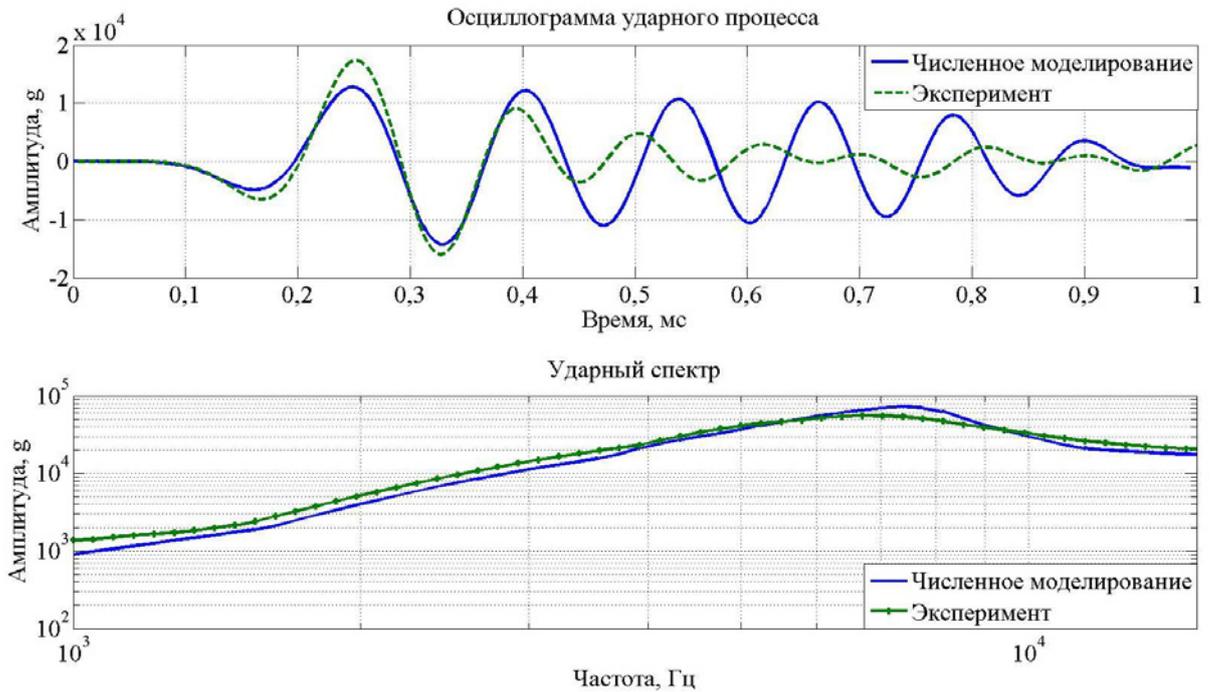


Рисунок 3.1.4 – Осциллограмма процесса в точке RP-2 и ударный спектр для первого этапа расчета

Из рисунка 3.1.4 видно, что активная фаза взаимодействия ударника с демпфером и, соответственно, нагружение оболочки составляет менее 0,3 мс, поэтому дальнейшее расхождение расчета с экспериментом не влияет на точность моделирования на втором этапе. График ударного спектра по амплитуде и частотному наполнению соответствует случаю ближней зоны, что характерно для процессов вблизи срабатывания пиротехнических средств разделения.

3.2. Численное моделирование виброударного нагружения конструкции

Полученное на предыдущем этапе силовое воздействие $F(t)$ используется для моделирования отклика конструкции на динамическую нагрузку. Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными. Контроль нагружения осуществляется по графику УС, построенного по осциллограмме ускорения, регистрируемой датчиком, расположенным на внешней поверхности бака РН.

3.2.1. Метод решения

Моделирование динамического отклика конструкции на примере бака РН осуществлялось с использованием МКЭ, подробно изложенного в разделе 3.1.2. Помимо КЭ сплошной среды, в расчете использовались КЭ изопараметрического типа, использующие допущения теории оболочек [60]. В современных расчетных пакетах реализованы соотношения теории Кирхгофа–Лява и Рейсснера–Миндлина для тонких и толстых оболочек соответственно. Выбор варианта теории для решения динамических задач определяется соотношением толщины фрагмента оболочки бака РН h и длины волны λ_{ch} соответствующей максимальной значимой частоты f_{ch} [53]:

$$\begin{cases} h \leq \frac{\lambda_{ch}}{15}, \text{ теория Кирхгофа-Лява} \\ h > \frac{\lambda_{ch}}{15}, \text{ теория Рейсснера-Миндлина.} \end{cases}$$

В рассматриваемой задаче толщина $h = 4 \cdot 10^{-3}$ мм, $f_{ch} = 10$ кГц, тогда:

$$\frac{\lambda_{ch}}{15} = \frac{1}{15} \cdot \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \pi}{f_{ch}}\right) \cdot \left(\frac{E \cdot h^2}{12 \cdot \rho_0 \cdot (1 - \nu^2)}\right)^{1/2}} = 4,2 \cdot 10^{-3}. \quad (3.2.1)$$

Выбор КЭ осуществлялся в предположении соизмеримости деформации изгиба и растяжения. Для определения полей деформации и перемещений внутри КЭ используются функций формы, удовлетворяющие условию непрерывности перемещений в узловых точках КЭ и между элементами [61].

3.2.2. Построение математической модели типовой конструкции

Конечно-элементная модель фрагмента оболочки с плоскостью симметрии YOZ и областью нагружения представлена на рисунке 3.2.2.

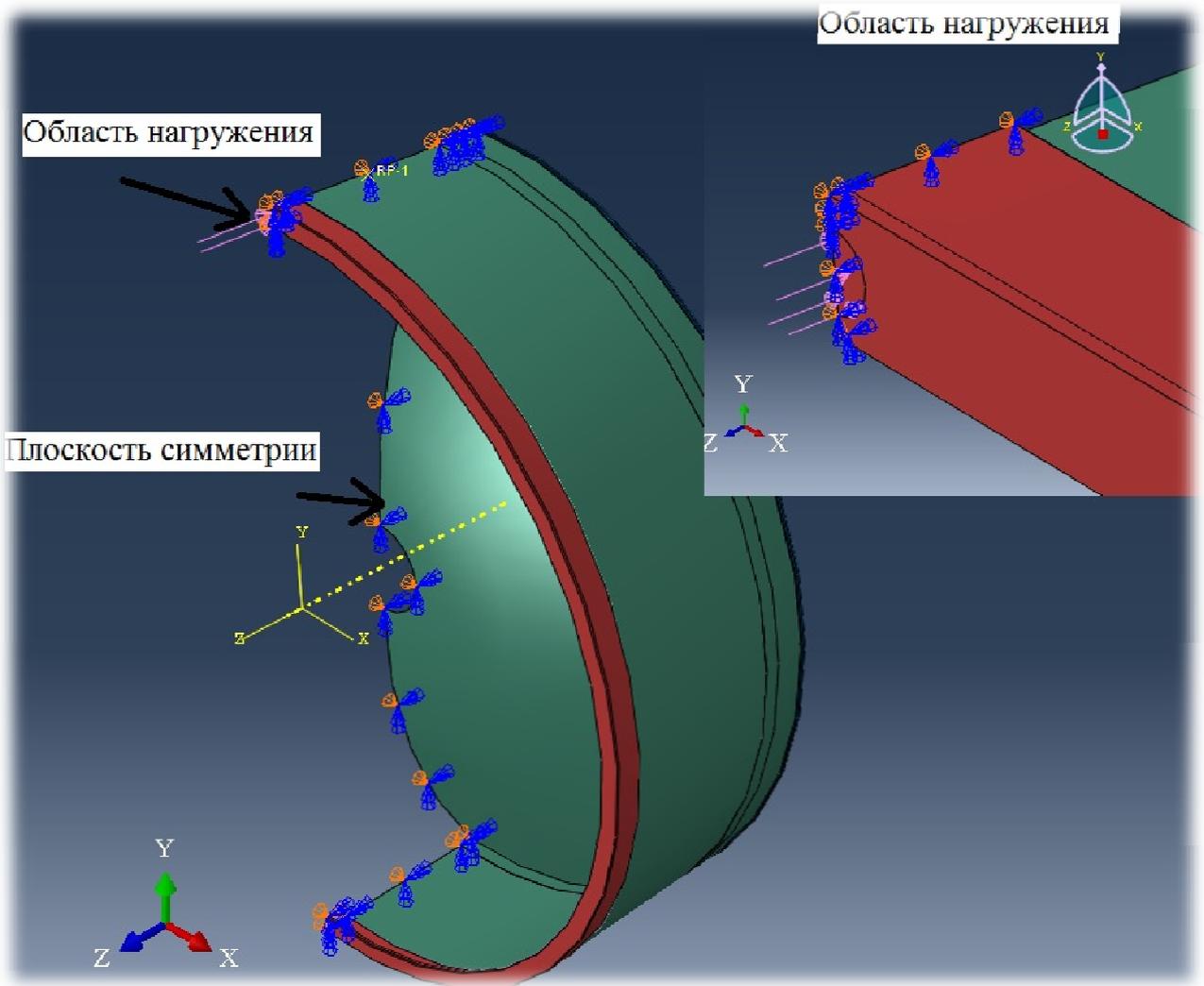


Рисунок 3.2.2 – Конечно-элементная модель бака РН

Расчетная модель была построена в программном комплексе ABAQUS с использованием:

- 8-ми узловых шестигранных КЭ типа C3D8R, с редуцированной схемой интегрирования и контролем за деформациями с нулевой энергией, для торцевого шпангоута бака РН;
- 4-х узловых оболочечных КЭ типа S4R, в случаях конечных мембранных деформаций с редуцированной схемой интегрирования и контролем за деформациями с нулевой энергией, для тонкостенной части бака РН (оболочки);
- "полубесконечными" КЭ типа CIN3D8R, для отбрасываемой части торцевого шпангоута и оболочки, находящихся вне расчетной области.

Элементы типа CIN3D8R задают значение импеданса на свободной границе элемента равное импедансу материала, тем самым в процессе расчета отсутствует отраженная ("паразитная") волна от свободной поверхности, вызванная исключенной частью расчетной области (Рисунок 3.2.3).

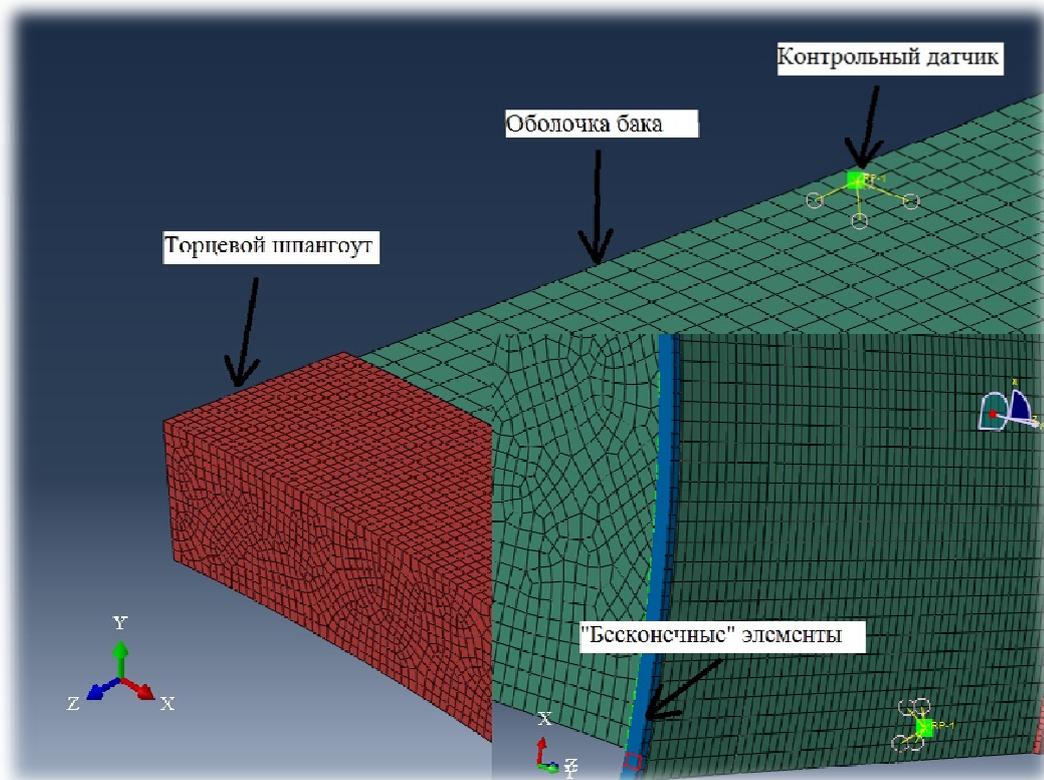


Рисунок 3.2.3 – Состав КЭМ бака РН

В процессе испытаний, для контроля нагружения регистрируются виброударные ускорения с использованием первичных преобразователей-акселерометров. Акселерометры, как правило, в количестве 3-х штук, крепятся через стальной монтажный куб, с гранью 20 мм, и расположены ортогонально друг к другу, образуя тем самым ортогональную систему координат $\{X, Y, Z\}$. Для учета наличия акселерометров и монтажного куба-переходника, в КЭМ бака РН, дополнительно вводятся соединительные элементы CONN3D2 в виде пирамиды с точечной массой M_a в вершине, где располагается центра масс исключенной из модели системы "монтажный куб – акселерометр" (Рисунок 3.2.3). На соединительные элементы накладываются граничные условия в виде равенства поступательных степеней свободы $U_a=U_b$ и сохранения базового расстояния L_{ab} между связанными узлами. Вращательные степени свободы не учитываются.

Физико-механические характеристики материала бака принимались стандартными для сплава АМг-6, расчет проводился с использованием упругой модели материала.

В качестве нагрузки принимается контактное усилие $F(t)$ вычисленное в месте контакта демпфера и торцевого шпангоута на предыдущем этапе расчета. Граничные условия выражают равенство кинематических параметров торцевого шпангоута и оболочки на линии их контакта.

Шаг конечно-элементной сетки (аппроксимация) выбирался из расчета не менее четырех КЭ на длину волны изгиба, соответствующую максимальной значимой частоте исследуемого процесса, которая согласно (3.2.1) 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, для торцевого шпангоута – 5 мм. Длительность моделируемого процесса 15 мс. Количество расчетных элементов в модели 129651, количество узлов - 93457.

3.2.3. Результаты численного моделирования виброударного нагружения типовой конструкции

На рисунке 3.2.4 представлены результаты численного моделирования отклика бак РН на динамическую нагрузку $F(t)$, характерную для режимов, воспроизводимых УЛН совместно с резинометаллическим демпфером.

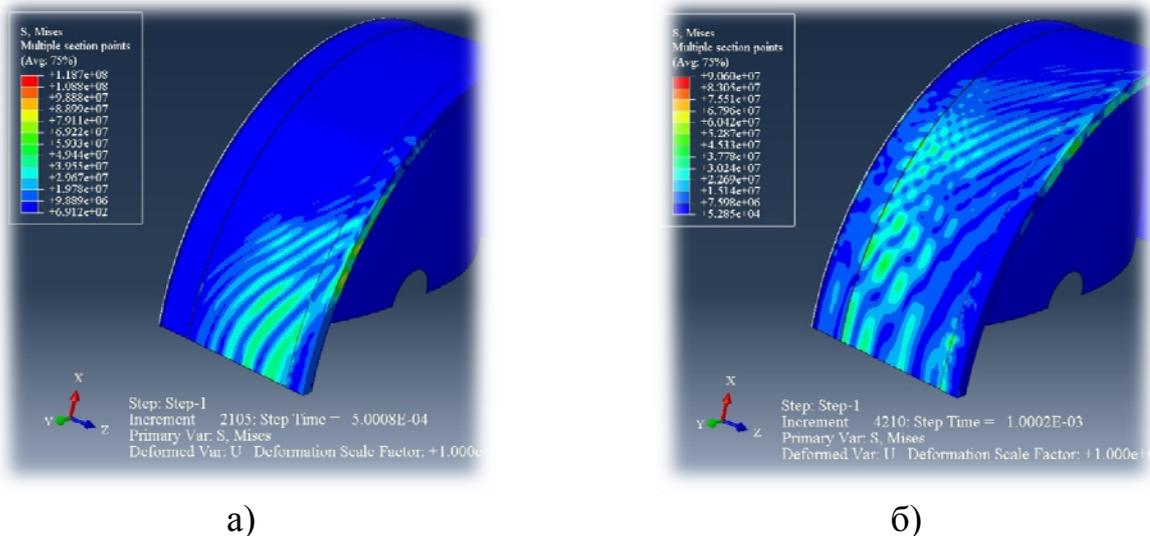


Рисунок 3.2.4 – Конечно-элементная модель бака РН. Результаты расчета: а) для $t=0,5$ мс б) для $t=1$ мс

На рисунке 3.2.5 представлены графики отклика конструкции на ударное нагружение и вычисленные ударные спектры ускорений по трем направлениям.

Для подтверждения достоверности результатов расчета с использованием разработанной методики необходимо проведение экспериментальных исследований. В качестве критерия достоверности принимается соответствие ударных спектров нагрузок, полученных в эксперименте и при численном моделировании.

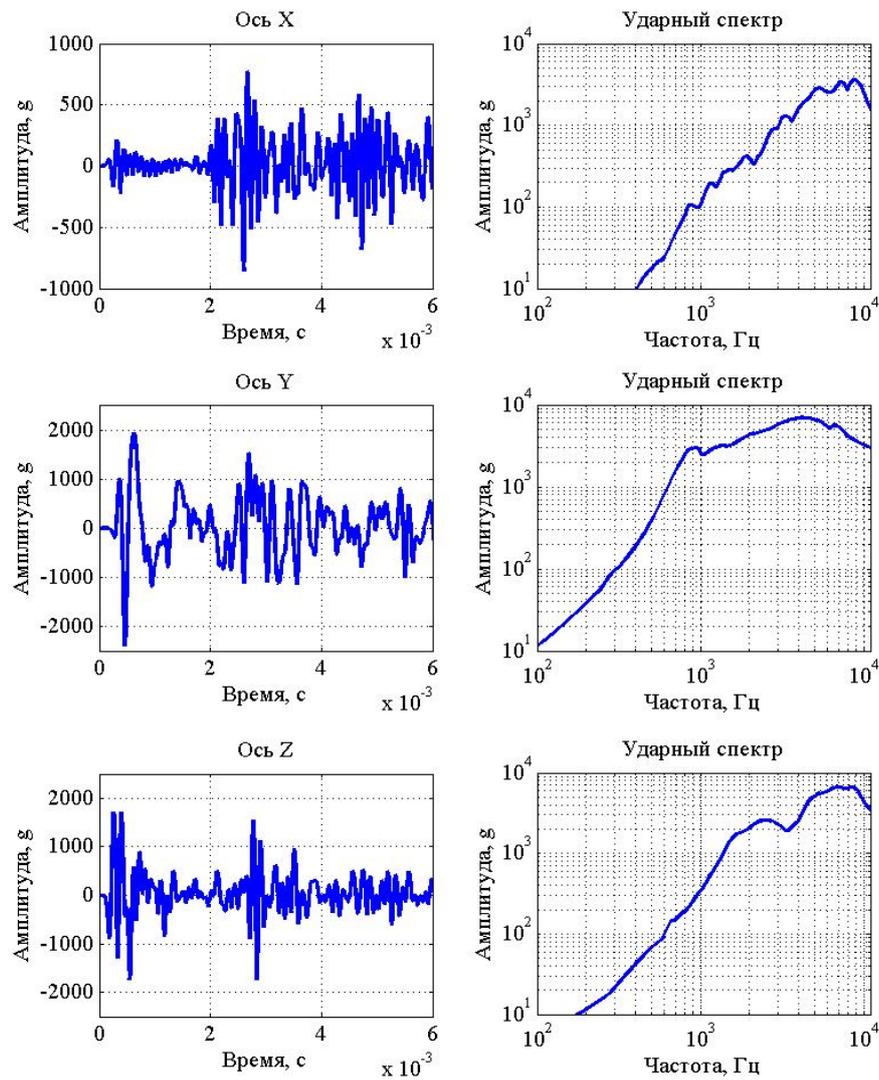


Рисунок 3.2.5 – Результаты численного моделирования

3.3. Экспериментальная отработка устройства локального нагружения

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, резинометаллический демпфер. Для ускорения поршня-ударника в УЛН использовался индустриальный патрон Д1. Регистрация виброударного ускорения осуществлялась с использованием ортогональной розетки датчиков виброударных ускорений типа PCB M350B23 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 3.3.1 представлены осциллограммы виброударных процессов и ударных спектров нагрузки полученных в эксперименте и при численном моделировании.

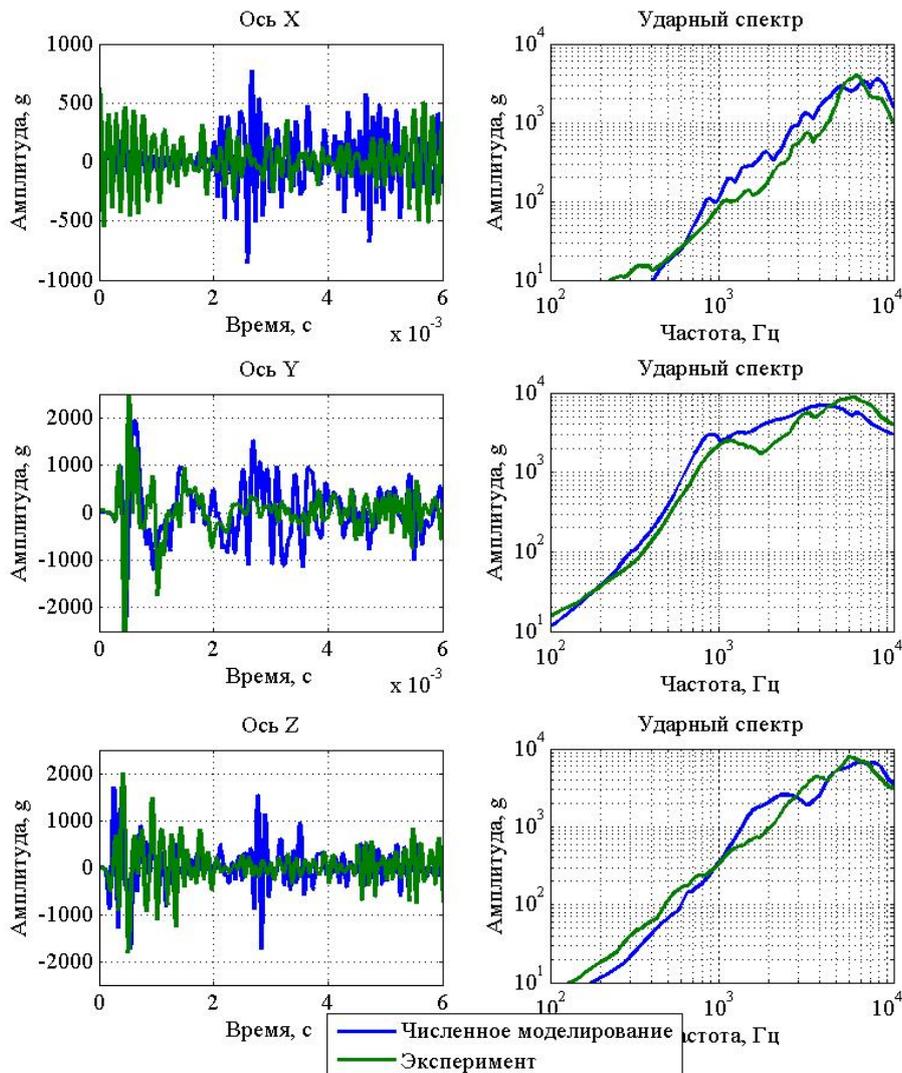


Рисунок 3.3.1 – Осциллограммы процессов и ударные спектры при численном моделировании и в эксперименте

Следует отметить наличие экстремальных значений ускорений в окрестности 1 и 7 кГц, что достаточно хорошо соответствует характерным пикам УС в условиях эксперимента. Расхождения на осциллограммах виброударных процессов можно объяснить тем, что математическая модель не учитывает наличия сварных швов и вафельной структуры оболочки. Учесть эти факторы сложно из-за отсутствия механических характеристик сварных швов при ударно-волновых процессах и из-за неприемлемого увеличения времени расчета.

ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА СТАЦИОНАРНОГО ВИБРОУДАРНОГО СТЕНДА

Задача численного моделирования нагружения распадается на две подзадачи. В данной главе рассматривается численное моделирование подрыва заряда ВВ и определение временного профиля и амплитуды результирующей силы (давления), сообщаемой взрывной камере стенда с учетом влияния демпфирующих прокладок. В последующей главе полученная расчетным путем нагрузка используется в конечно-элементной модели стенда для расчета и определения уровней перегрузок и режимов нагружения при испытаниях.

4.1. Исходные данные для численного расчета нагрузки от взрывного источника

На рисунке 4.1.1 представлена типовая конструкция нагружающего устройства, используемая при испытаниях на виброударном стенде взрывного действия. В состав устройства входит резина (типа ТМКЩ), вспененный полистирол (ПС-1-200) и листовое ВВ. Ниже представлен обзор используемых уравнений состояния для каждого материала, применяемого в конструкции взрывного устройства.

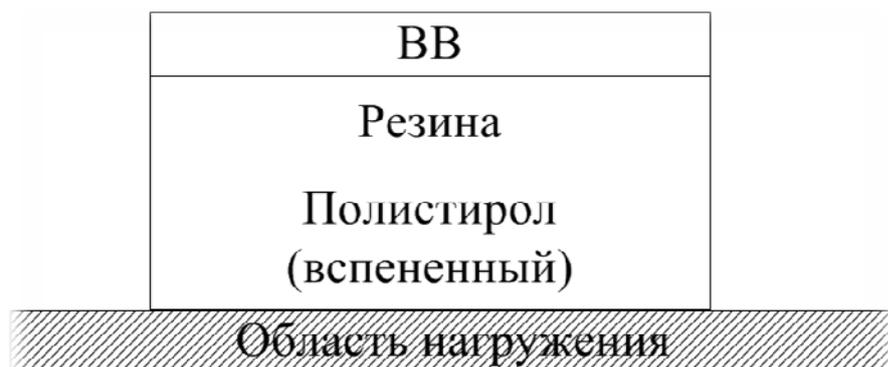


Рисунок 4.1.1 – Конструкция взрывного нагружающего устройства виброударного стенда

4.1.1. Уравнение состояния ВВ

Для описания процессов детонации ВВ и разлета продуктов взрыва широкое применение получило полуэмпирическое уравнение состояния продуктов детонации в форме Джонса–Вилкинса–Ли (JWL) [62]:

$$P=A \cdot \left(1-\frac{\omega \cdot \eta}{R_1}\right) \cdot e^{-\frac{R_1}{\eta}}+B \cdot \left(1-\frac{\omega \cdot \eta}{R_2}\right) \cdot e^{-\frac{R_2}{\eta}}+\frac{\omega \cdot E}{\eta}, \quad (4.1.1)$$

где A , B , R_1 , R_2 – константы, определяемые по экспериментальным данным; E – внутренняя энергия ВВ в единице объема; $\eta=\rho_0/\rho$, ρ_0 – начальная плотность ВВ, ρ – текущая плотность. Значения констант для различных типов ВВ приведены в [62]. При расчете работы импульсного устройства использовались физико-механические характеристики ВВ марки EL-500С, аналогичного тому, которое использовалось в эксперименте.

Таблица 4.1.1 – Параметры уравнения состояния для ВВ EL-500С

ρ_0 , кг/м ³	A , ГПа	B , МПа	R_1	R_2	$E \cdot 10^6$, кДж/м ³	D , м/с	ω
1480	349	4,524	4,1	1,2	6,2	7000	0,3

4.1.2. Уравнение состояние резины

В практике численных расчетов используется ударная сжимаемость (адиабата Гюгонио) [62]. На рисунке 4.1.2 схематически представлен фронт УВ, где U_s – скорость фронта УВ; U_p – массовая скорость частиц за фронтом УВ; T – температура; P – давление; ρ – плотность материала.

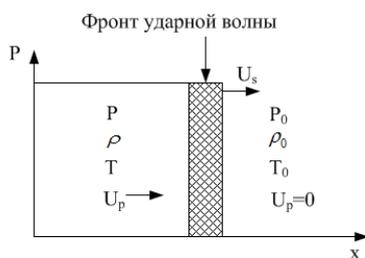


Рисунок 4.1.2 – Распространение фронта ударной волны в материале

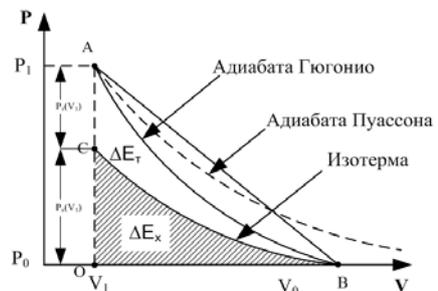


Рисунок 4.1.3 – Полное приращение внутренней энергии при ударном сжатии материала

Основные соотношения для материала на адиабате Гюгонио устанавливаются из условий сохранения массы, импульса и энергии.

Основные уравнения сохранения энергии:

- закон сохранения массы

$$\rho_0 U_s = \rho(U_s - U_p); \quad (4.1.2)$$

- закон сохранения энергии

$$E - E_0 = \frac{1}{2}(P + P_0)(V_0 - V); \quad (4.1.3)$$

- закон сохранения импульса

$$P - P_0 = \rho_0 U_s U_p. \quad (4.1.4)$$

При ударном нагружении вещества происходит приращение внутренней энергии и температуры. Полное приращение температуры, численно равное площади треугольника OAB, разделяется на холодную и тепловую составляющие: ΔE_x , ΔE_m . При давлениях не более 10 ГПа [63] отклонение адиабаты Гюгонио от изотермы незначительно и тепловой составляющей можно пренебречь. В дальнейшем используется наиболее употребительная модель Грюнайзена, устанавливающая связь между давлением при изменении энергии системы при постоянном объёме

$$\Gamma = V \left(\frac{dP}{de} \right)_V, \quad (4.1.5)$$

где Γ – коэффициент Грюнайзена. Проинтегрировав выражение (4.1.5), в предположении линейной зависимости давления от внутренней энергии:

$$P - P_0 = \frac{\Gamma}{V}(e - e_0),$$

где P_0 и e_0 – давление и удельная внутренняя энергия в исходном состоянии соответственно.

Система уравнений (4.1.2–4.1.4) замыкается зависимостью скорости фронта от массовой скорости частиц за фронтом ударной волны, обычно принимаемой в виде:

$$U_s = C_0 + S \cdot U_p, \quad (4.1.6)$$

где C_0 , S – экспериментально определяемые константы. Из уравнения (4.1.6) и (4.1.2–4.1.4) следует уравнение ударной адиабаты в форме:

$$P_H = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu}{(1 - S\mu)^2}$$

$$E_H = \frac{P_H \mu}{2\rho_0} \quad (4.1.7)$$

$$\mu = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} = 1 - \frac{V}{V_0} = \frac{U_p}{U_s},$$

где P_H – давление Гюгонио, E_H – удельная внутренняя энергия (на единицу массы) Гюгонио.

Характеристики полимерных материалов в условиях высоких скоростей деформаций претерпевают изменения; так у резины, практически несжимаемой в статике, при ударном нагружении коэффициент Пуассона снижается от 0,4998 до 0,36 [64]. При численном моделировании для резины при ударном сжатии используется описанная выше модель с характеристиками, представленными в таблице 4.1.2.

Таблица 4.1.2 – Физико-механические характеристики для резины типа ТМКЦ [64, 65]

Плотность кг/м ³	C_0 м/с	S	Γ	G , МПа	S_{\max} , МПа
1340	1500	2,83	1,1	2	100

4.1.3. Уравнение состояния пористых материалов

В конструкцию взрывных устройств входит пористый материал – вспененный полистирол. Для описания процессов динамического сжатия и распространения ударных волн в пористых материалах предложено уравнение состояния в форме P - α [66]:

$$P = P(\alpha, \rho, E) = \frac{P_s(\alpha, \rho, E)}{\alpha}, \quad (4.1.8)$$

где $\alpha = V_s/V_p$ – коэффициент пористости; V_p – объем пористого материала; V_s – объем исходного материала без пор; E – внутренняя энергия на единицу объема; индекс s соответствует параметрам исходного материала.

Состояние пористого материала описывается уравнением:

$$\alpha = A(P, P_t, P_{max}), \quad (4.1.9)$$

где, P_t – производная давления по времени. Если $P_t > 0$ то происходит сжатие материала, при $P_t < 0$ – разгрузка. P_{max} – максимальное давление, которое способен выдержать материал до возникновения пластических деформаций. Характерный график функции $A(P, P_t, P_{max})$ представлен на рисунке 4.1.4.

При $\alpha > 1$ скорость звука в пористом материале определяется как

$$c = c_s + (c_e - c_s) \cdot \frac{\alpha - 1}{\alpha_0 - 1}, \quad (4.1.10)$$

где c_s и c_e скорость звука в сплошном и пористом материалах соответственно..

Согласно данной модели сжатие и разгрузка пористого материала происходит в несколько этапов (рисунок 4.1.4): упругие деформации вдоль прямой A_{el} до момента достижения давлением величины P_e , пластические деформации вдоль A_{pl} при давлении $P > P_e$, разгрузка по прямой A_{el}^B . Повторная нагрузка материала происходит по пластической области. При последующем нагружении материала, если $P > P_{max}$, материал находится в пластической области, иначе работает упругая модель.

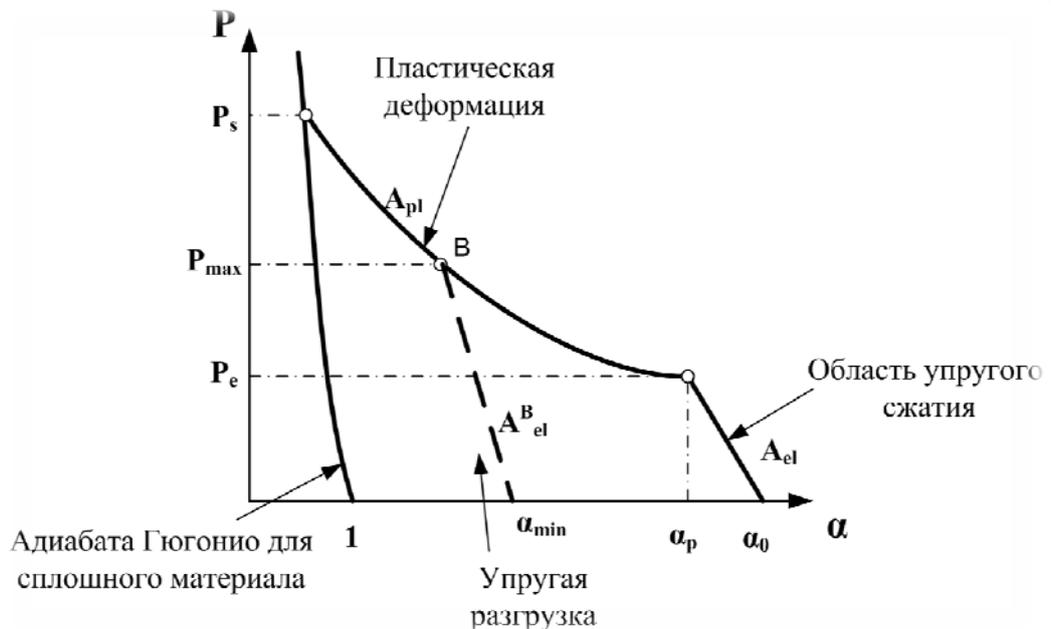


Рисунок 4.1.4 – Модель P - α для описания процесса сжатия пористого материала.

Следовательно, деформирование материала происходит согласно следующему правилу:

$$\alpha = A(P, \alpha_{min}) = \begin{cases} A_{pl}(P), & \text{если } A_{pl}(P) \leq \alpha_{min} \\ A_{el}(P, \alpha_{min}). \end{cases} \quad (4.1.12)$$

Упругость:

$$A_{el}(P, \alpha_{min}) = \alpha_{min} + \frac{d\bar{A}_{el}(\alpha_{min})}{dP} (P - P_{pl}(\alpha_{min})). \quad (4.1.13)$$

Пластичность:

$$A_{pl}(P) = 1 + (\alpha_e - 1) \cdot \left(\frac{P_s - P}{P_s - P_e} \right)^2. \quad (4.1.14)$$

Уравнение состояние в форме P- α (4.1.10–4.1.14) решается совместно с уравнением состояния Ми–Грюнайзена и параметрами ударной адиабаты, соответствующей исходному (при отсутствии пор) материалу. Численная реализация решения представлена в [67].

Таким образом, для описания поведения пористого материала в расчетном пакете ANSYS Autodyn необходимо задать следующие физико-механические свойства материала:

- начальная плотность пористого материала – ρ_0 ;
- скорость звука в продольной волне для пористого материала – C_0 ;
- максимальное давление для упругой зоны пористого материала – P_e ;
- максимальное давление (при $\alpha=1$) – P_s ;
- параметры адиабаты для сплошного материала – A, B, Γ_0 .

В таблице 4.1.3 приведены физико-механические характеристики для твердого и вспененного полистирола.

Давления P_e и P_s (рисунок 4.1.4) вычисляются по формуле:

$$P = \frac{1 + \nu}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \cdot \sigma_{HEL}. \quad (4.1.15)$$

Таблица 4.1.3 – Физико-механические характеристики для твердого и вспененного полистирола

Материал	Скорость звука, м/с	Предел прочности σ_{HEL} , МПа	Давление в упругой зоне P_{HEL} , МПа	Коэффициент Пуассона, ν	Ударная адиабата		
					A, м/с	B	Γ_0
Полистирол [59]	2350	100	150	0,35	2746	1,319	1,18
Вспененный полистирол	1500	7,6	11,4	0,35	-	-	-

4.1.4. Уравнение состояние стали

При верификации расчетной методики для стали использовалась упругая модель поведения материала. Физико-механические характеристики представлены в таблице 4.1.4 [59].

Таблица 4.1.4 – Физико-механические характеристики стали

Материал	Модуль объемного сжатия K, ГПа	Модуль сдвига G, ГПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³
Сталь	175	81	0,3	8129

4.2. Численное моделирование ударно-волнового нагружения пакета материалов

На первом этапе, который может рассматриваться, как верификация, подтверждается правильность численного расчета при подрыве заряда ВВ на основе сравнения с существующими надежными аналитическими расчетами. В качестве критерия принята величина удельного импульса, сообщаемого поверхности нагружения при подрыве ВВ (рисунок 4.2.1) [69]:

$$i = \frac{8}{27} \rho_0 l D , \quad (4.2.1)$$

где i – удельный импульс при отражении детонационной волны от жесткой стенки, ρ_0 – плотность ВВ; l – толщина ВВ; D – скорость детонационной волны в ВВ.

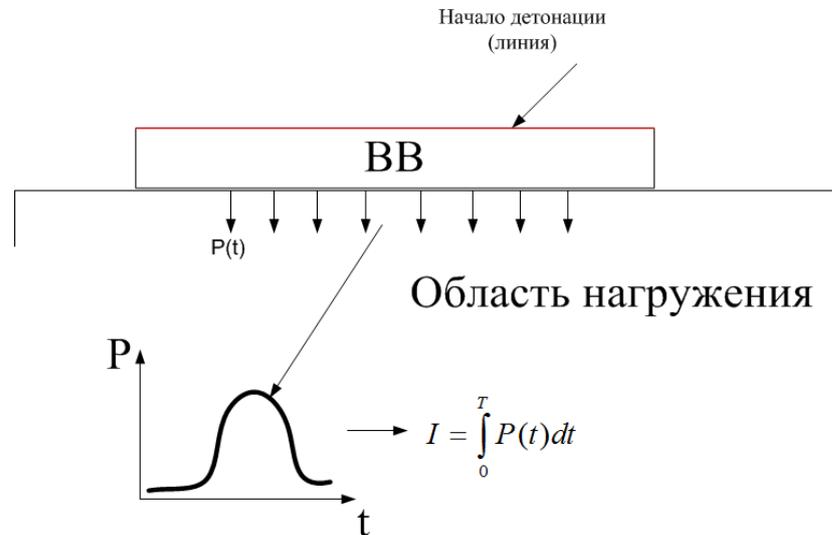


Рисунок 4.2.1 – К расчету полного импульса от подрыва ВВ

Формула 4.2.1 получена в одномерном приближении; для ее обобщения на трехмерный случай дополнительно вводят понятие активной массы заряда m_a – массу продуктов детонации, которые разлетаются по нормали к нагружаемой поверхности. Удельный импульс открытого цилиндрического заряда с учетом активной массы заряда, равен [62]:

$$i = \frac{8}{27} D \rho_0 l \left(\frac{4}{9} - \frac{8}{81} \frac{l}{r_0} + \frac{16}{2187} \frac{l^2}{r_0^2} \right), \text{ при } l < \frac{9}{2} r_0 \quad (4.2.2)$$

$$i = \frac{16}{81} D \rho_0 r_0, \quad \text{при } l \geq \frac{9}{2} r_0,$$

где r_0 – начальный радиус заряда. Для расчета удельного импульса на стенд взрывного действия следует применять первое уравнение 4.2.2, поскольку высота заряда всегда много меньше радиуса основания ($l \sim 1$ мм, $r_0 \sim 25$ мм). При этом весь импульс передается плите за короткий промежуток времени [62]:

$$\tau \approx 2l / D. \quad (4.2.3)$$

На втором этапе проверяется правильность выбранных физико-механических параметров для уравнений состояния материалов демпфирующего пакета: в данном случае резины ТМКЩ и вспененного полистирола. Критерием

точности моделирования является время прихода, амплитуда и профиль скорости фронта ударной волны, а также удельный импульс, сообщенный нагружаемой поверхности. Эти данные получают экспериментально, поэтому второй этап можно рассматривать как валидацию методики.

4.2.1. Метод решения

Численное моделирование ударно-волнового нагружения пакета материалов осуществлялось с использованием МКЭ и метода сглаженных частиц (SPH). Схема применения МКЭ подробно изложена в главе 3. Численное моделирование выполнялось в двух- и трехмерной постановке. В первом случае использовались 4-х узловые плоские элементы с билинейной функцией формы и редуцированной схемой интегрирования в центральной точке КЭ [57]. Как и ранее, контактное взаимодействие в расчетной области осуществлялось с использованием метода жесткого контакта – для нормальной компоненты и изотропной модели трения Кулона – для касательной компоненты.

Применение метода сглаженных частиц (SPH) обусловлено его высокой точностью моделирования распада-разрыва на фронте детонационной волны по сравнению с сеточными методами. В процессе моделирования решаются представленные в разделе 2 уравнения сохранения массы, импульса и энергии, где производные вычисляются с помощью сплайн-интерполяции по точкам (сглаженным частицам), в которых задаются параметры деформируемой среды. С помощью интерполяционных функций, для которых сглаженные частицы являются точками интерполяции, вычисляется решение во всей области интегрирования [70].

Моделирование проводится в программных пакетах ANSYS Autodyn и ABAQUS Explicit. Для отдельных расчетных задач, с целью повышения точности моделирования использовались две КЭМ, построенные в программных пакетах ANSYS Autodyn (4.2.14) и ABAQUS Explicit (4.2.15).

4.2.2. Верификация методики численного моделирования

Для обоснования правильности расчетов проведен ряд численных экспериментов. Полученные при расчете интегральные величины давления сравнивались с аналитическими значениями согласно (4.2.1). Для ВВ использованы уравнения состояния в форме (4.1.1) с параметрами материала, приведенными в таблице 4.1.1. Размеры заряда ВВ: $l=30$ мм, $r=10$ мм. Граничные условия для моделирования жесткой стенки и одномерного приближения соответствовали отсутствию перемещения вдоль осей OX и OY (Рисунок 4.2.2). Ось симметрии проходит вдоль оси OX . В точках 1–6 регистрировались профили давления во времени.

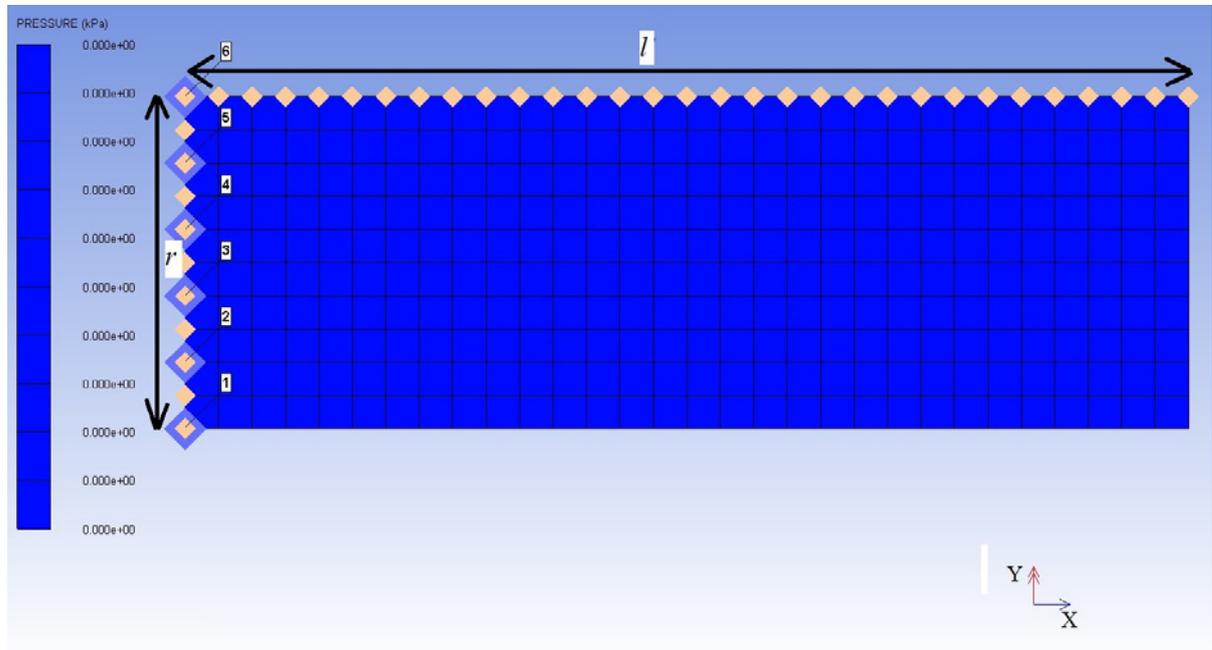


Рисунок 4.2.2 – Исходное состояние для расчета удельного импульса на жесткую стенку в одномерном приближении ($t=0$)

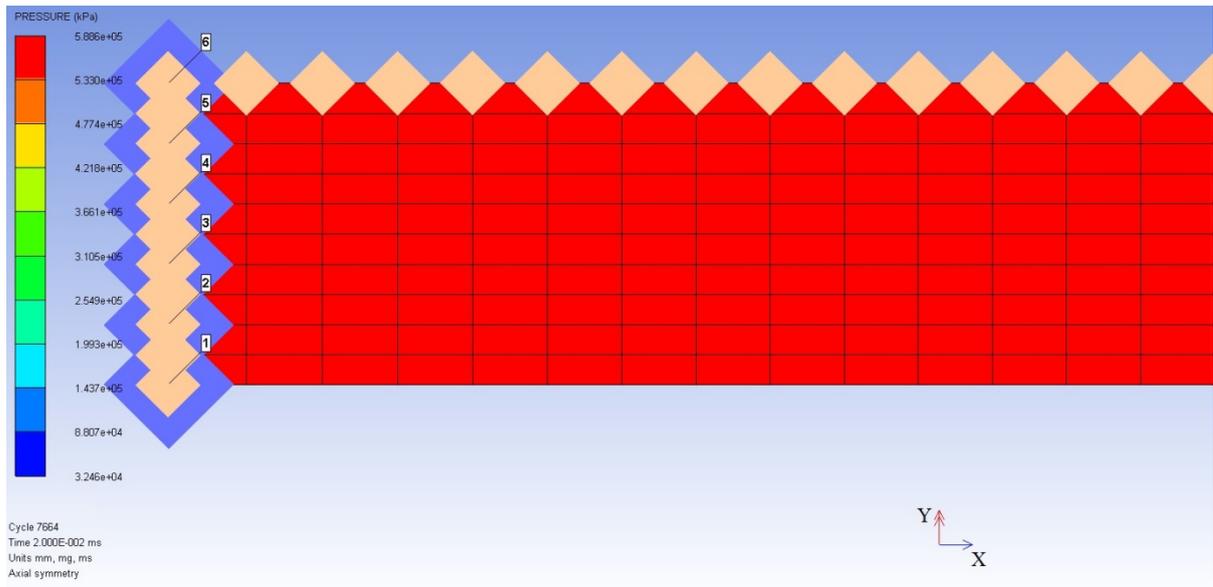


Рисунок 4.2.3 – Расчет удельного импульса на жесткую стенку в одномерном приближении ($t=20$ мкс)

Профиль давления на жесткую стенку представлен на рисунке 4.2.4.

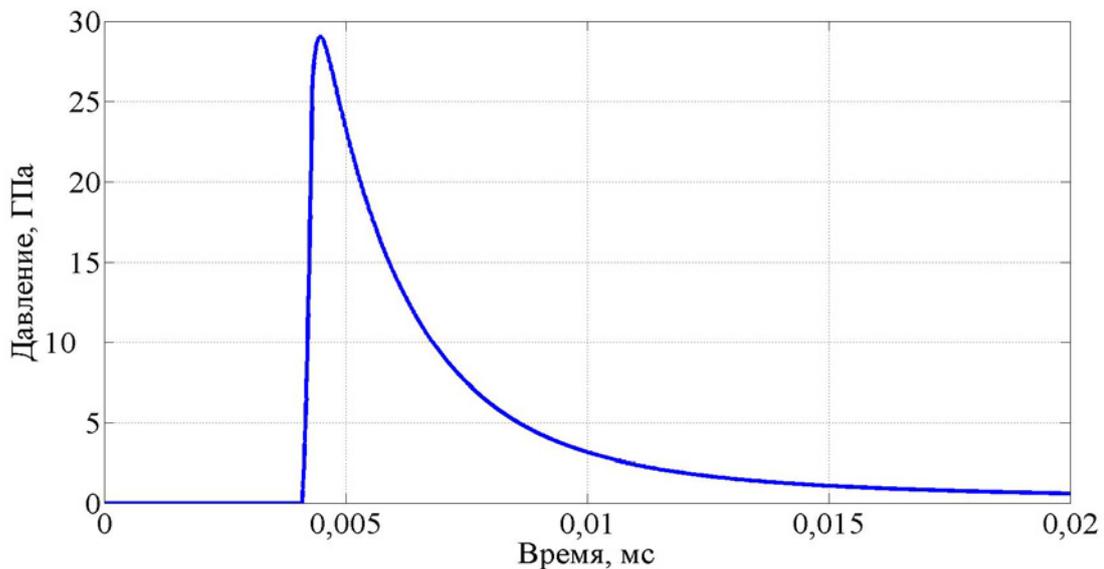


Рисунок 4.2.4 – Профиль давления на жесткую стенку

Аналитическое выражение (4.2.1) дает величину удельного импульса $i_A=92 \cdot 10^3$ кг/(м·с). Численный результат – $i_p=80 \cdot 10^3$ кг/(м·с). Полный импульс $I_A=28,93$ кг·м/с и $I_p=25,13$ кг·м/с для аналитического и численного расчета соответственно.

На рисунках 4.2.5–4.2.6 представлена модель заряда с осевой симметрией и свободным граничными условиями вдоль оси OY, что соответствует расчету удельного импульса с учетом активной массы заряда.

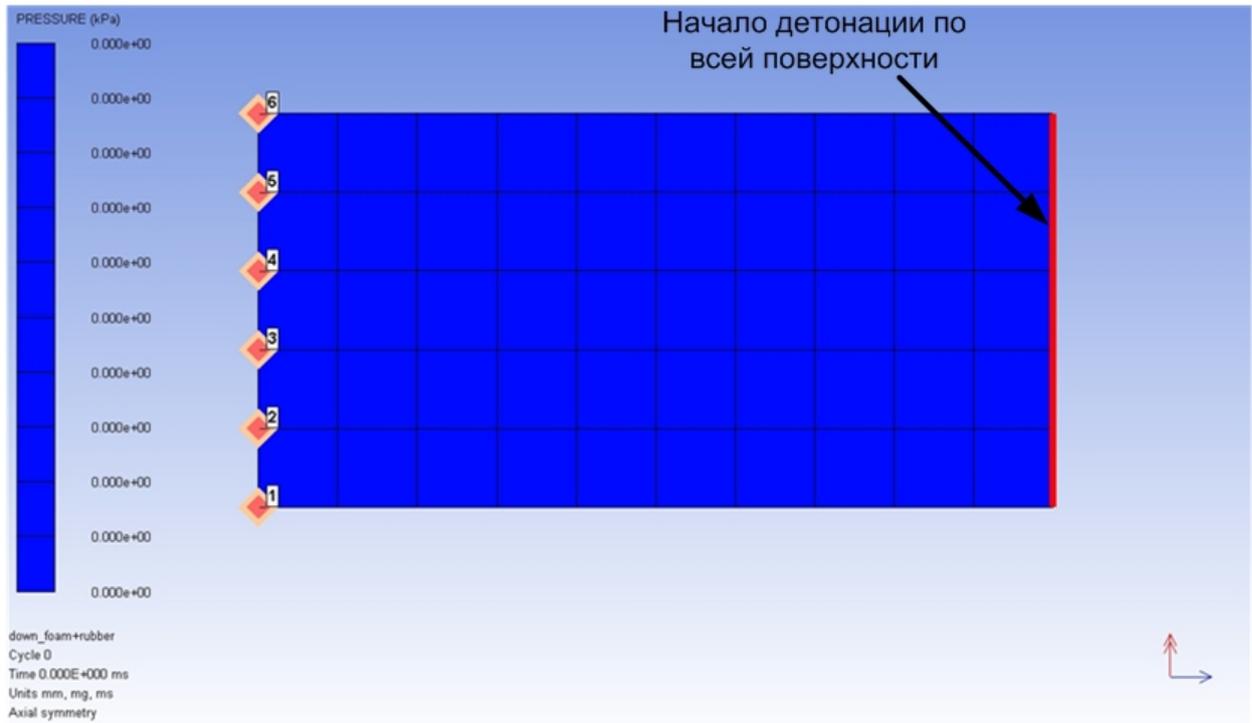


Рисунок 4.2.5 – Исходное состояние для расчета удельного импульса на жесткую стенку в трехмерном приближении ($t=0$).

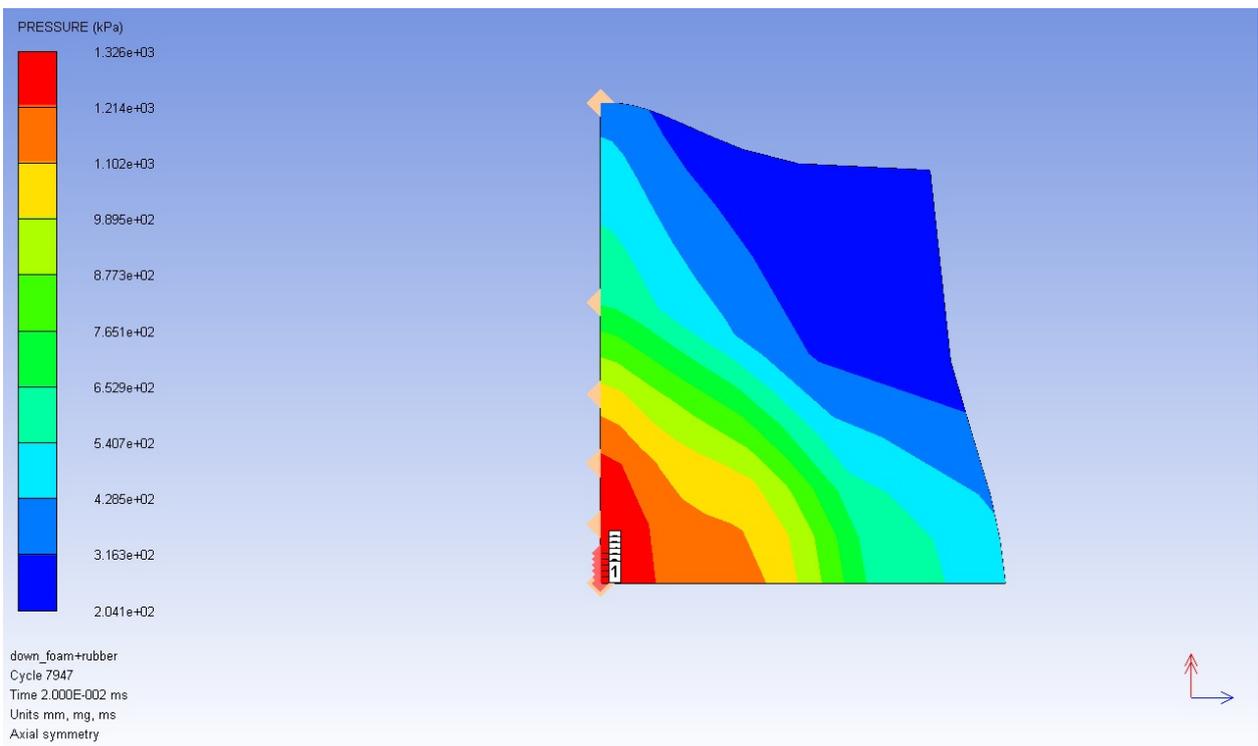


Рисунок 4.2.6 – Расчет удельного импульса на жесткую стенку в трехмерном приближении ($t=20$ мкс)

Профиль давления на жесткую стенку и удельный импульс представлены на рисунках 4.2.7–4.2.8.

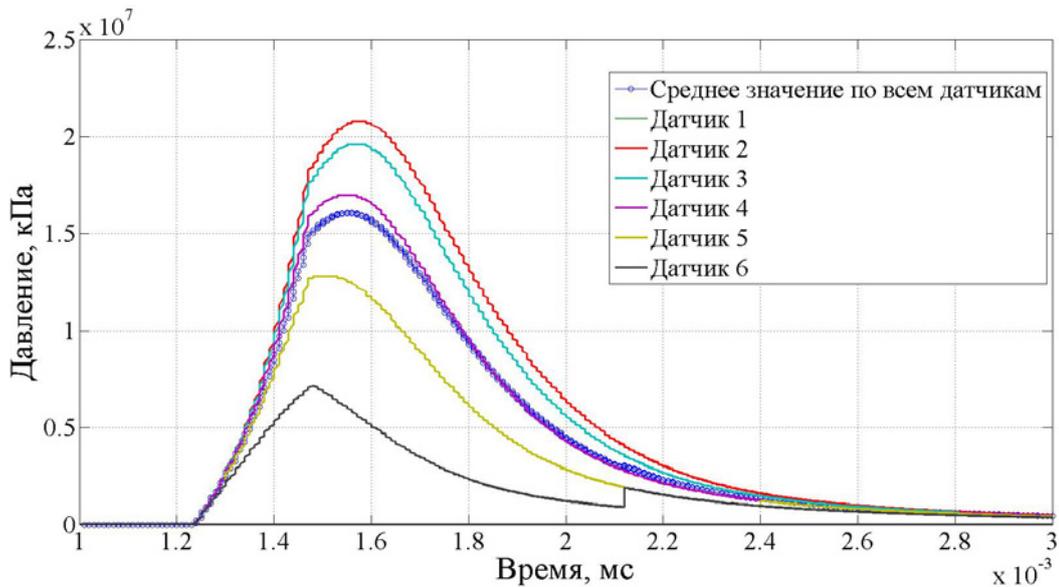


Рисунок 4.2.7 – Профиль давления на жесткую стенку

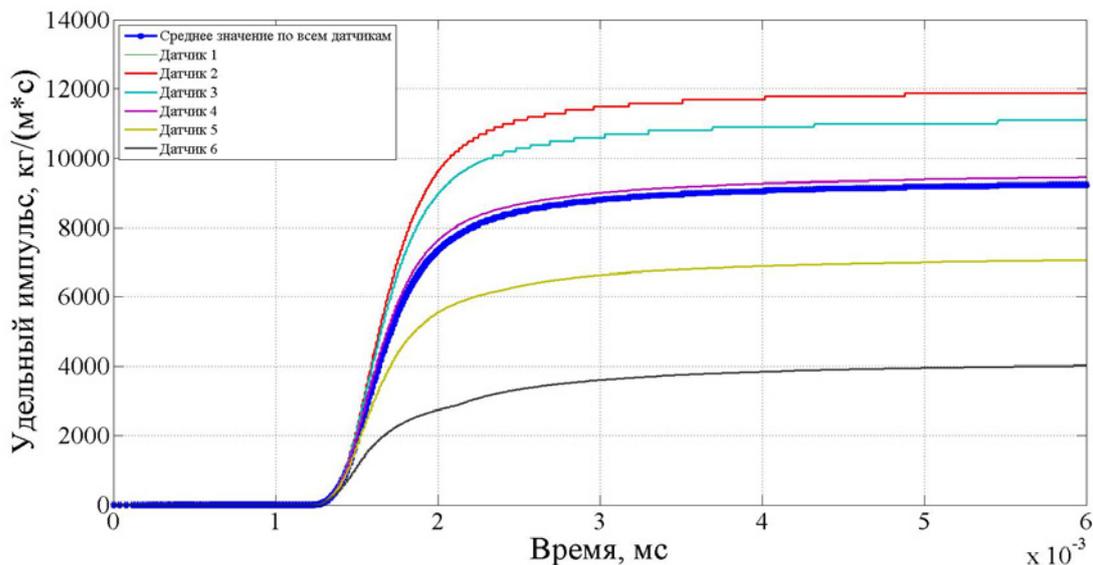


Рисунок 4.2.8 – Удельный импульс детонировавшего ВВ ($i_{Pcp}=9,2 \cdot 10^3$ кг/(м·с).

Исходные данные для заряда: $l=10$ мм, $r=5$ мм, $\rho_0=1480$ кг/м³, $D=7000$ м/с. Для расчета удельного импульса заряда необходимо использовать первое уравнение (4.2.2), так как $l=10 < 22,5$ мм [62]. Величина удельного импульса на стенку $i_A=8,5 \cdot 10^3$ кг/(м·с). Расчетное (среднее) значение удельного импульса (рисунок 4.2.8) $i_{Pcp}=9,2 \cdot 10^3$ кг/(м·с).

Достаточно точное совпадение результатов численного и аналитического расчета могут считаться обоснованием корректности разработанной методики: выбора конечно-элементной аппроксимации и уравнений состояния.

4.2.3. Валидация результатов численного моделирования

Валидация расчетов скорости фронта волны

Физическое обоснование (валидация) 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 4.2.9). В процессе испытаний системой измерений (СИ) регистрировалась скорость V движения рамок (красные линии на рисунке 4.2.9) в магнитном поле \vec{B} .

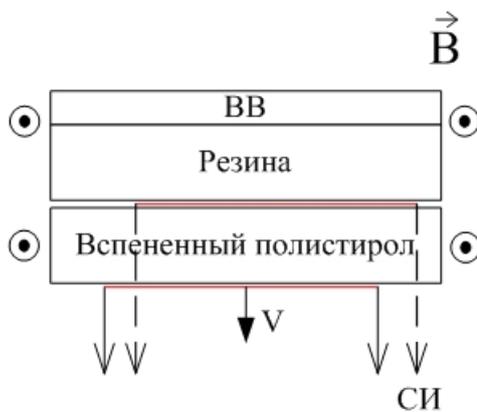


Рисунок 4.2.9 – Экспериментальная сборка

На рисунках 4.2.10–4.2.11 представлены результаты численного моделирования процесса распространения ударной волны в пакете материалов и их деформация для моментов времени $t_1=4$ мкс и $t_2=50$ мкс, соответственно. Полученные при

моделировании данные о поведении материалов в условиях ударно-волнового нагружения, сравнивались с экспериментальными данными.

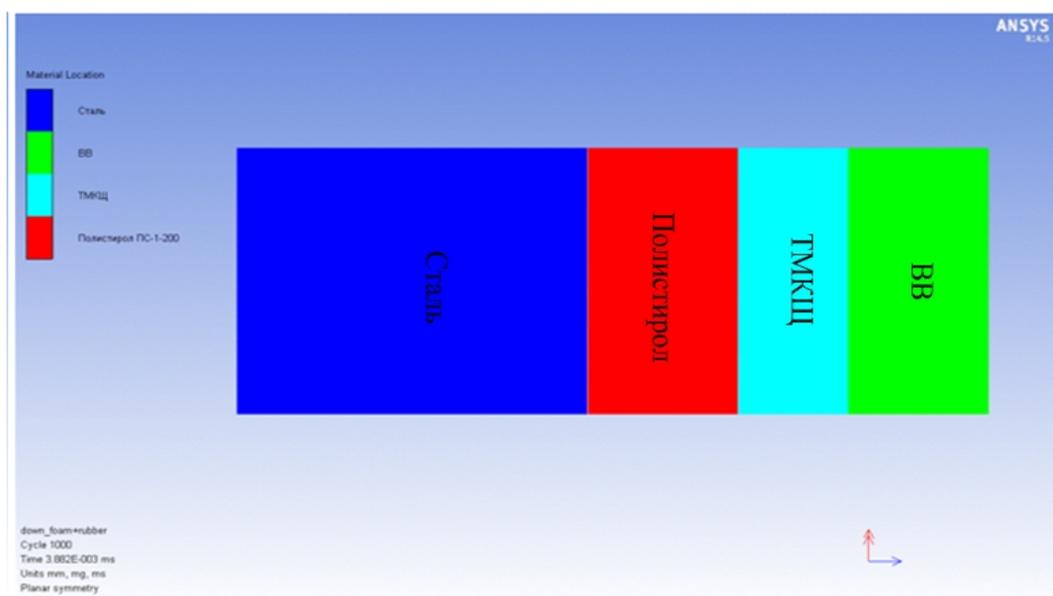


Рисунок 4.2.10 – Деформация пакета материалов для $t_1 \approx 4$ мкс

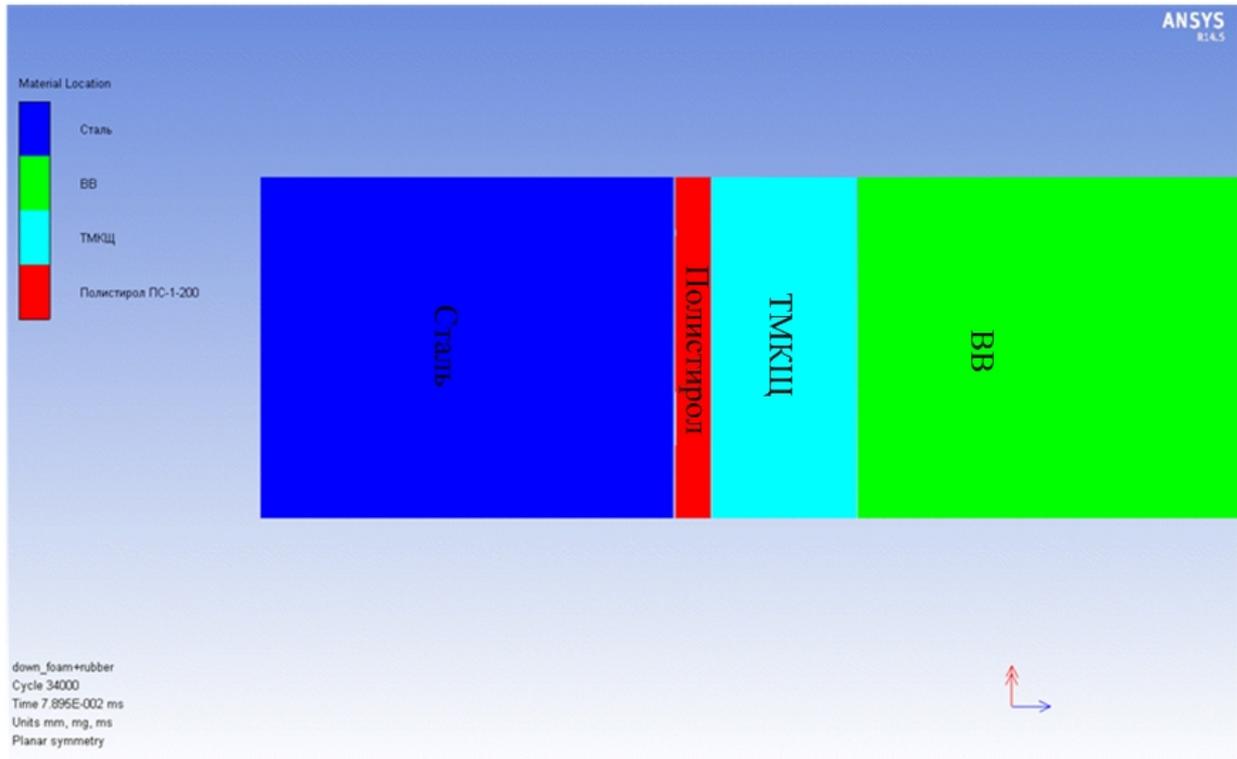


Рисунок 4.2.10 – Деформация пакета материалов для $t_2 \approx 50$ мкс

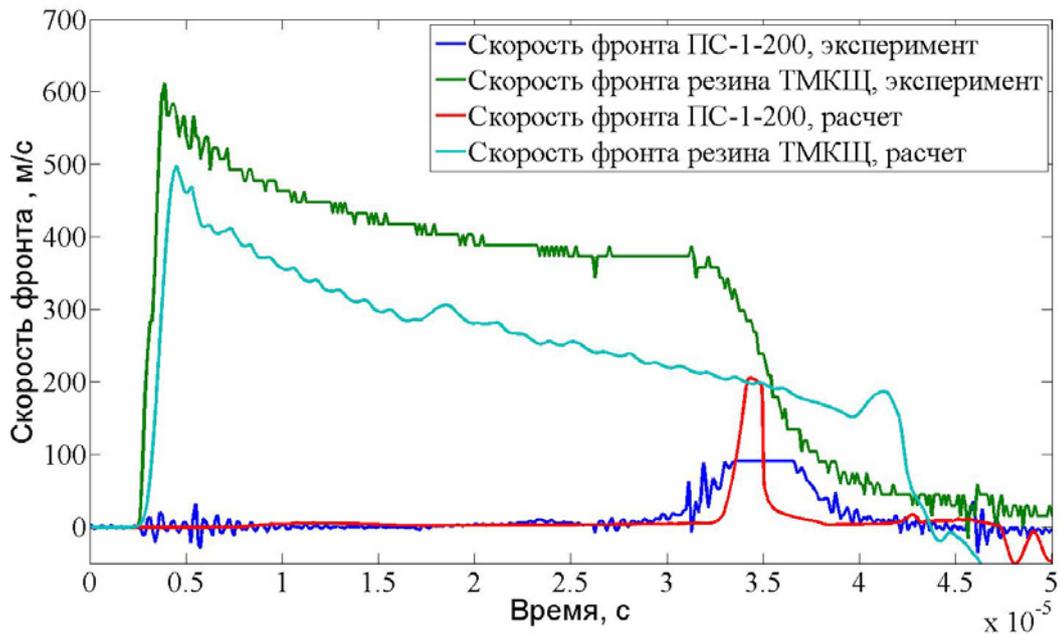


Рисунок 4.2.11 – Изменение скорости фронта волны в отдельных материалах демпфера (расчет и эксперимент)

На рисунке 4.2.11 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. Полученные результаты свидетельствуют 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.

Валидация расчетов амплитуды и профиля давления

Следующий этап валидации – сравнение законов изменения давления, сообщаемого нагружаемой поверхности, в расчете и эксперименте. Схема эксперимента представлена на рисунке 4.2.12. Для регистрации давления использовались манганиновые датчики Р1 и Р2, питаемые от импульсного источника питания напряжением 400 В. Датчики давления 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. На рисунке 4.2.13 представлена схема экспериментальной сборки.

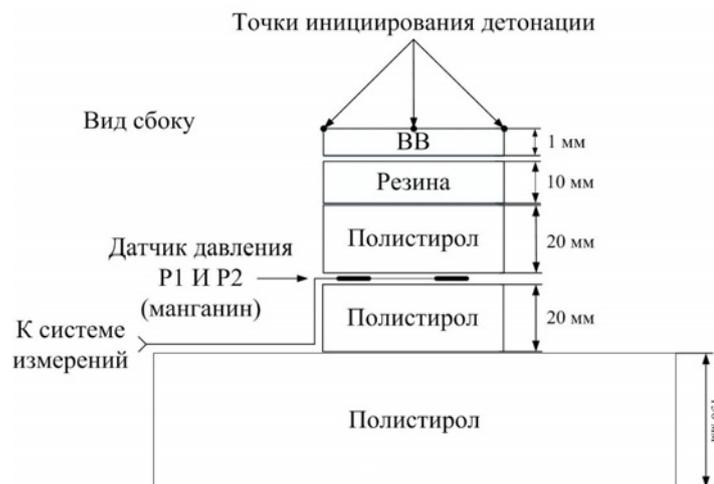


Рисунок 4.2.12 – Схема экспериментальная



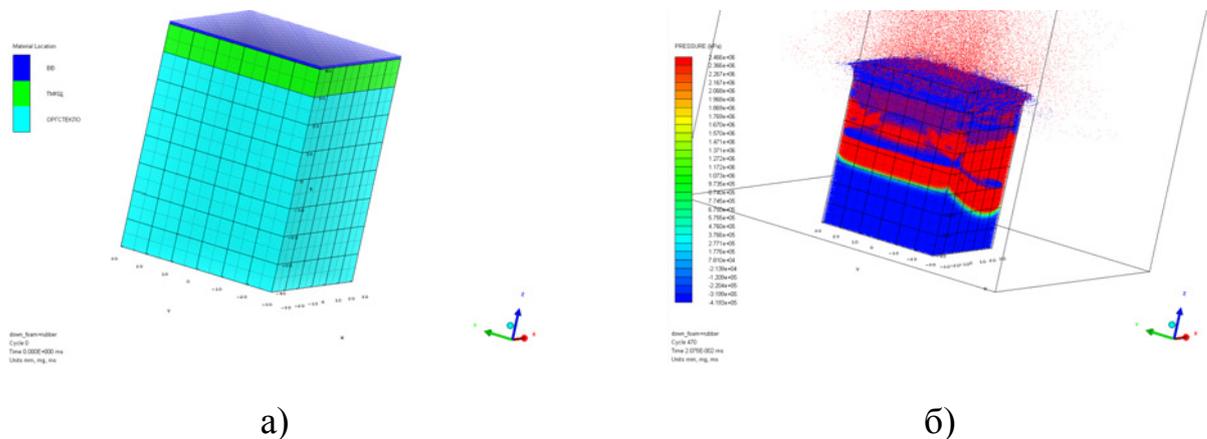
Рисунок 4.2.13 – Экспериментальная сборка

Физико-механические свойства взрывчатого вещества и резины ТМКЦ соответствуют данным таблиц 4.1.1 и 4.1.2. Для полистирола использовалось уравнение состояния в форме Ми–Грюнайзена в сочетании с моделью пластичности Мизеса. Физико-механические свойства полистирола представлены в таблице 4.2.1.

Таблица 4.2.1 – Физико-механические свойства полистирола

Плотность, кг/м ³	C_0 , м/с	S	Γ	G, МПа	σ_T , МПа
1,186	2598	1,516	0,97	775	134,5

На рисунке 4.2.14 представлены результаты численного моделирования ударно-волнового нагружения экспериментальной сборки по методу сглаженных частиц (ANSYS Autodyn).

Рисунок 4.2.14 – Численная модель: а) $t=0$ мкс; б) $t=20,75$ мкс

На рисунках 4.2.15 и 4.2.16 представлены КЭМ экспериментальной сборки и результаты численного моделирования ударно-волнового нагружения с использованием сеточных методов (ABAQUS Explicit).

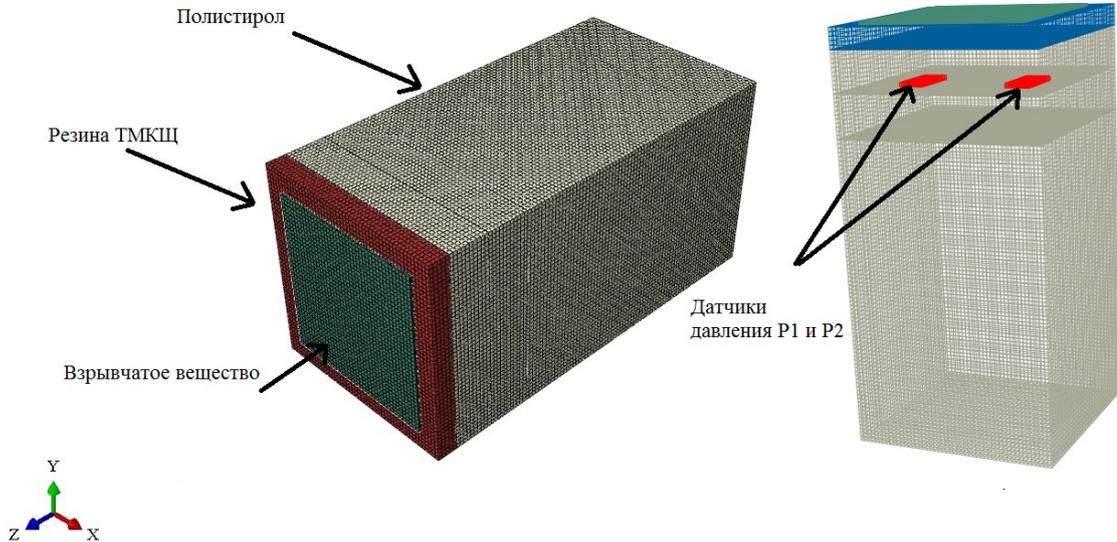


Рисунок 4.2.15 – КЭМ экспериментальной сборки (сеточный метод)

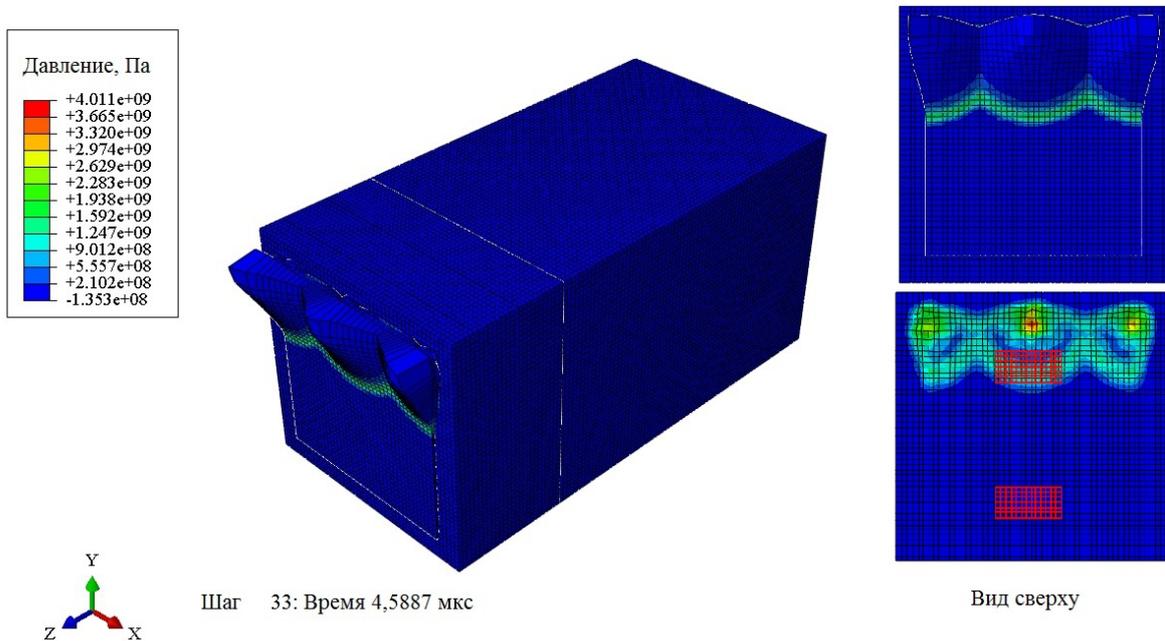


Рисунок 4.2.16 – Результаты моделирования в момент времени $t=4,5$ мкс

На рисунках 4.2.17 представлено сравнение амплитуды и профиля давления, полученных в расчетах и эксперименте для датчиков давления P1 и P2.

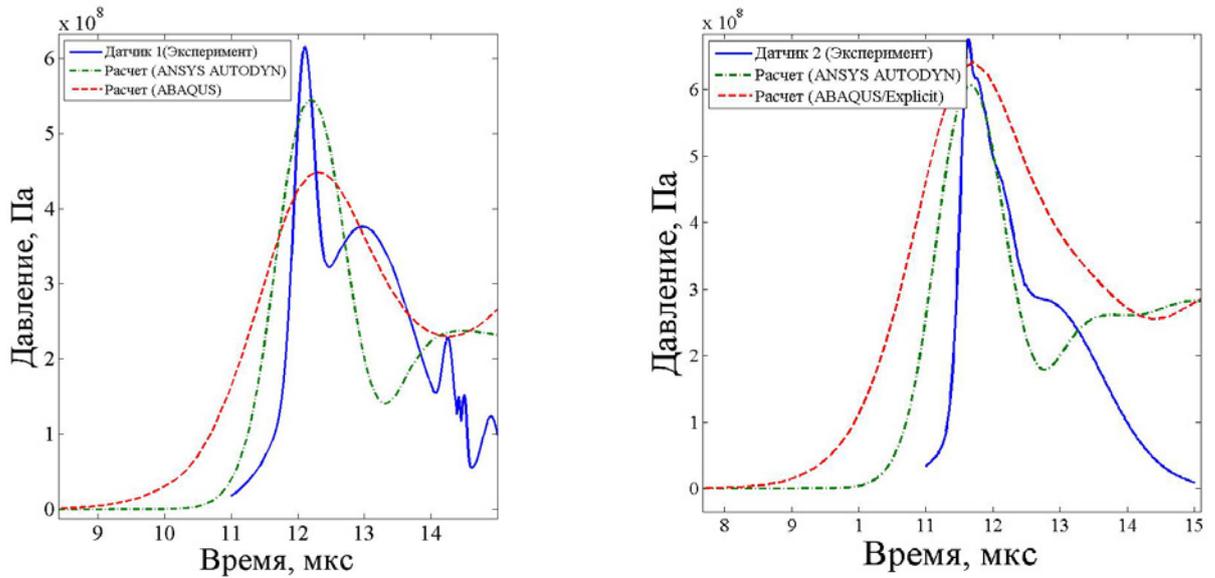


Рисунок 4.2.17 – Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных

В таблице 4.2.2 представлены величины удельных импульсов, полученных из экспериментальных данных и вычисленных в программных пакетах. Теоретические расчеты с использованием (4.2.2) – $i_A=1304$ кг/м·с.

Как видно из графиков, параметры проходящей ударной волны в эксперименте и при численном моделировании, являются близкими.

Таблица 4.2.2 – Величины удельного импульса ($i_A=1304$ кг/м·с)

Датчик	Удельный импульс, эксперимент кг/м·с ($t=140$ мс)	Удельный импульс, расчет (SPH), кг/м·с ($t=140$ мс)	Удельный импульс, расчет (МКЭ), кг/м·с ($t=140$ мс)
P1	843	883	1134
P2	887	1115	1718

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.

4.3. Расчет типового взрывного устройства для стационарного стенда

Устройство нагружения виброударного стенда выполнено в виде плоского листа ВВ и демпфирующего пакета из различных материалов, обеспечивающих растягивание во времени нагрузки от подрыва взрывчатого вещества. Наличие демпфирующих прокладок, подбираемых экспериментально, позволяет погасить высокочастотные компоненты и снизить до необходимого уровня спектр удара в высокочастотной области. Типовое взрывное устройство состоит из слоев вспененного полистирола ПС-1-200 толщиной 10 мм, резины типа ТМКЩ толщиной 10 мм и взрывчатого вещества толщиной 1,5 мм. Устройство устанавливается в нагружающую камеру виброударного стенда диаметром 50 мм. На рисунке 4.3.1 представлено импульсное устройство в сборе внутри камеры виброударного стенда.



Рисунок 4.3.1 – Типовое импульсное устройство

Для подтверждения достоверности численного моделирования расчет типового импульсного устройства проводился в двух математических пакетах – ANSYS Autodyn и ABAQUS Explicit, для чего были построены две идентичные конечно-элементные модели. Характеристики моделей представлены в таблице 4.3.1.

Таблица 4.3.1 – Характеристики конечно-элементных моделей

Параметр	ANSYS Autodyn	ABAQUS Explicit
Количество расчетных элементов	21705(четверть)	73866 (полная модель)
Расчетные элементы	8-ми узловые элементы с одной точкой интегрирования	8-ми узловые элементы с одной точкой интегрирования
Шаг сетки	2 мм	2 мм
Численное демпфирование (линейная/квадратическая вязкость)	2,2/4,0	0,4/4,2
Метод решения	Явная схема интегрирования	Явная схема интегрирования.
Модель материала (сталь)	Уравнения состояния в форме Ми-Грюнайзена и Джонсон-Кука	Уравнения состояния в форме Ми-Грюнайзена и Джонсон-Кука
Модель материала (вспененый полистирол – ПС-1-200)	Упругопластическая модель с уравнением состояния в форме P-alpha	Упругопластическая модель с уравнением состояния в форме P-alpha
Модель материала (резина ТМКЦ)	Упругая модель с уравнением состояния в форме Ми-Грюнайзена	Упругая модель с уравнением состояния в форме Ми-Грюнайзена
Модель материала (ВВ)	Уравнение состояния продуктов детонации в форме Джонса–Вилкинса–Ли	Уравнение состояния продуктов детонации в форме Джонса–Вилкинса–Ли

На рисунке 4.3.2 представлена расчетная модель типового импульсного устройства в программном пакете ANSYS Autodyn. Для расчета принимался фрагмент стенда– типовое импульсное устройство совместно с областью нагружения – фрагментом основной плиты стенда. Характеристики взрывчатого

материала, резины, вспененного полистирола и стали приведены в таблицах 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 и 4.1.4, соответственно.

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 4.3.3.

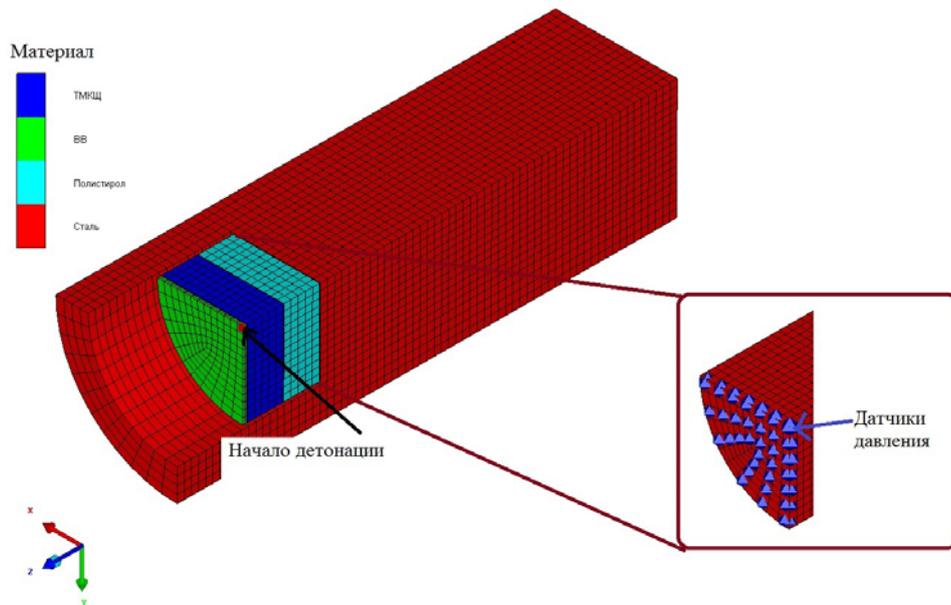


Рисунок 4.3.2 – КЭМ импульсного устройства (четвертая часть)

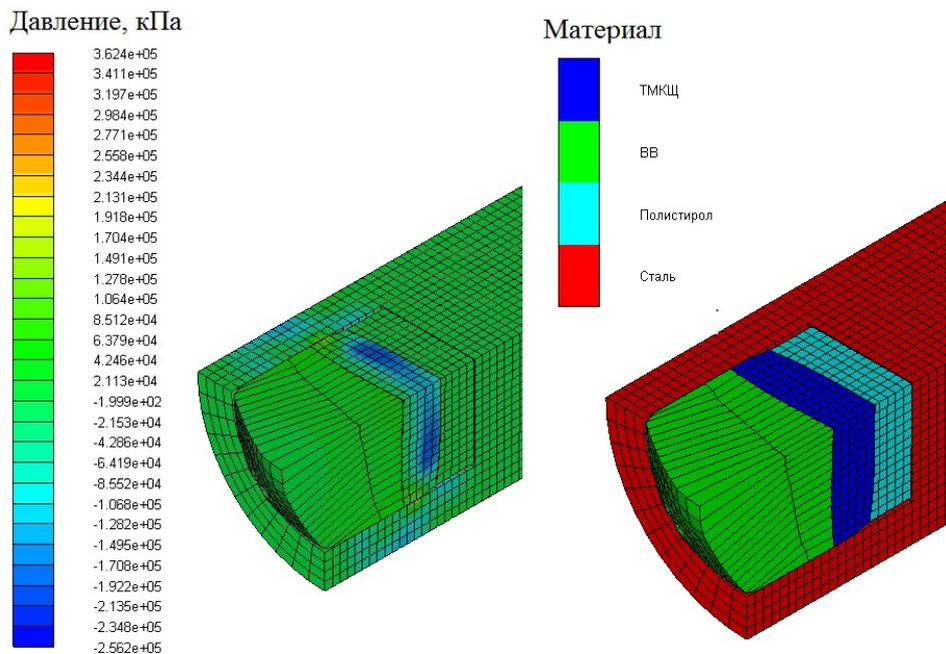


Рисунок 4.3.3 – Давление в момент времени $t=15$ мкс

На рисунке 4.3.4 и 4.3.5 представлена КЭМ фрагмента стенда для расчета в программном комплексе ABAQUS Explicit и результаты численного моделирования в момент времени $t=33$ мкс.

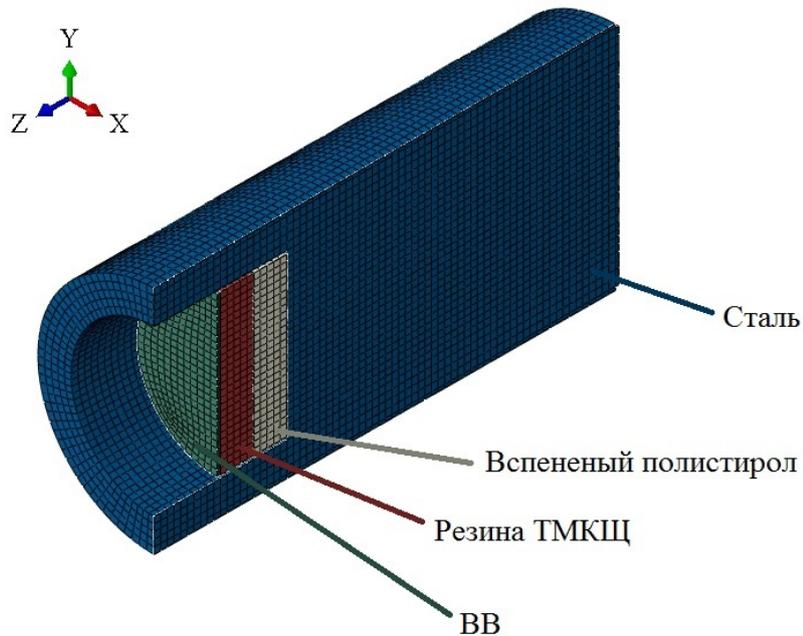


Рисунок 4.3.4 – КЭМ импульсного устройства

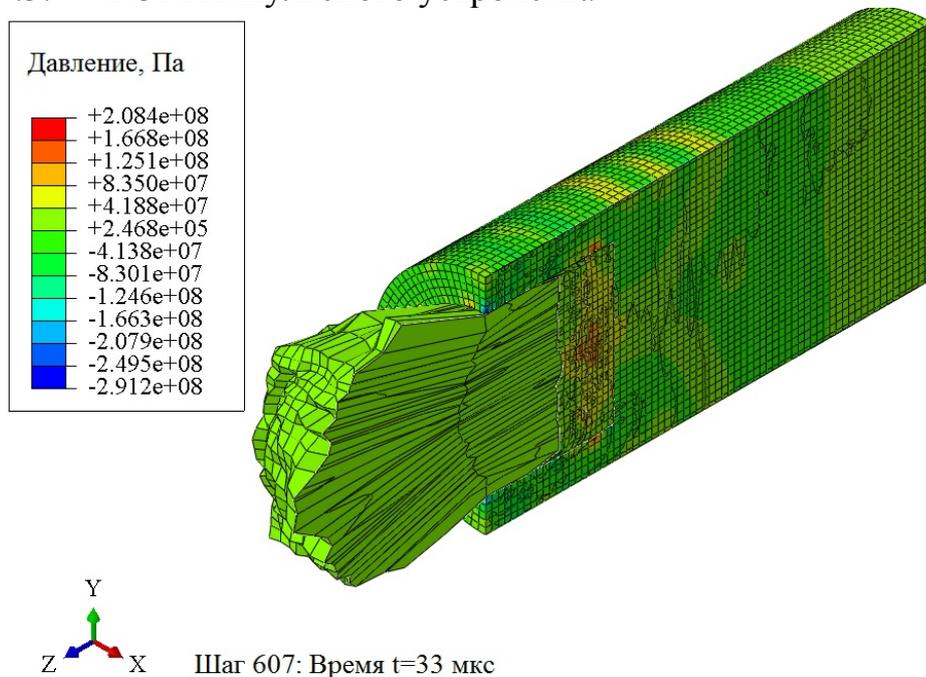


Рисунок 4.3.5 – Давление в момент времени $t=33$ мкс

На рисунках 4.3.6 и 4.3.7 представлено сравнение результатов численного моделирования – среднего давления P_{ave} для первого слоя расчетных элементов

поверхности нагружения и импульса – I_F , сообщаемого поверхности нагружения. На рисунках приведены графики давления и импульса полученных в программных комплексах ANSYS Autodyn и ABAQUS Explicit при расчете идентичных конечно-элементных моделей.

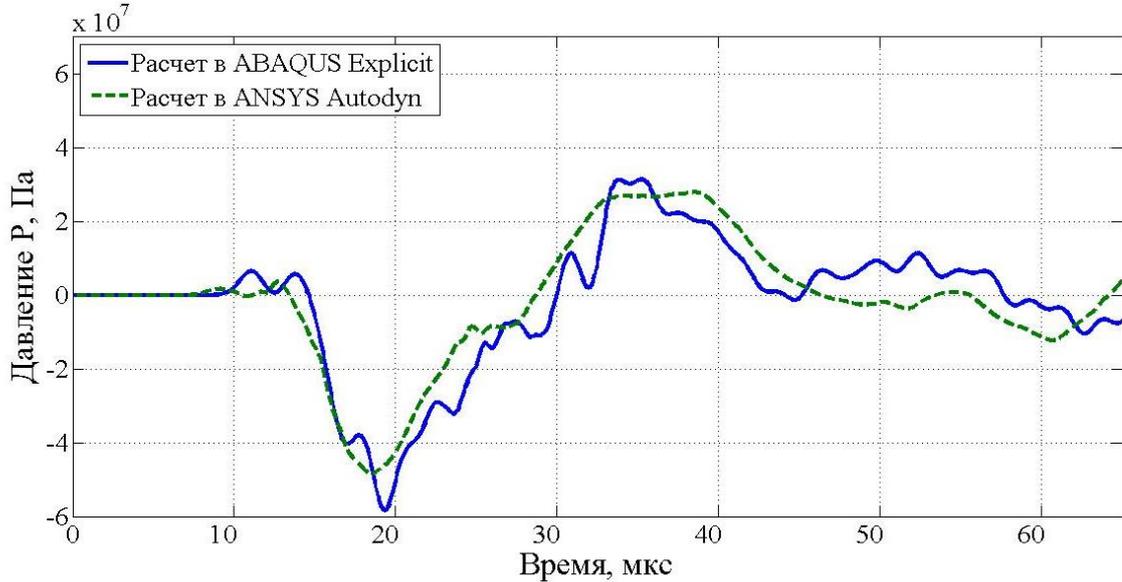


Рисунок 4.3.6 – Гидростатическое давление (усредненное по всем конечным элементам в поверхностном слое)

На рисунке 4.3.6 Гладкость линии давления для ANSYS Autodyn обусловлена большим значением квадратичного коэффициента вязкости, чем для ABAQUS Explicit.

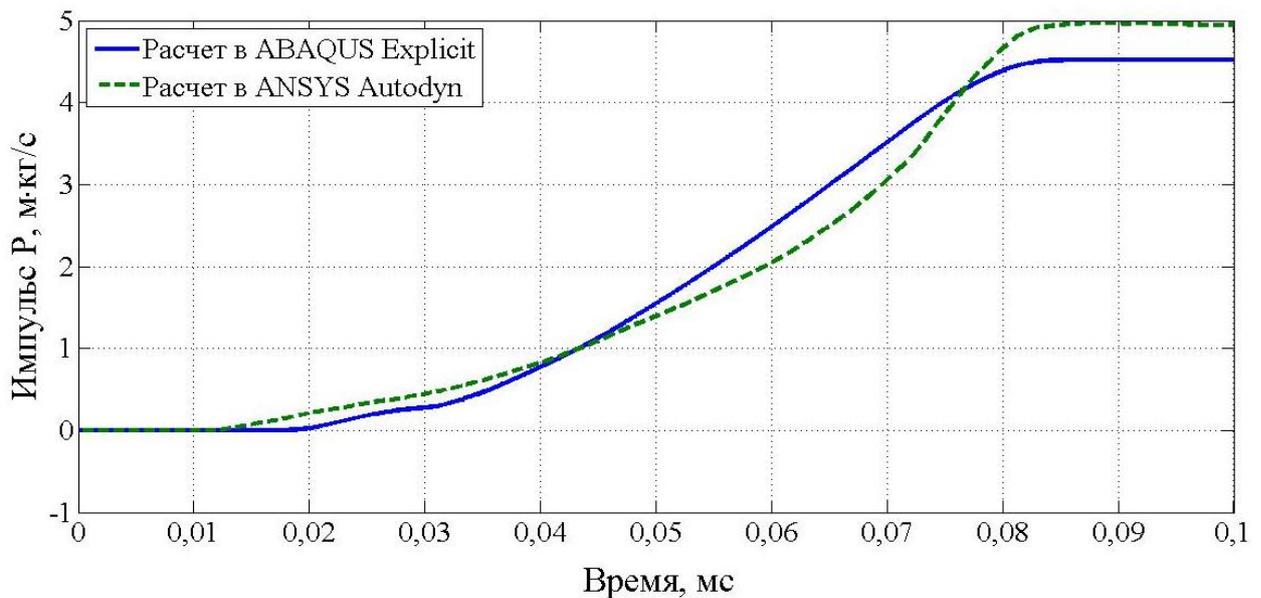


Рисунок 4.3.7 – Импульс на поверхности нагружения

Представленные результаты численного моделирования не в полной мере отражают протекающий физический процесс, поскольку в КЭМ конструкции типового импульсного устройства не учтен вклад средства инициирования заряда ВВ – детонатора. Вклад детонатора в общий импульс сложно оценить, поскольку типовая навеска (гремучая ртуть, азид свинца и пр.) изменяется от партии к партии, а наличие лидирующих осколков при разлете оболочки детонатора (цилиндрическая медная трубка) приводит к дополнительному ударному воздействию. Указанное несоответствие приводит к заниженной величине удельного импульса при численном моделировании. Вопрос моделирования подрыва детонатора выходит за рамки данной работы, поэтому для оценки вклада детонатора в итоговый импульс, сообщаемый конструкции стенда, детонатор имитировался дополнительной массой ВВ в конструкции типового импульсного устройства. На рисунках 4.3.8–4.3.9 представлены зависимости силы и импульса от времени для различных масс заряда ВВ.

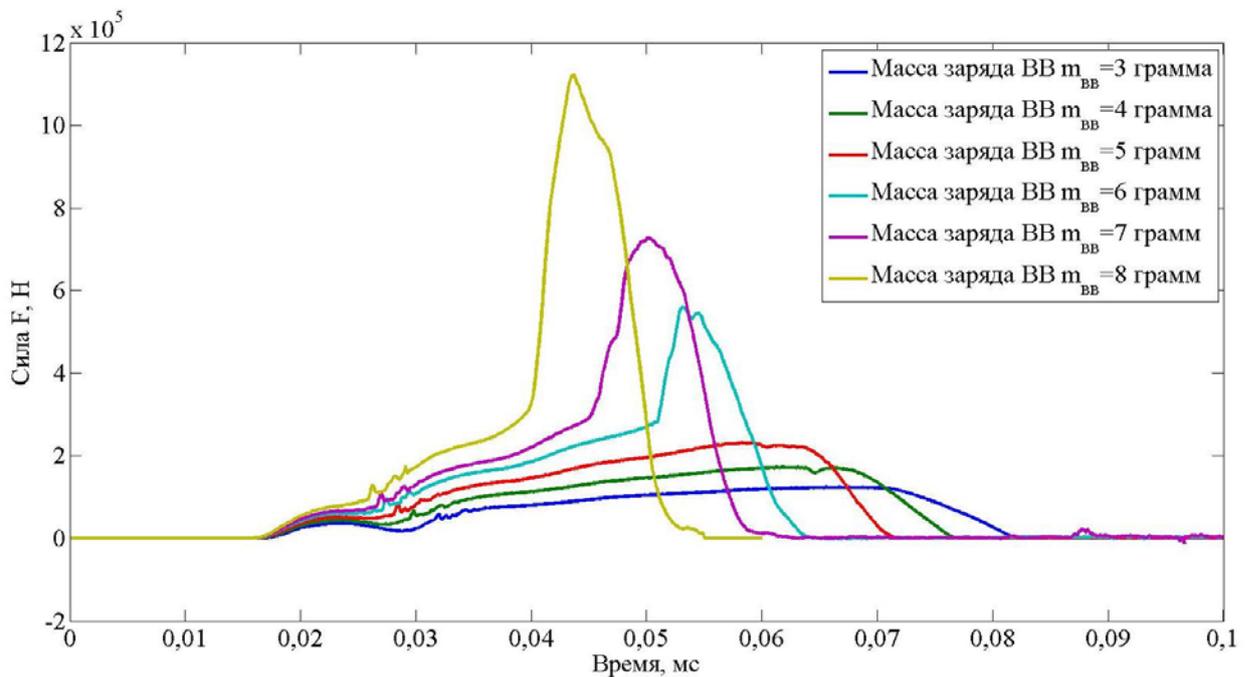


Рисунок 4.3.8 – Сила для различных масс заряда ВВ

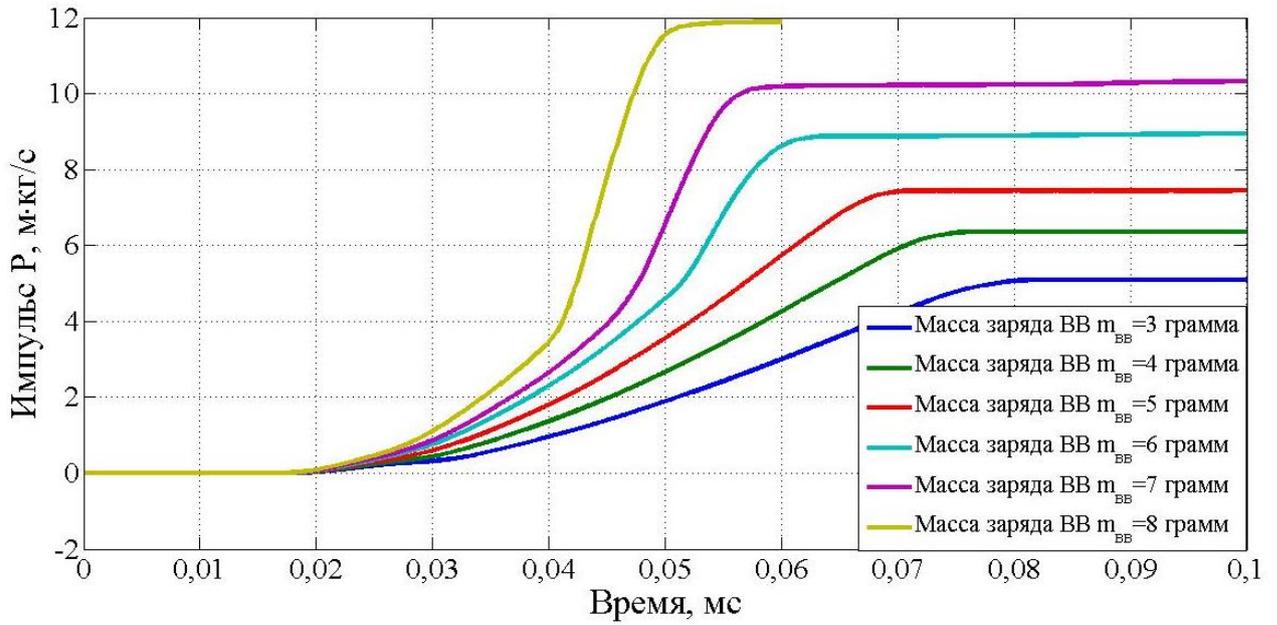


Рисунок 4.3.9 – Импульс силы, сообщенный стенду при различных массах ВВ

При моделировании отклика конструкции стенда на импульсное воздействие установлено соответствие между воздействием одного детонатора (без дополнительного взрывчатого вещества) на конструкцию и методом суммирования определен массовый эквивалент ВВ детонатора.

ГЛАВА 5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ВИБРОУДАРНОГО СТЕНДА ВЗРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Конструкция виброударного стенда взрывного действия схожа с конструкцией стендов, представленных в разделе 1. Стенд представляет собой резонатор, выполненный в виде двух пластин (сталь-сталь, алюминий-сталь), соединенных между собой переходными крепежными элементами. К одной из пластин прикладывается нагрузка от ВВ или механического удара, к другой крепится объект испытаний. В результате внешнего воздействия в резонаторе возбуждается быстро затухающий колебательный процесс, передающийся объекту испытаний. Подбор конструктивных параметров стенда, определяющих режим нагружения, сопряжен с трудоемкой отладочной работой. Для того, чтобы уменьшить объем отладочных испытаний, сделать их более целенаправленными и, в конечном счете, повысить качество воспроизведения требуемых режимов, предлагается использовать компьютерное моделирование на основе современных расчетных пакетов.

В данном разделе рассмотрены результаты численного моделирования виброударного нагружения на стенде взрывного действия, представленного на рисунке 5.1.1 [1], с использованием динамической нагрузки $F(t)$, определенной в разделе 4.

5.1. Динамическая схема стенда

Каркас стенда выполнен из углового стального профиля №10 толщиной 8 мм и длиной грани 100 мм. Высота каркаса 1000 мм. В процессе испытаний стенд располагается во взрывной камере и крепится за свободную плоскость каркаса к направляющим прогонам в основании взрывной камеры, с использованием болтового соединения типа "сухарь" (Рисунок 5.1.1).

На верхней поверхности каркаса располагается основная стальная плита (квадратной формы в плане) с размерами 800×800×100 мм. Плита предназначена для восприятия нагружения от взрыва заряда ВВ и последующей передачи виброударной нагрузки через крепежные элементы вторичной плите с

установленным на ней объектом испытаний. На свободной поверхности стальной плиты имеются сквозные отверстия диаметром 27 мм для установки крепежных элементов и последующего монтажа верхней плиты (Рисунок 5.1.1). В плите помимо отверстий для крепежных элементов предусмотрены дополнительные отверстия, необходимые для уменьшения высокочастотной компоненты в спектра удара. Крепление основной плиты к каркасу стенда осуществлено при помощи сварки.

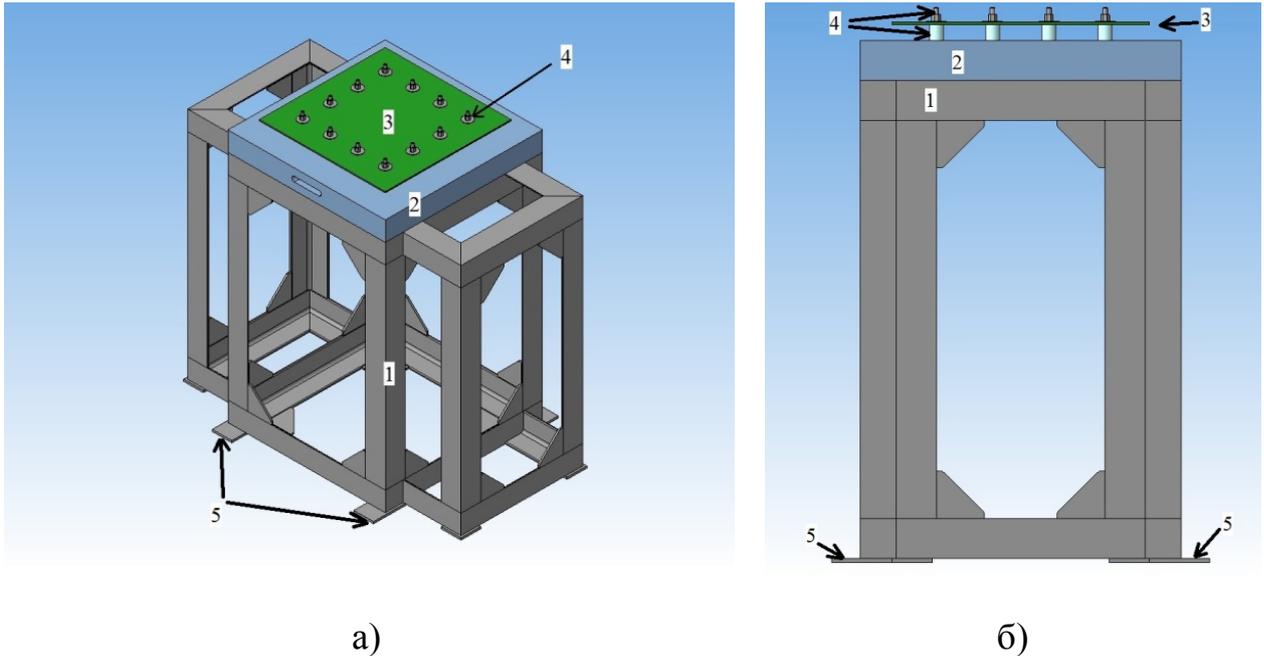


Рисунок 5.1.1 – Виброударный стенд (а) – вид сбоку, б) – вид спереди); 1 – каркас; 2 – нижняя плита; 3 – верхняя плита; 4 – крепежные элементы (втулки, шпильки); 5 – места крепления типа «сухарь»

Верхняя плита изготовлена из алюминиевого листа толщиной 6 мм и длиной грани 640 мм, и крепится к основной плите посредством 12 крепежных элементов. Крепежные элементы выполнены с использованием болтов М16, стальных шайб, алюминиевых втулок. Крепежные элементы являются элементами, передающими возмущения от нижней к верхней плите.

На поверхности верхней плиты устанавливается объект испытаний (ОИ) и датчики виброударных ускорений. Методики испытаний требуют регистрировать три компоненты ускорения; для этого три датчика устанавливаются на стальной монтажный куб-бобышку в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Монтажный куб свободной плоскостью крепится к верхней плите стенда

(Рисунок 5.1.1, позиция 3) через стальную шпильку. Датчики устанавливаются в непосредственной близости от места крепления ОИ и верхней плиты. Поскольку любая дополнительная масса в колебательной системе приводит к изменению её частотных характеристик, в процессе измерений используются датчики с массой не более 15 г [71], а общая масса трех датчиков и стальной бобышки не превышает 50 г.

Режимы нагружения, реализуемые стендом, определяются рядом параметров; к числу основных можно отнести:

- геометрические размеры и материал нижней и верхней плиты;
- количество и характер соединения элементов стенда;
- параметры взрывного источника нагрузки.

Существующая практика предполагает проведения серии отладочных испытаний, в процессе которых варьируются параметры стенда с целью достижения требуемых испытательных режимов. Определяющим критерием качества отработки режимов нагружения является соответствие ударного спектра, реализуемого в местах установки датчиков ускорения, требованиям к соответствующему режиму испытаний.

Для оценки соответствия виброударных ускорений, найденных экспериментально и расчетным путем, применяются формулы:

$$\Delta_i(f) = |UC_i^{\text{Расчет}}(f) - UC_i^{\text{Эксперимент}}(f)|, \quad (5.1.1)$$

$$\mu(\Delta_i) = \frac{\sum_f |\Delta_i(f)|}{N}, \quad (5.1.2)$$

$$\sigma(\Delta_i) = \sqrt{\frac{\sum_f (\Delta_i(f) - \mu(\Delta_i))^2}{N}}, \quad (5.1.3)$$

где i – порядковый номер датчиков ускорения; f – частота, Гц; N – общее количество элементов в массиве ударного спектра (УС), лежащих в диапазоне от 100 Гц до 10 кГц.

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:

$$УС_{3D} = \sqrt{УС_X^2 + УС_Y^2 + УС_Z^2}. \quad (5.1.4)$$

Для достижения соответствия расчетной модели экспериментальным данным необходимо особое внимание уделить корректному построению конечно-элементной модели: местам крепления элементов стенда, геометрическим размерам, свойствам материалов и т.д.

5.2. Модальный анализ виброударного стенда

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 модального анализа [32], реализованного в программном пакете ABAQUS Standart. 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.

Классическая теория пластин и балок достаточно точно описывает формы колебаний, для которых длины полуволн много больше толщины [72], т.е.:

$$\lambda \gg h \quad (5.2.1)$$

Для элементов стенда выбраны следующие исходные данные для расчетной модели (Таблица 5.2.1).

Таблица 5.2.1 – Исходные данные по элементам стенда

Элемент стенда	Параметр	Значение	Сопоставленный элемент
Верхняя плита (алюминиевый сплав)	E	71 ГПа	Тонкая пластина ($\lambda = 0,42$ м для $m=1$)
	ν	0,33	
	ρ	2700 кг/м ³	
	$a=b$	0,42 м	
	h	0,006 м	
Нижняя плита (сталь)	E	210 ГПа	Толстая/тонкая пластина $\lambda = 0,8$ м для $m=1$ $\lambda^* = 0,7$ м для $m=1$
	ν	0,3	
	ρ	7800 кг/м ³	
	$a=b$	0,8 м	
	$a^*=b^*$	0,7 м	
	h	0,1 м	
Каркас (Уголок стальной равнополочный)	E	210 ГПа	Балка ($\lambda \geq 0,25$ м для $m=1$)
	ν	0,3	
	ρ	7800 кг/м ³	
	L_{max}	1 м	
	L_{min}	0,25 м	
	w	11 кг/м	
	h (толщина)	0,008 м	
	l (ширина)	0,1 м	
Втулка (алюминиевый сплав)	E	71 ГПа	Балка ($\lambda \geq 0,04$ м для $m=1$)
	ν	0,33	
	ρ	2700 кг/м ³	
	$d_{внутр}$	0,025 м	
	$d_{внеш}$	0,035 м	
	L	0,04 м	
	h (толщина)	0,005 м	
Шпилька (сталь)	E	210 ГПа	Балка ($\lambda \geq 0,15$ м для $m=1$)
	ν	0,3	
	ρ	7800 кг/м ³	
	d	0,014 м	
	L	0,15 м	

* Нижняя плита по контуру приварена к уголку стальному в двух местах – вдоль ребра и на расстоянии 0,1 м вглубь нижней плиты, принято среднее значение.

Собственные частоты колебаний квадратной изотропной пластинки для типовых случаев граничных условий равны [73]:

- шарнирное опирание:

$$f_{ssss} = \frac{\pi}{2a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \left(m^2 + \frac{a^2}{b^2} n^2 \right), \quad (5.2.2)$$

где m и n - количество полуволн на длине a и b соответственно;

- защемление:

$$f_{cccc} = \frac{\chi_m}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}}, \quad (5.2.3)$$

для 1-го тона $\chi_1 = 35,99$, для второго тона $\chi_1 = 73,40$

- свободный контур:

$$f_{ffff} = \frac{\chi_m}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}}, \quad (5.2.4)$$

для 1-го тона $\chi_1 = 13,1$, для второго тона $\chi_1 = 19,306$.

Для толстых пластин вместо (5.2.2) можно использовать следующее уточненное выражение для частоты [62]:

$$f_{ssss-t} = \frac{\pi}{2a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \left(m^2 + \frac{a^2}{b^2} n^2 \right) \left(1 + \frac{\pi^2 h^2}{a^2} \left(\frac{8-3\nu}{40(1-\nu)} + \frac{1}{12} \right) \left(m^2 + \frac{a^2}{b^2} n^2 \right) \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5.2.5)$$

Собственные частоты колебания балки, постоянного сечения при различных граничных условиях равны [75]:

$$f_o = \frac{\chi_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{M_h}}. \quad (5.2.6)$$

Значение коэффициентов χ_n выбираются, исходя из граничных условий, и представлены в таблице 5.2.2.

Таблица 5.2.2 – Значение коэффициентов χ_n для различных граничных условий

Граничные условия	Номер тона	χ_n
Оба конца защемлены	1	4,730
	2	7,853
	3	10,996

Граничные условия	Номер тона	χ_n
Оба конца оперты	1	π
	2	2π
	3	3π
Оба конца свободны	1	4,730
	2	7,853
	3	10,996

Алгоритм модального анализа реализован в большинстве расчетных пакетов и основан на решении уравнении движения (в общепринятых обозначениях):

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = 0. \quad (5.2.7)$$

При анализе свободных колебаний демпфированием можно пренебречь. При гармонических колебаниях $x_i = \phi_i \cos(\omega_i t)$, и из (5.2.7) следует:

$$(-\omega_i^2[M] + [K])\{\phi_i\} = 0. \quad (5.2.8)$$

Для проведения модального анализа конструкции стенда в программном комплексе ABAQUS Standard построена КЭМ стенда (рисунок 5.2.1) с учетом физико-механических характеристик, представленных в таблице 5.2.1, и документации на виброударный стенд. В модели использовались КЭ типа C3D8R (раздел 3). Шаг сетки составлял 0,01 м. Граничные условия задавались как отсутствие поступательных и вращательных степеней свободы в местах крепления стенда к силовому полу ($U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$). Соединение элементов стенда друг с другом, в местах сварки выполнено с использованием соединения типа жесткого ограничения (Tie constraint). Частотный анализ осуществлялся с применением метода Ланцоша [76] в диапазоне частот от 100 до 2000 Гц, так как при построении спектра удара начальная частота – 100 Гц, а излом на графике УС лежит диапазоне от 1000 до 2000 Гц (Рисунок 1.3.8).

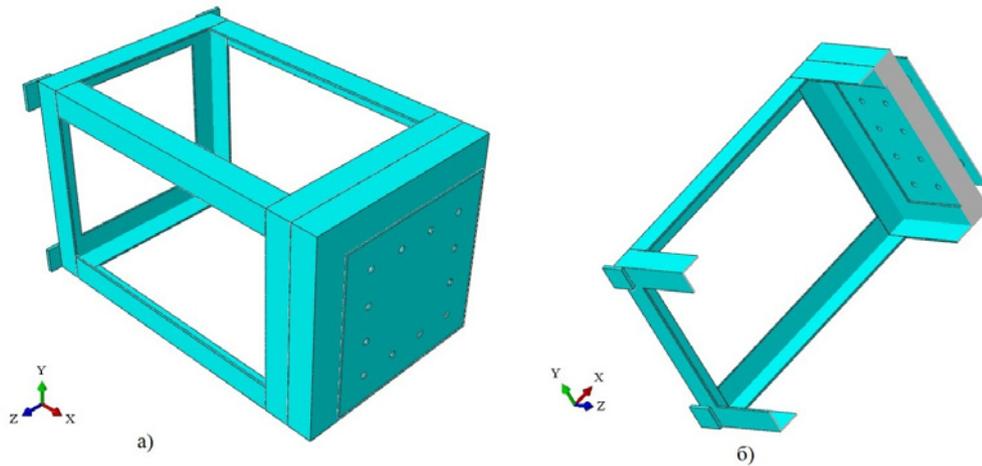


Рисунок 5.2.1 – КЭМ виброударного стенда для модального анализа (а) – полная сборка, б) – разрез по плоскости XOY)

Результаты модального анализа приведены на рисунках 5.2.2 – 5.2.8.

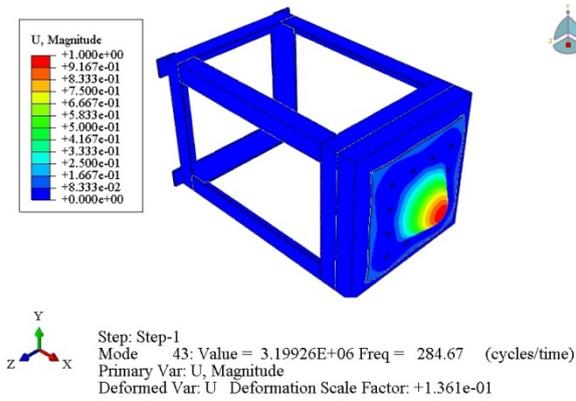


Рисунок 5.2.2 – Первый тон колебаний верхней плиты, $f=284,7$ Гц

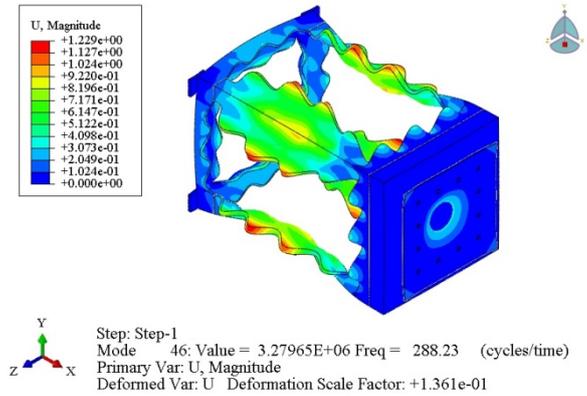


Рисунок 5.2.3 – Первый тон колебаний каркаса, $f=288,2$ Гц

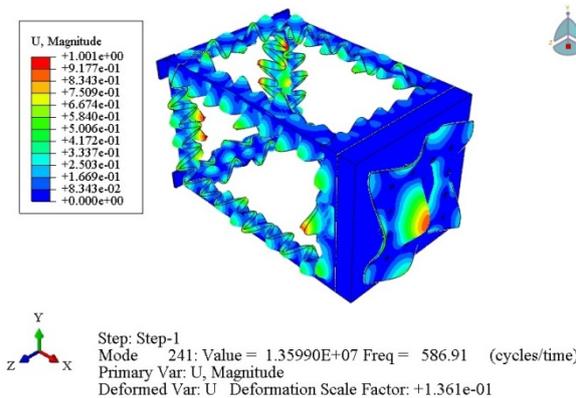


Рисунок 5.2.4 – Второй тон колебаний верхней плиты, $f=586,9$ Гц

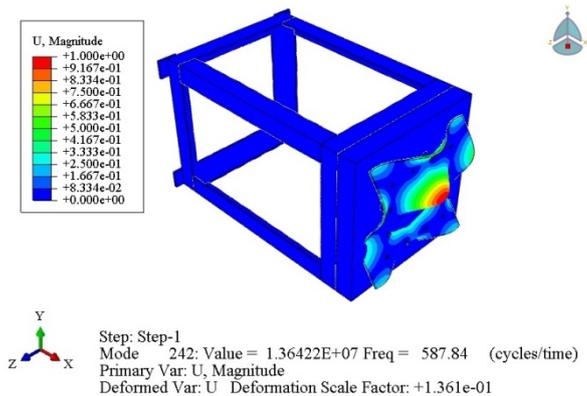


Рисунок 5.2.5 – Второй тон колебаний верхней плиты, $f=587,8$ Гц

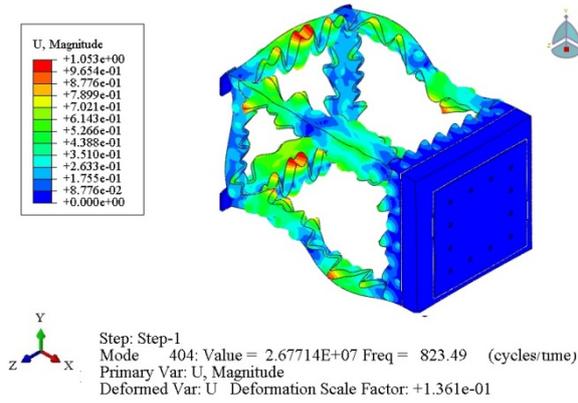


Рисунок 5.2.6 – Второй тон колебаний каркаса, $f=823,5$ Гц

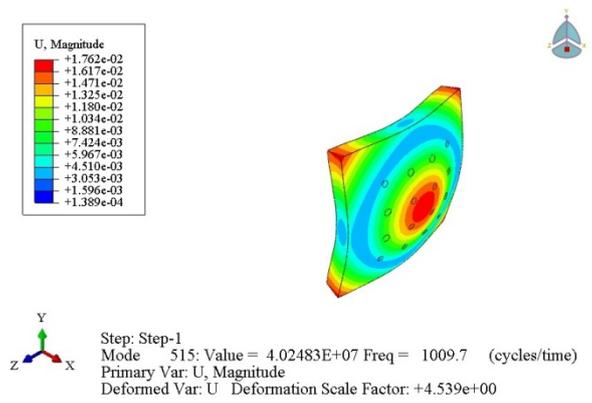


Рисунок 5.2.7 – Первый тон колебаний нижней плиты, $f=1009$ Гц

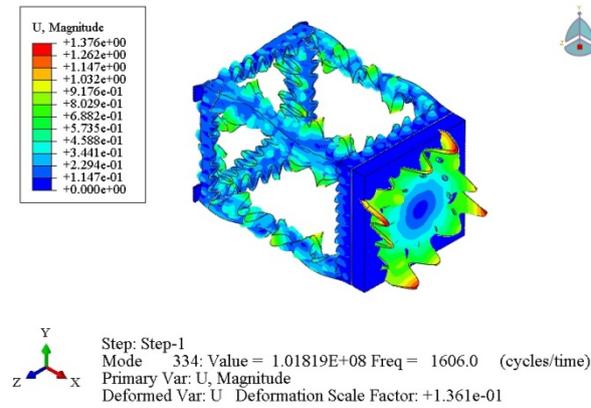


Рисунок 5.2.8 – Третий тон колебаний каркаса, $f=1606,0$ Гц

Рассмотрим графики спектральных характеристик для сигналов с ортогональной розетки датчиков, расположенной в центре верхней плиты (Рисунок 5.2.9), полученных при нагружении конструкции вдоль оси X с использованием источника импульсной нагрузки (накладного заряда ВВ).

Анализ графика спектральных плотностей показывает, что при воздействии вдоль оси OX определяющие частоты лежат в диапазонах 200 – 400 Гц и 850 – 1000 Гц. При возмущении вдоль оси OY значимы частоты 1450 – 1650 Гц и частота в районе 600 Гц. Соответственно вдоль оси OZ значимы частоты 1500 – 1700 Гц и частота в районе 600 Гц.

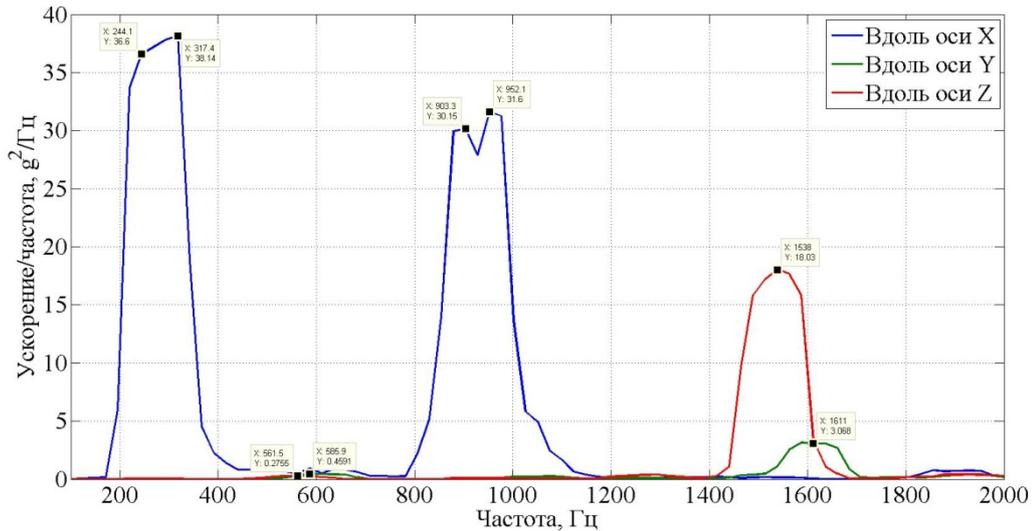


Рисунок 5.2.9 – Графики спектральных характеристик ускорений

В таблице 5.2.3 приведено сопоставление результатов определения собственных форм и частот колебаний стенда с применением модального анализа, классической теории и выделения значимых частот по графику спектральных характеристик ускорений (Рисунок 5.2.9). Близость полученных результатов подтверждает обоснованность предложенного выделения основных элементов стенда, влияющих на получаемый при испытаниях спектр удара.

5.3. Численное моделирование виброударного нагружения

Моделирование виброударного нагружения производилось с использованием метода конечных элементов. При построении КЭМ-модели было реализовано 12 вариантов моделей стенда, отличающихся различными элементами, моделирующими трехмерное тело – верхнюю плиту стенда. Дополнительным отличием являлось наличие или отсутствие предварительно-напряженного состояния от болтового соединения в КЭМ стенда. Полный перечень характеристик расчетных моделей представлен в таблице 5.3.1. Далее представлено описание основных средств, использовавшихся в построении КЭМ стендов.

5.3.1. Метод решения

Решение задачи виброударного нагружения стенда взрывного действия осуществлялось методом конечных элементов, подробно изложенным в разделе 3. В КЭМ использовались оболочечные элементы типа S4R и SC8R (раздел 3) и элементы сплошной среды C3D8R (раздел 3). Шаг КЭ сетки выбирался равным 0,01 м из условия не менее 4-х элементов на длину волны максимально значимой частоты ($f_{ch}=10$ кГц). Расчет конструкции с предварительным НДС проводилось 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 осуществлялось с использованием явной схемы интегрирования.

Таблица 5.2.3 – Резонансные частоты стенда

Элемент конструкции стенда	Номер тона	Экспериментальные данные (спектральная плотность), Гц.	Модальный анализ в программном пакете ABAQUS Standard, Гц	Расчет по классической теории колебаний, Гц	
				a=0.8	a=0.7
Верхняя плита	1	317	285	307 (5.2.3)	
	2	561	587	626 (5.2.3)	
	2	586	588		
Нижняя плита	1	952	1010	a=0.8	a=0.7
				770 (5.2.2)	1007 (5.2.2)
				1405 (5.2.3)	1835 (5.2.3)
				511 (5.2.4)	668 (5.2.4)
				733 (5.2.5)	945 (5.2.5)
Каркас	1	~244	288	300 (5.2.6)	
	2	903	823	828 (5.2.6)	
	3	1538	1606	1623 (5.2.6)	
Втулка	влияние на КЭМ стенда незначительное				
Шпилька	влияние на КЭМ стенда незначительное				

Таблица 5.3.1 – Конечно-элементные модели, используемые при численном моделировании

Параметры		Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4	Модель 5	Модель 6	Модель 7	Модель 8	Модель 9	Модель 10	Модель 11	Модель 12
Тип расчетных элементов	Верхняя плита	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	S4R	S4R	S4R	S4R	SC8R	SC8R	SC8R	SC8R
	Нижняя плита	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R
	Каркас	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R
	Шпильки	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R
	Втулки	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R
Модель материала	Верхняя плита	Elastic	Elastic	Plastic	Elastic	Elastic	Elastic	Plastic	Elastic	Elastic	Elastic	Plastic	Elastic
	Нижняя плита	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic
	Каркас	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic
	Шпильки	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic
	Втулки	Elastic	Elastic	Plastic	Elastic	Elastic	Elastic	Plastic	Elastic	Elastic	Elastic	Plastic	Elastic
Модели контактного взаимодействия	Верхняя плита - Втулки	General	General	General	General	Surface to Surface	Surface to Surface	Surface to Surface	Surface to Surface	General	General	General	General
	Нижняя плита - Втулки	General	General	General	General	General	General	General	General	General	General	General	General
	Каркас- Нижняя плита	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie
Болтовое соединение	Предварительная затяжка	+	+	+		+	+	+		+	+	+	
Многоточечная связь	Шпилька - Верхняя плита	MPC-Beam+CONN3 D2	MPC-Beam+CONN3 D2	MPC-Beam+CONN3 D2	MPC-Beam	MPC-Beam+CONN3 D2	MPC-Beam+CONN3 D2	MPC-Beam+CONN3 D2	MPC-Beam	MPC-Beam+CONN3 D2	MPC-Beam+CONN3 D2	MPC-Beam+CONN3 D2	MPC-Beam
	Шпилька - Нижняя плита	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam
	Датчик ускорения	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link
Нагрузка	Нагрузка от детонатора (масса 3 г)	+				+				+			
	Нагрузка от детонатора и ВВ (масса 8 г)		+	+	+		+	+	+		+	+	+

5.3.2. Многоточечная связь

Для соединения верхней и нижней плиты в конструкции стенда предусмотрено болтовое соединение с использованием стальных шпилек и алюминиевых втулок. При испытаниях для плотного прилегания элементов конструкции стенда друг к другу, верхняя и нижняя плиты стягиваются с моментом затяжки $M_3 = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Схема болтового соединения представлена на рисунке 5.3.1.

Для моделирования кинематических связей в местах болтового соединения используется метод многоточечных связей (Multi-point constraint). Данный метод накладывает ограничения, как линейного, так и нелинейного характера между различными степенями свободы в КЭМ и, совместно с соединительными элементами (Connectors element), позволяет моделировать напряженно-деформированное состояние в месте болтового соединения.



Рисунок 5.3.1 – Схема болтового соединения

В КЭМ стенда используется многоточечная связь типа балки (Beam), соответствующая наличию жесткого стержня между двумя узлами, приравнивающая (ограничивающая) поступательные и вращательные степени свободы в первом узле (верхняя, нижняя плиты) к поступательным и

вращательным степеням свободы во втором узле ($U1, U0$) (Рисунок 5.3.2). Аналогичная связь задана между верхними и нижними торцами шпильки и расчетными узлами $U11$ и $U01$ соответственно.

5.3.3. Соединительные элементы

Для связи расчетных узлов $U0$ с $U01$ и $U1$ с $U11$ и приложения стягивающих сил F_0 , вследствие применения болтового соединения используется соединительный элемент типа $CONN3D2$. Положение и перемещение второго узла соединительного элемента вычисляется относительно первого узла. Соединительные элементы обладают относительными поступательными и вращательными степенями свободы, являющимися локальными для элемента, и при необходимости, доступные степени свободы могут быть ограничены.

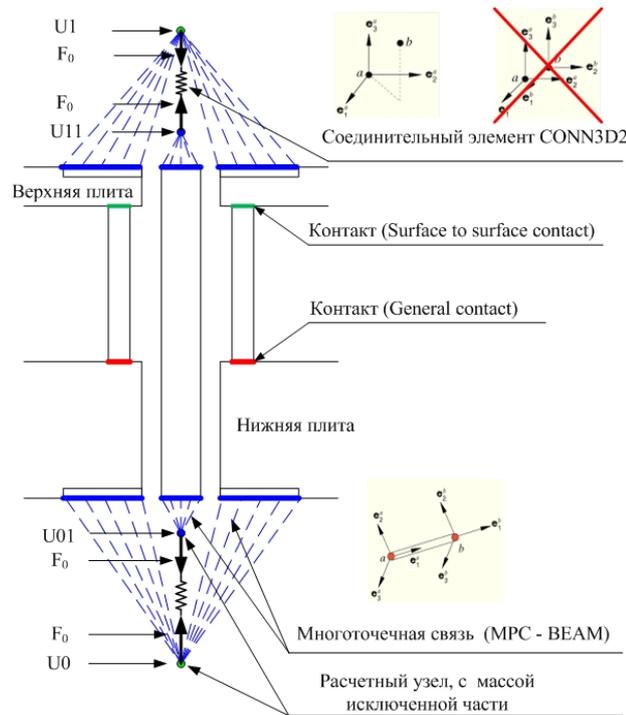


Рисунок 5.3.2 – Схема болтового соединения, используемая в моделях 1–12

При моделировании болтового соединения в узлах элемента типа $CONN3D2$ ограничивались вращательные степени свободы $UR1, UR2, UR3$, а вдоль расчетных узлов элемента, в направлении “друг-друга”, прикладывалась стягивающая сила F_0 .

Для определения стягивающей силы F_0 могут быть использованы методики, связывающие осевое усилие с моментом затяжки болтового соединения. Момент

затяжки болтового соединения M_3 и осевое напряжение σ_0 в шпильке могут быть связаны зависимостью [77]:

$$M_3 \approx 0,1 \cdot \sigma_0 \cdot d^3, \quad (5.3.10)$$

где d – диаметр шпильки, а предварительное осевое усилие F_0 :

$$F_0 = \sigma_0 \cdot S_0 = \sigma_0 \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}, \quad (5.3.11)$$

где d_0 – внутренний диаметр резьбы.

Используя формулы (5.3.10)–(5.3.11) и данные рисунка 5.3.1, вычислим осевое усилие и напряжение в шпильке, при $M_3 = 50$ Н·м:

$$\sigma_0 \approx 122, \text{ МПа} \quad F_0 \approx 18,8 \text{ кН.}$$

Полученная величина осевого усилия используется при построении математической модели стенда.

5.3.4. Модели контактного взаимодействия

В ABAQUS Explicit применяются два метода для реализации условий контакта: кинематический метод (Kinematic method) и метод штрафов (Penalty method).

Кинематический метод для строгого соблюдения условий контакта использует алгоритм кинематического экстраполятора/корректора, согласно которому запрещено взаимное проникание контактирующих поверхностей [53].

Метод штрафов реализует менее строгие условия контакта, но позволяет решать задачи с более общими условиями контактного взаимодействия [78]. Метод штрафов вводит в модель дополнительную "упругую" жесткость, которая связывает между собой контактную силу и величину взаимного проникания. Коэффициент упругости выбирается в ABAQUS Explicit для случая "жесткого" контакта автоматически таким образом, чтобы оказывалось по возможности минимальное влияние на величину шага по времени, а величина взаимного проникания была малой. Принятая по умолчанию "штрафная жесткость" основана на жесткости элементов, находящихся в области контакта. Величина взаимного

проникания обычно оказывается больше упругой деформации исходного элемента в направлении, перпендикулярном поверхности контакта.

Возможности моделирования контактирующих поверхностей, позволяют задавать свойства контакта как по нормали к области контакта, так и вдоль касательного направления.

В КЭМ стенда для нормальной компоненты контактирующих поверхностей реализована модель “жесткого” контакта, описанная в главе 3. Для определения $p=p(h)$ используется модель:

$$\begin{cases} p = 0 \text{ при } h < 0 \\ h = 0 \text{ при } p > 0. \end{cases} \quad (5.3.12)$$

При использовании метода штрафов идеализированная модель жесткого контакта (5.3.12) не всегда соблюдается из-за конечной величины жесткости контактного взаимодействия, что приводит к незначительному проникновению узлов через поверхности контакта (Рисунок 5.3.4).

Для касательной компоненты контактирующих поверхностей реализована изотропная модель трения Кулона [53]. Для стандартной модели трения Кулона, предполагается, что относительное движение тел, находящихся в контакте отсутствует, если эквивалентное напряжение от трения

$$\tau_{\text{эк}} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}, \quad (5.3.13)$$

где τ_1 и τ_2 – ортогональные компоненты касательного напряжения на поверхности контакта, не превышает критического напряжения $\tau_{\text{крит}}$, которое пропорционально контактному давлению p (Рисунок 5.3.5)

$$\tau_{\text{крит}} = \mu \cdot p, \quad (5.3.14)$$

где μ – коэффициент трения идентичный во всех направлениях и принимаемый 0,2 [59]. В КЭМ стенда для касательной компоненты контактирующей поверхности принято $\tau_{\text{крит}} > \tau_{\text{эк}}$, что соответствует отсутствию проскальзывания в модели кулоновского трения (Рисунок 5.3.6).

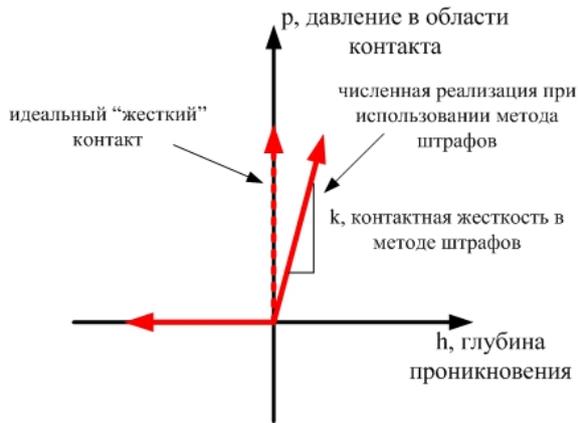


Рисунок 5.3.4 – Свойства контакта в направлении нормали к контактирующим поверхностям



Рисунок 5.3.5 – Свойства контакта в касательном направлении к контактирующим поверхностям



Рисунок 5.3.6 – Области сдвига/"склеивания" для модели кулоновского трения

Алгоритм общего контакта не всегда является наиболее надежной реализацией контактного взаимодействия. Зачастую явное указание поверхностей в алгоритме контактных пар, особенно для оболочечных элементов, позволяет обеспечить более надежное и численно правильное решение. На рисунке 5.3.7 приведена модель стяжки, где фрагмент верхней плиты (а) стягивается с фрагментом нижней плиты (б) через стальную шпильку, которой сообщается осевое усилие F_0 через многоточечную связь и соединительные элементы CONN3D2. Представленная расчетная схема реализована для двух типов контакта. По графикам на рисунках 5.3.8 и 5.3.9 легко видеть различие в вычислении контактного усилия.

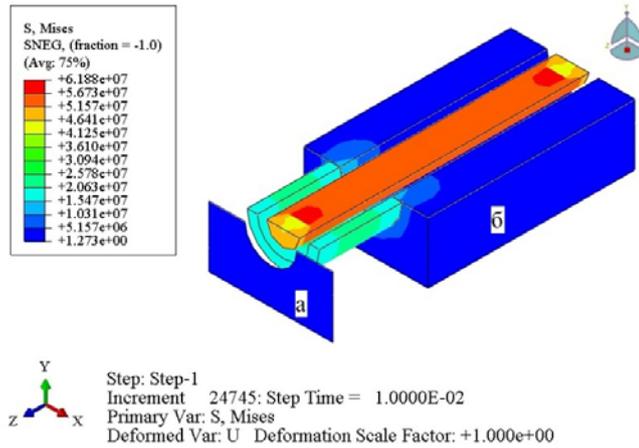


Рисунок 5.3.7 – Фрагмент конструкции стенда (узел связи верхней и нижней плиты)

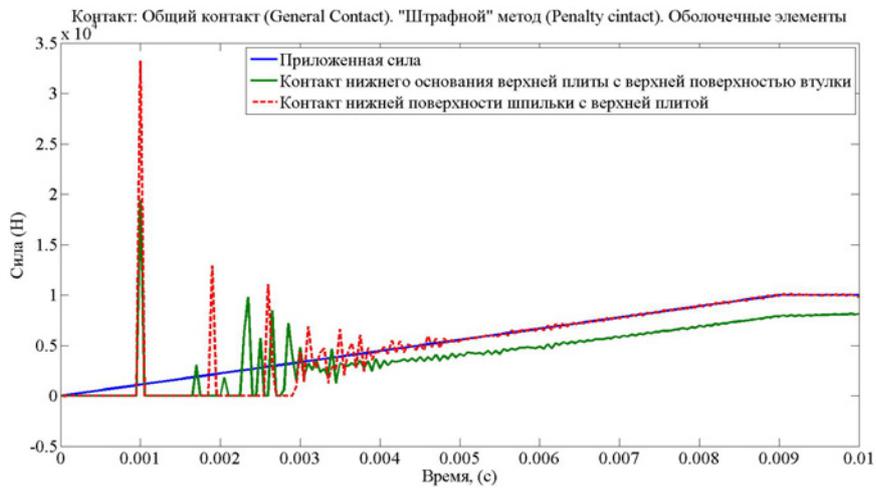


Рисунок 5.3.8 – Контактное усилие в случае алгоритма общего контакта

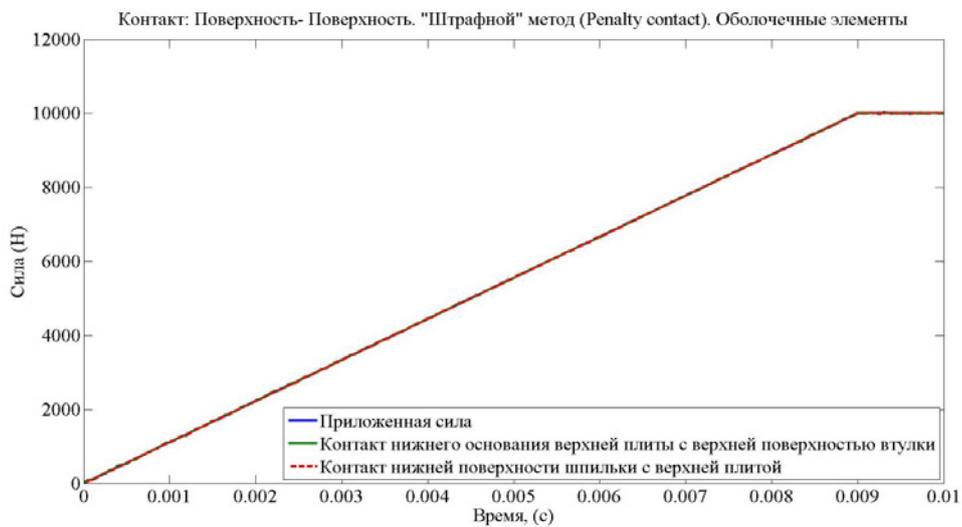


Рисунок 5.3.9 – Контактное усилие в случае алгоритма контактных пар

5.3.5. Средства регистрации виброударного ускорения

При проведении испытаний в узлах крепления объекта испытаний (ОИ) на поверхности верхней плиты устанавливаются первичные преобразователи – акселерометры, для регистрации сообщаемых ОИ ускорений. Акселерометры, как правило, в количестве 3-х штук, крепятся к верхней плите через стальной куб, с гранью 20 мм, и расположены ортогонально друг к другу, образуя тем самым ортогональную систему координат $\{X,Y,Z\}$. Общая масса системы "акселерометры + стальной куб" $M_a=50$ г. Для учета наличия датчиков и стального куба, в КЭМ стенда, дополнительно вводятся соединительные элементы CONN3D2 в виде пирамиды с точечной массой M_a в вершине, где располагается центра масс исключенной из модели системы "акселерометры + стальной куб" (Рисунок 5.3.10). На соединительные элементы накладываются граничные условия в виде равенства поступательных степеней свободы $U_a=U_b$ и сохранения базового расстояния L_{ab} между связанными узлами (Рисунок 5.3.11). Вращательные степени свободы не учитываются.

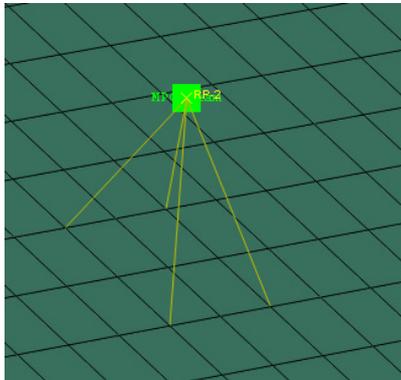


Рисунок 5.3.10 – Эквивалентная модель системы "акселерометры + стальной куб"

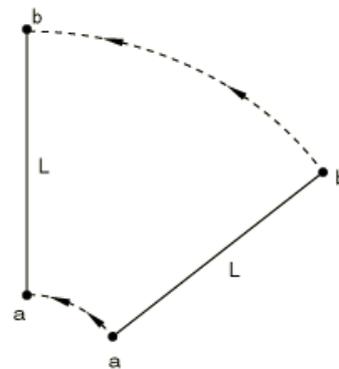


Рисунок 5.3.11 – Соединительный элемент CONN3D2 с граничными условиями типа "Link"

В процессе численного моделирования сохраняются данные по ускорениям вдоль осей X,Y,Z . Для предотвращения эффекта маскирования (подмены) частот, данные сохраняются после каждой численной итерации.

5.4. Результаты численного моделирования

Результаты численного моделирования сравнивались с экспериментальными данными, полученными при подрыве импульсного устройства в двух случаях:

- подрыв детонатора (1 испытание);
- подрыва детонатора и листового ВВ массой 5 г (2 испытания).

В процессе испытаний регистрировались виброударные ускорения с использованием 9 акселерометров типа PCB M350B23. Схема расстановки акселерометров приведена на рисунке 5.4.1. Регистрация ускорений осуществлялась с использованием информационно измерительной системы на базе измерительных модулей NI PXIe4496. Частота опроса $f_s=50$ кГц, количество выборок 100 тыс. точек. Нагружение производилось вдоль оси X.

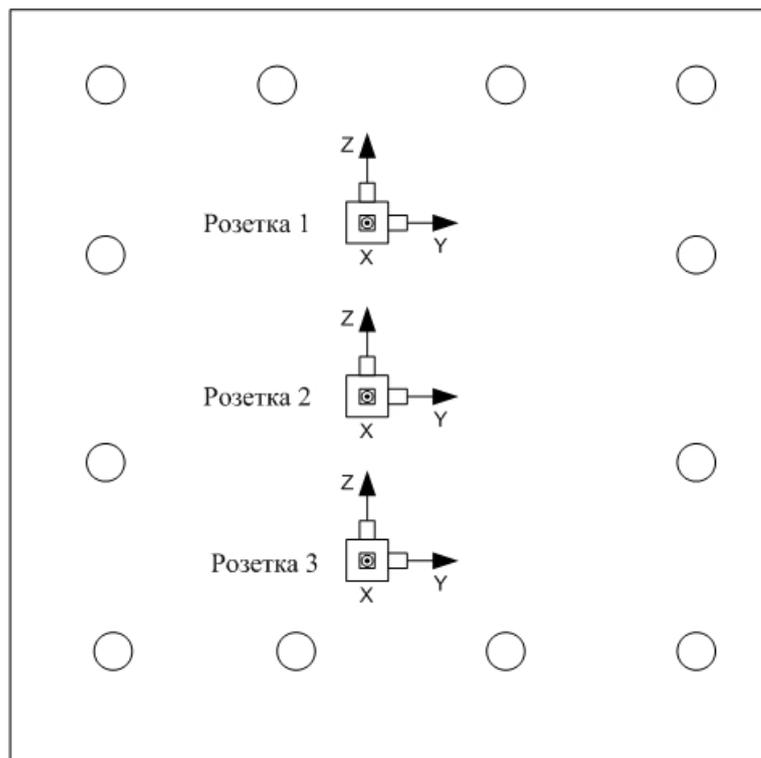


Рисунок 5.4.1 – Схема расстановки датчиков ускорения. Верхняя плита стенда. Вид сверху

Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования проводилось путем сопоставления ударных спектров, как основной количественной оценкой, принятой на практике при анализе виброударных

процессов. Качественные характеристики подобия полученных результатов определялись по результатам проведения статистической обработки согласно формулам (5.1.1) – (5.1.3). При пиротехнических ударах экстремальные значения компонент вектора ускорений практически сопоставимы. Поэтому анализ моделируемых штатных характеристик виброударного процесса целесообразно провести для векторных результирующих ускорений; эти ускорения более представительны, так как их величина не зависит от осей ориентации датчиков розетки акселерометров. На рисунках 5.4.2–5.4.4 приведены покомпонентные спектры удара для случая подрыва детонатора. Эквивалентная масса ВВ при численном моделировании для указанного случая составляла 3 г. На рисунке 5.4.5 представлен вычисленный 3D-вектор ударного спектра (формула 5.1.4).

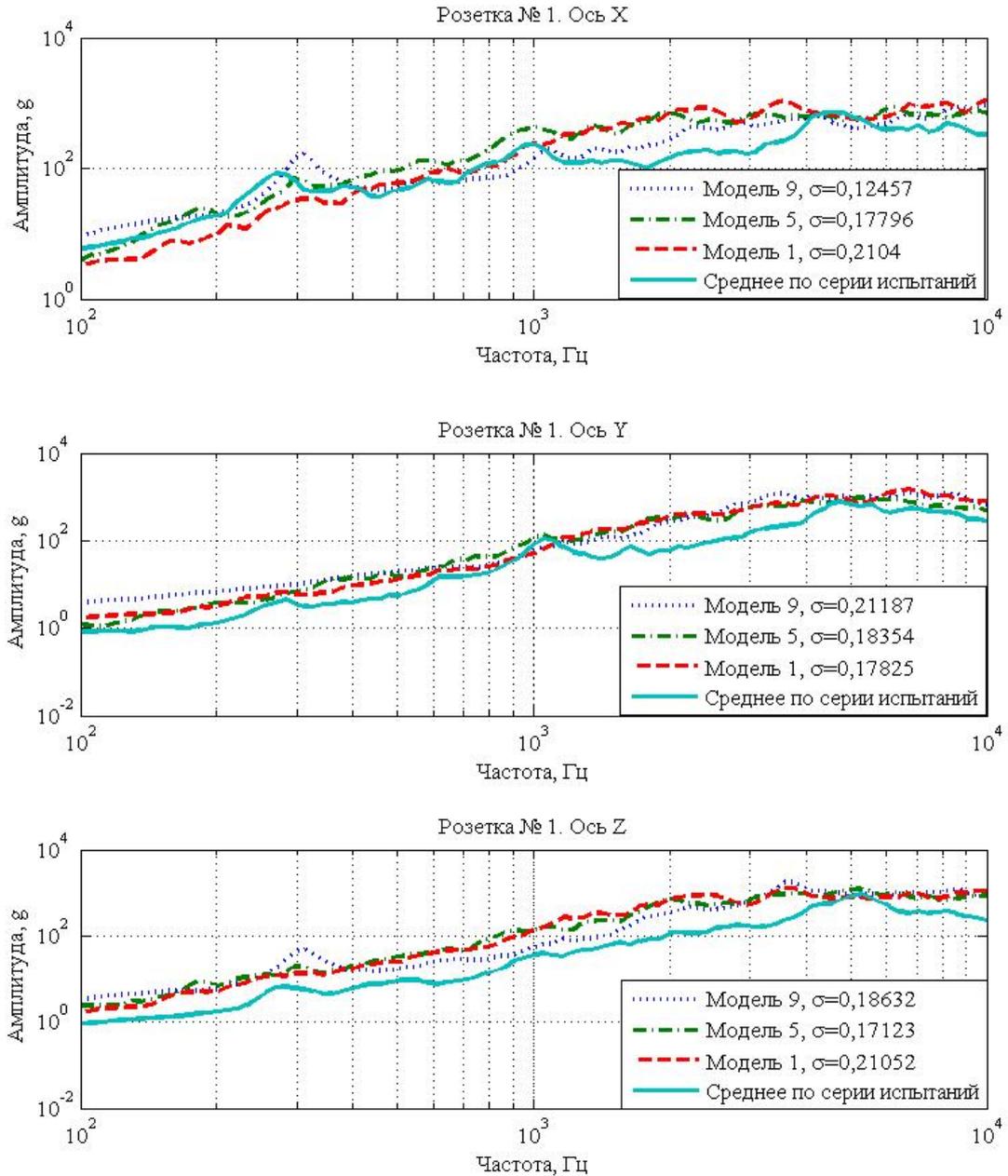


Рисунок 5.4.2 – Покомпонентные ударные спектры при подрыве детонатора (модели 1,5,9, розетка №1)

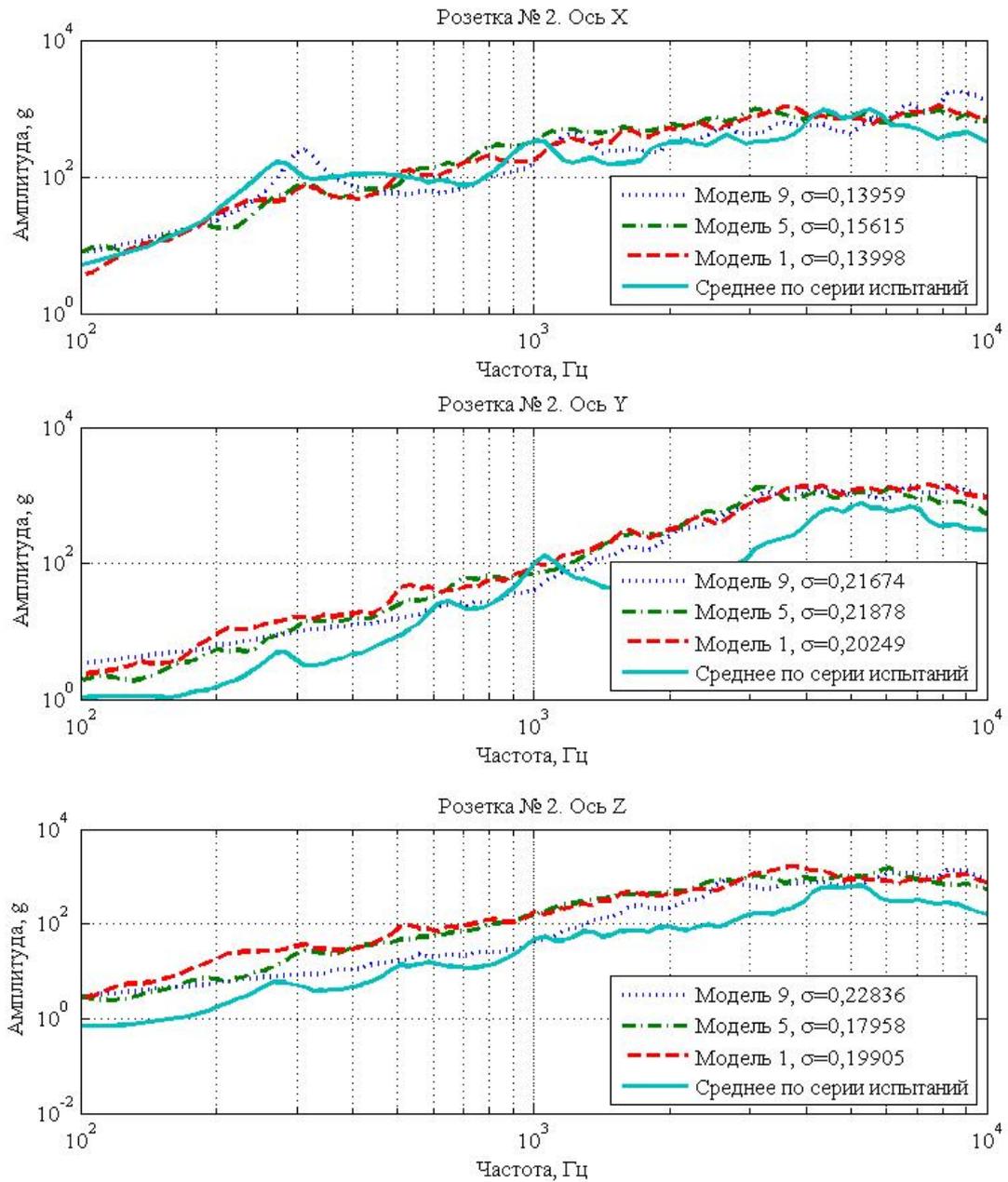


Рисунок 5.4.3 – Покомпонентные ударные спектры при подрыве детонатора (модели 1,5,9, розетка №2)

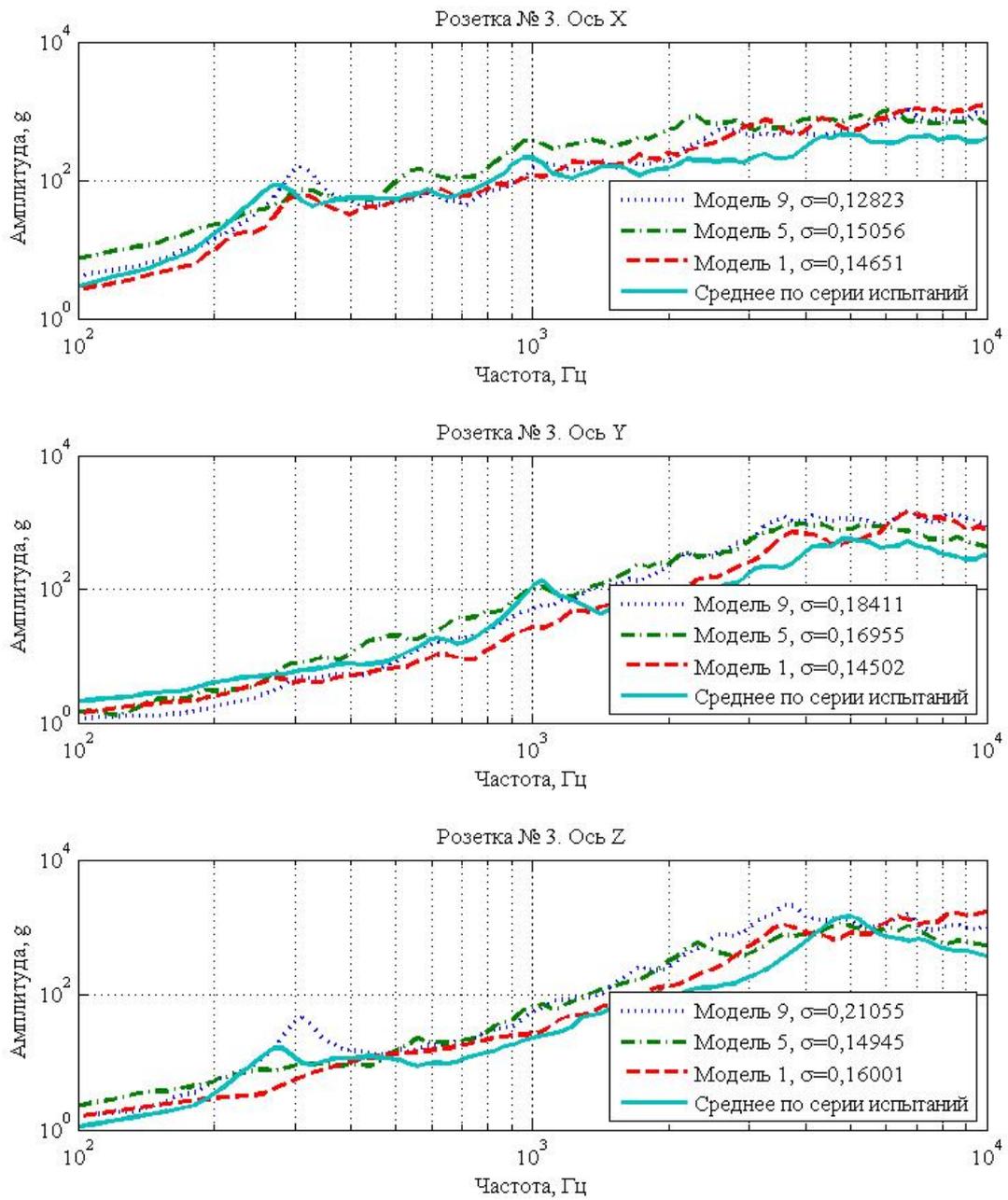


Рисунок 5.4.4 – Покомпонентные ударные спектры при подрыве детонатора (модели 1,5,9, розетка №3)

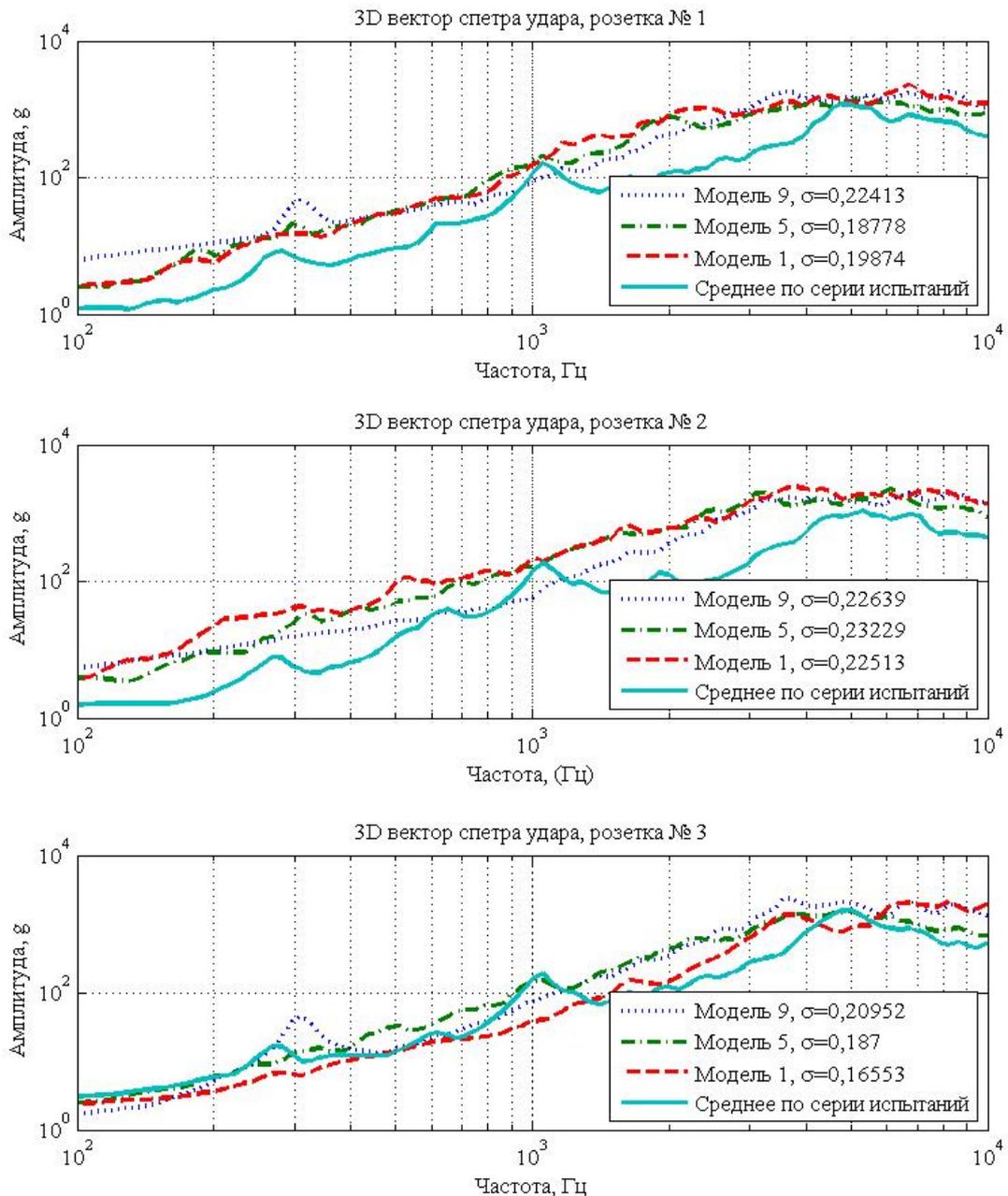


Рисунок 5.4.5 – 3 D вектор виброударной нагрузки при подрыве детонатора (модели 1,5,9)

Далее представлены результаты численного моделирования с учетом массы заряда и эквивалентной массы детонатора на примере математических моделей 2, 6 и 10, с характеристиками указанными в таблице 5.3.1. За исходную нагрузку принималось вычисленное значение $F(t)$ для случая заряда массой 8 грамм ВВ (Рисунок 4.3.8).

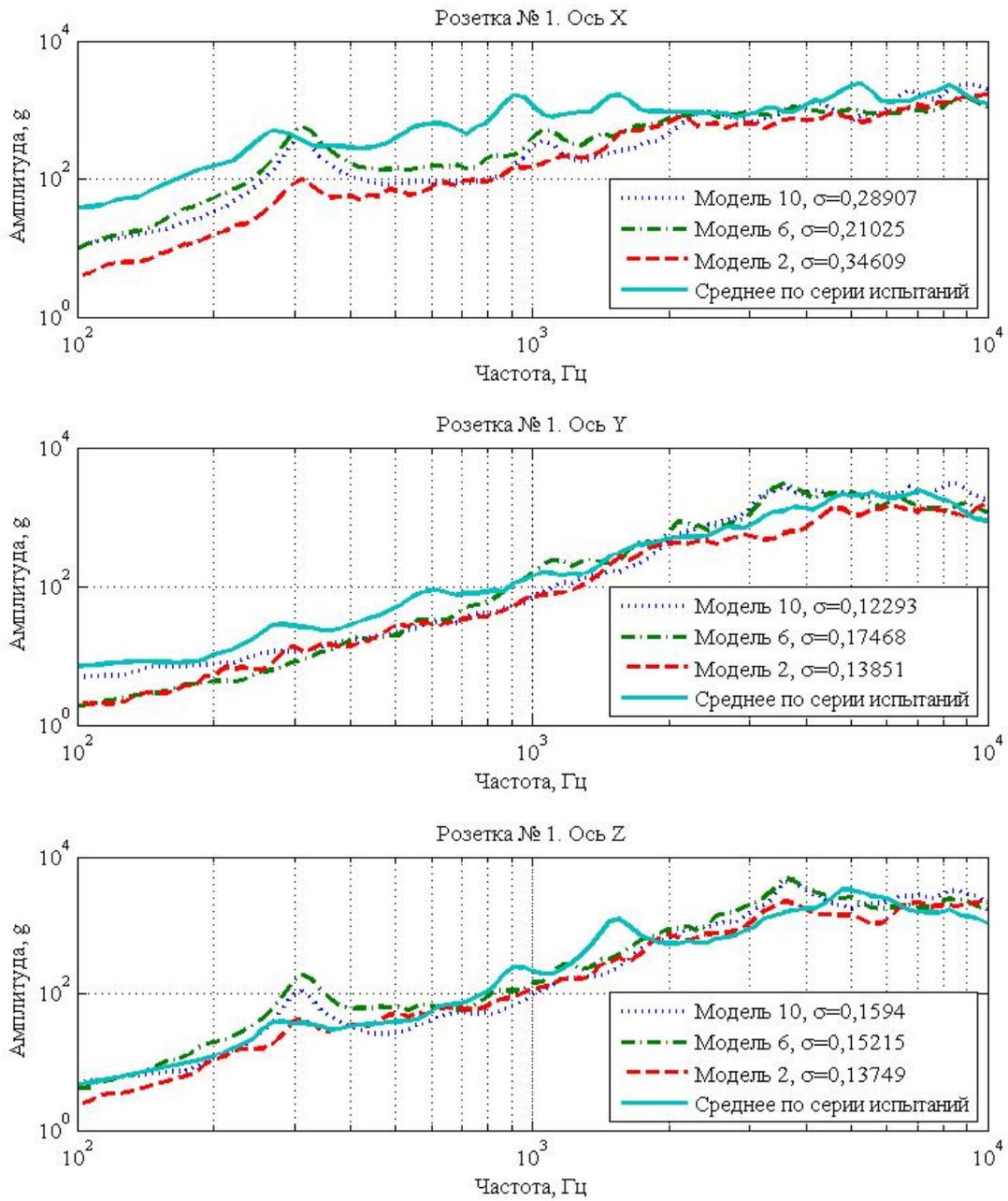


Рисунок 5.4.6 – Покомпонентные ударные спектры при нагружении с учетом заряда детонатора (модели 2, 6, 10, розетка №1)

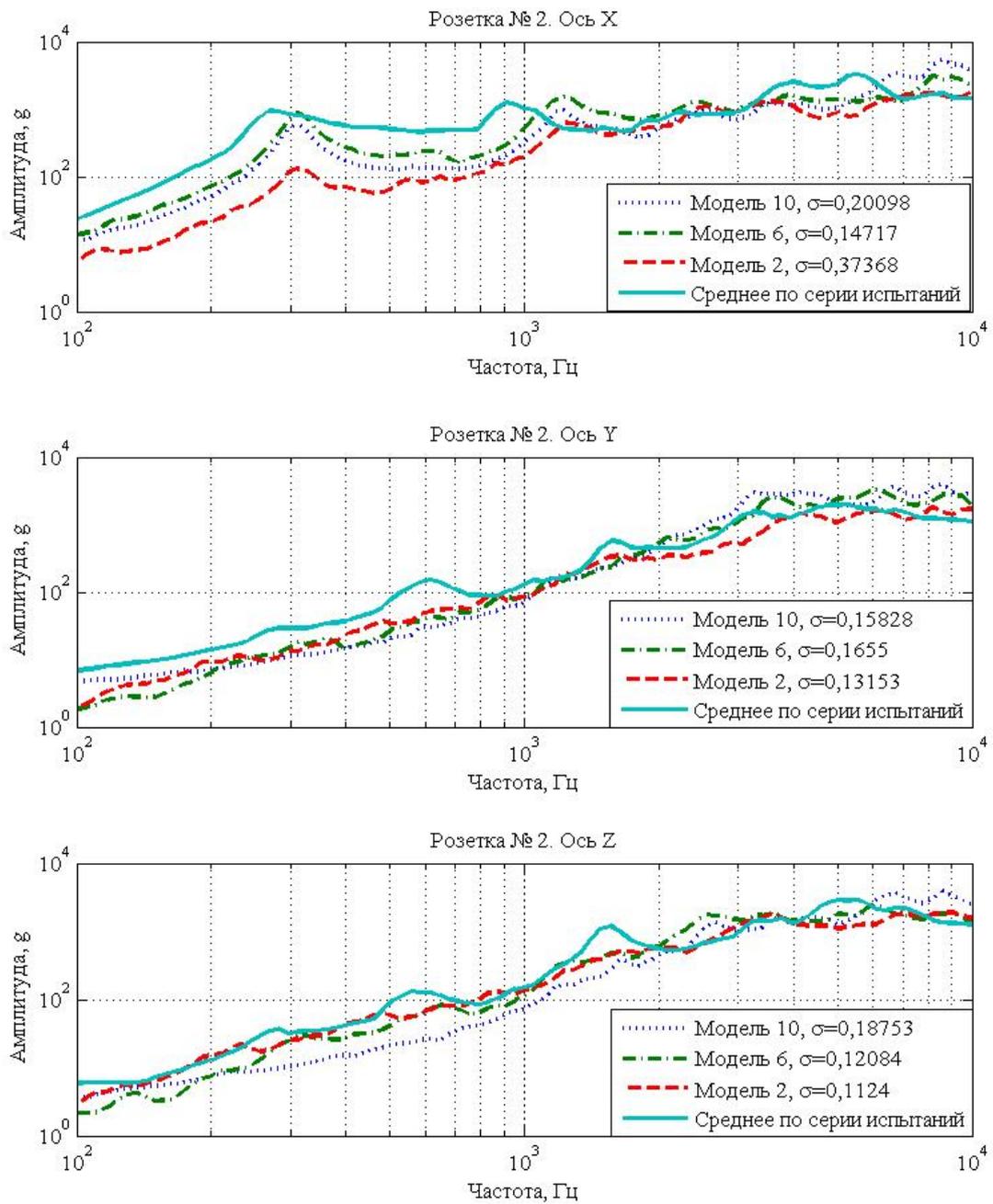


Рисунок 5.4.7 – Покомпонентные ударные спектры при нагружении с учетом заряда детонатора (модели 2, 6, 10, розетка №2)

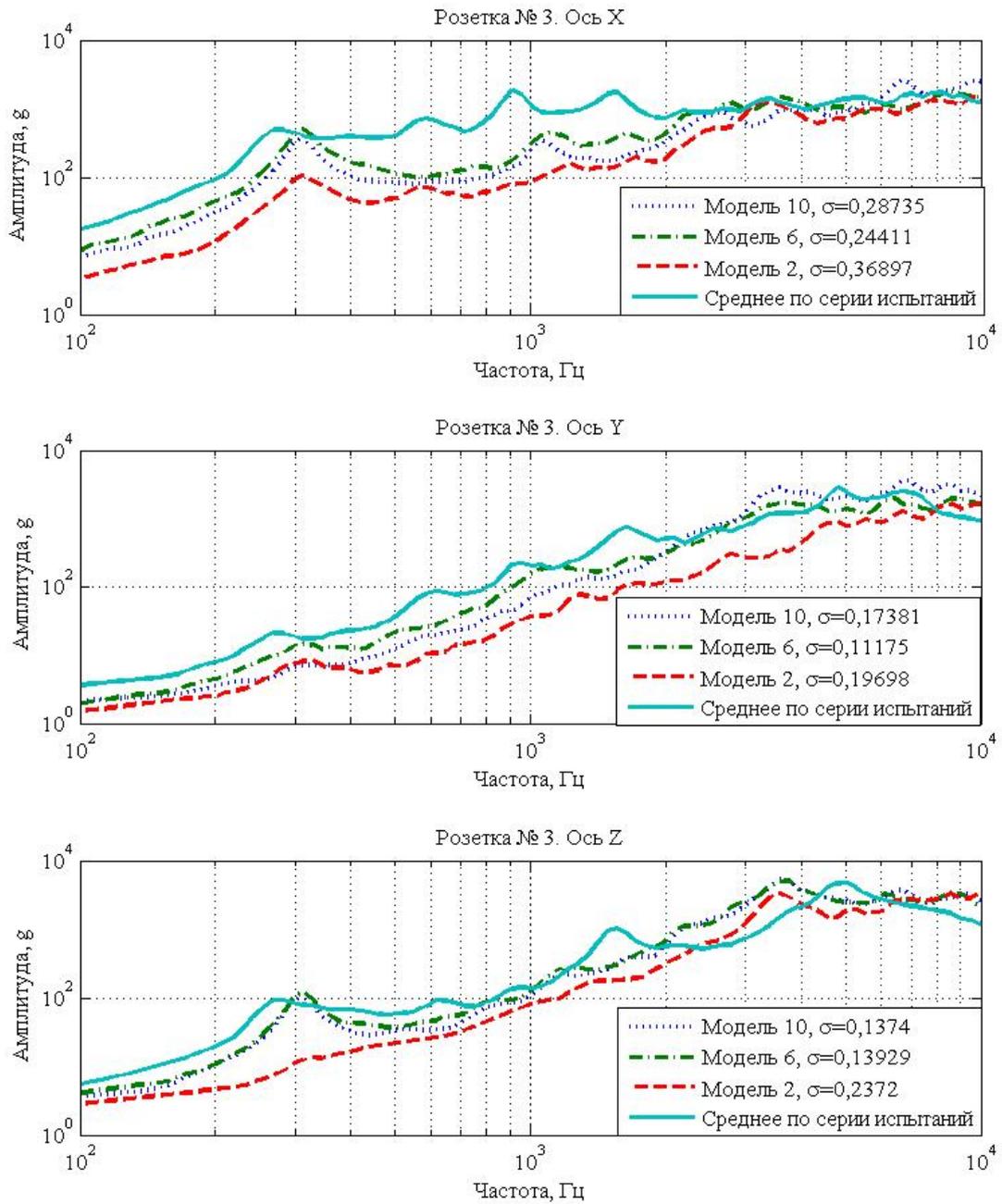


Рисунок 5.4.8 – Покомпонентные ударные спектры при нагружении с учетом заряда детонатора (модели 2, 6, 10, розетка №3)

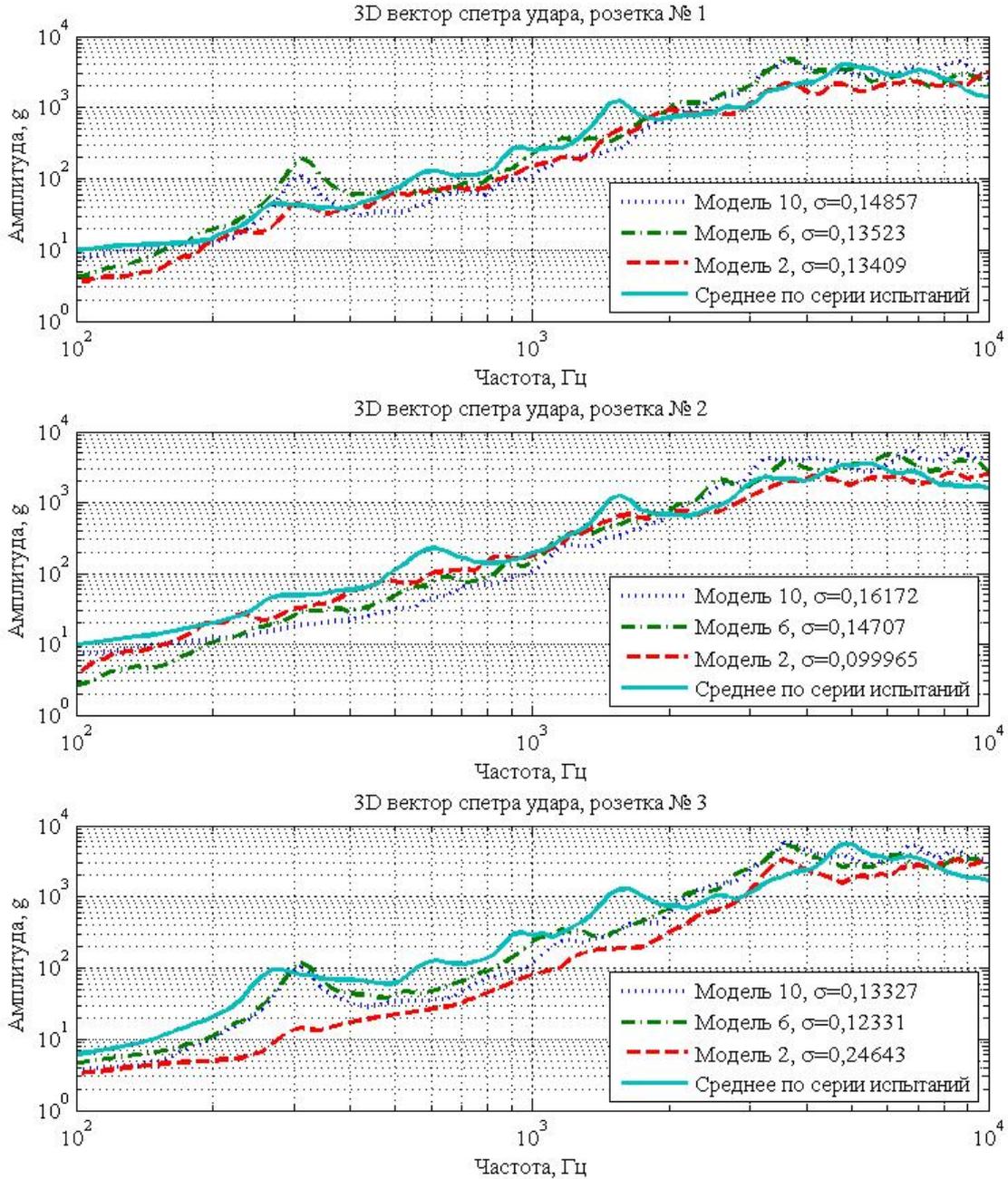


Рисунок 5.4.9 – 3 D вектор виброударной нагрузки (модели 2, 6, 10)

В таблице 5.4.1 приведены сводные результаты вычисления величин соответствия согласно формулам 5.1.1–5.1.3 на моделях 1–12 (Таблица 5.3.1) при моделировании виброударного воздействия.

Таблица 5.4.1 – 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

* математические модели для вычисления эквивалентной массы заряда ВВ при подрыве детонатора

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 устройств локального нагружения 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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./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 // 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./ 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. Направления развития информационно-измерительных систем в обеспечение обработки ударной прочности перспективных изделий РКТ/ И.С. Комаров // Тезисы докл. IV всероссийской научно-технической конференции «Измерения и испытания в ракетно-космической промышленности».-М:МАПИП,2015.-с. 42-45
5. Алексеенко, В.В. Вибрации в технике: Справочник [Текст]. В 6-ти т. Т.5. Измерения и испытания/ В.В. Алексеенко и др.; под ред М.Д. Генкина, ред. совет: В.Н. Челомей (пред.).-М.:Машиностроение.- 1981.- 496 с.
6. Harris, M. Shock and Vibration handbook/ С. М. Harris, A. G. Piersol, 5 th ed. McGraw-Hill,2002. -1457 p.-ISBN 0-07-137081-1

7. Токарев, М.Ф. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры [Текст]/ М.Ф. Токарев, Е.Н. Талицкий, В.А. Фролов. -М.:Радио и связь, 1984.-224 с.
8. Александровская, Л.Н. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем [Текст]: Учеб. пособие / Л.Н. Александровская, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов, и др.-М.:Логос, 2003.-736 с.
9. Chang K. Y. Pyrotechnic devices, shock levels and their applications // 9th International Congress on Sound and Vibration Orlando, USA. – 2002.
10. NASA-STD-7003A. Pyroshock Test Criteria. NASA, Washington, DC 20546-0001, 2011 – 41 p.
11. MIL-STD-810G. Test Method Standard. Environmental engineering considerations and laboratory tests. US Army Publications, 2008 – 804 p.
12. Moening C. J. Pyrotechnic shock flight failures //Institute of environmental sciences pyrotechnic shock tutorial program, 31st Annual Technical Meeting, Inst. Envir. Sc. – 1985. – С. 04-05.
13. Filippi E., Attouoman H., Conti C. Pyroshock simulation using the alcatel etca test facility //Proceedings of the first European conference on launcher technology. – 1999.
14. Dilhan D. et al. Pyroshock generation //Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing 2005. – 2005. – Т. 581. – С. 124.
15. Secretariat E. ECSS-E-HB-32-26A. Spacecraft mechanical loads analysis handbook. – ESA, 2013.- 505p.
16. 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>
17. ГОСТ Р 53190-2008. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических

изделий. Испытания на удар с воспроизведением ударного спектра [Текст].-Введ. 2008-12-18.-М.:Стандартинформ,2009.-23 с.

18. ISO 18431-4:2007(E). Mechanical vibration and shock - Signal processing — Part 4: Shock-response spectrum analysis. -2007-02-01-16 p.

19. Bateman V., Merritt R. Validation of Pyroshock Data //Journal of the IEST. – 2012. – Т. 55. – №. 1. – С. 40-56.

20. Secretariat E. ESSB-HB-E-005, “ESA Mechanical Shock Design and Verification Handbook” - 2012.

21. Secretariat E. Space Engineering Testing. – Technical Report ECSS-E-10-03A, ESA-ESTEC Requirements & Standards Division, 2002.

22. Rockot User's Guide EHB0003 [Electronic resource] // [EUROCKOT LAUNCH Services GmbH](http://www.eurockot.com/wp-content/uploads/2012/10/UsersGuideIss5Rev0web.pdf). 2011. Issue 5. 220 p. URL: <http://www.eurockot.com/wp-content/uploads/2012/10/UsersGuideIss5Rev0web.pdf> (accessed: 01.12.2015)

23. SOYUZ from the Guiana Space Center User's Manual [Electronic resource] // [Arianespace](http://www.arianespace.com/launch-services-soyuz/Soyuz_Users_Manual_CSG_June06.pdf), 2006. Issue 1. 231 p. URL: http://www.arianespace.com/launch-services-soyuz/Soyuz_Users_Manual_CSG_June06.pdf (accessed: 01.12.2015)

24. PROTON LAUNCH SYSTEM MISSION PLANNER'S GUIDE [Electronic resource] // [International Launch Services](http://www.ilslaunch.com/sites/default/files/pdf/Proton%20Mission%20Planner's%20Guide%20Revision%207%20(LKEB-9812-1990).pdf). 2009. 395 p. URL: [http://www.ilslaunch.com/sites/default/files/pdf/Proton%20Mission%20Planner's%20Guide%20Revision%207%20\(LKEB-9812-1990\).pdf](http://www.ilslaunch.com/sites/default/files/pdf/Proton%20Mission%20Planner's%20Guide%20Revision%207%20(LKEB-9812-1990).pdf)(accessed: 01.12.2015)

25. Bernaudin J.B., Vergniaud J.B., Kasper J., et al. Shock Handbook Part 1: Shock derivation to subsystems [Electronic resource], // [7th ESA CNES International Workshop on Space Pyrotechnics](http://www.esa.int/ESA/Workshop_on_Space_Pyrotechnics). – 2008 (accessed: 11.03.2015)

26. Смирнов, Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений [Текст]/ Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский -М.:Наука, 1969-512 с.

27. Hughes, W. O. Application of the bootstrap statistical method in deriving vibroacoustic specifications / W. O. Hughes, T. L. Paez // National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, 2006-18p.

28. Standard M. Test requirements for launch, upper-stage, and space vehicles //MILSTD-1540C Section. – 1994. – Т. 6. – №. 10.

29. Efron, B. An introduction to the bootstrap / Efron B., Tibshirani R. J. – CRC press, 1994.-437 p. -ISBN 0-412-04231-2

30. Wattiaux, D. Pyroshock simulation for qualification of space electronic equipments / D. Wattiaux, O. Verlinden, C. De Fruytier // Thales Alenia Space ETCA. – 2008.

31. Girard A., Cavro E. Test Specifications and Facilities for Shock Environment Simulation [Electronic resource] // [7th ESA CNES International Workshop on Space Pyrotechnics](#). – 2008 (accessed: 11.03.2015).

32. Артоболевский, И.И. Вибрации в технике: Справочник[Текст]. В 6-ти т. Т.1. Колебания линейных систем/ И.И. Артоболевский и др;под ред. В.В. Болотина, ред. совет: В.Н. Челомей (пред.).-М.:Машиностроение.-1978.-352 с.

33. Dilhan D. et al. Definition and manufacturing of the pyroshock bench [Electronic resource] // [7th ESA CNES International Workshop on Space Pyrotechnics](#). – 2008 (accessed: 11.03.2015).

34. 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.-283 с.

35. Иофе, В.К Справочник по акустике [Текст]/ В.К. Иофе, В.Г. Корольков, М.А. Сапожков; под ред. М.А. Сапожникова. - М.: Связь, 1979. - 312 с.

36. Стенд для ударных испытаний [Текст]: пат. 2244910 Рос. Федерация:, МПК G 01 M 7/08/Викторов В.А., Камчатный В.Г., Клобукова В.И., Мельник А.В., Осипова В.А.; заявитель и патентообладатель Минатом РФ, ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ" – №2003124377/28; заявл. 04.08.2003, опубл. 20.01.2005, Бюл. №2.

37. Способ испытаний на ударные воздействия [Текст]: пат. 2386939 Рос. Федерация: МПК G 01 M 7/08/ Орлов А.С, Орлов С.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие

"Научно-производственное объединение прикладной механики им. акад. М.Ф. Решетнева". – №2008133110/28 ;заявл. 11.08.2008; опубл. 20.04.2010, Бюл. №11.

38. 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.

39. 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.

40. Хоменко, Ю. П. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах [Текст] / Ю. П. Хоменко, А. Н. Ищенко, В. З. Касимов – Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния Рос. АН., 1999. - 256 с.

41. Семенов, И.В. Применение многопроцессорной вычислительной техники для решения задач внутренней баллистики [Текст]/ И. В. Семенов, П.С. Уткин, И.Ф. Ахмедьянов, И.С. Меньшов //Вычислительные методы и программирование. – 2011. – Т. 12. – №. 1. – С. 183-193.

42. Серебряков, М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. Изд. 3-е. Учебник [Текст] / М. Е. Серебряков - М: Государственное научно-техническое издательство Оборонгиз, 1962, - 705 с.

43. Atwood, A. A Mathematical Model for Combustion of Energetic Powder Materials / A.Atwood, E. K Friis., J. F. Moxnes //INTERNATIONAL ANNUAL CONFERENCE-FRAUNHOFER INSTITUT FUR CHEMISCHE TECHNOLOGIE. – Berghausen; Fraunhofer-Institut fur Chemische Technologie. – С. V27-V27. – ISSN 0722-4087, 2003.

44. ANSYS, Inc. AUTODYN. ®. User Manual Version 12.0. Release 12.0. Southpointe. 275 Technology Drive. Canonsburg, PA 15317. - 2009.

45. Зельдович, Я. Б. К теории горения порохов и взрывчатых веществ [Текст] / Я. Б. Зельдович //Журн. эксперим. и теор. физики. – 1942. – Т. 12. – №. 11/12. – С. 498-524.

46. Королев, А. А. Газодинамика и баллистика[Текст]: учеб.пособие по дисциплине "Основы баллистики и аэродинамики"/ А.А. Королев, И.О. Толкачева, В.Г. Черный; под ред. А.А. Королева. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. - 91 с.

47. Косточко, А. В. Пороха, ракетные твердые топлива и их свойства. Воспламенение и горение порохов и ракетных твердых топлив [Текст]: учеб. пособие / Б. М. Казбан, А. В. Косточко.- Казань : КГТУ, 2010 .- 209 с. - ISBN 978-5-7882-0884-8

48. Чубанов, Е.В. Внутренняя баллистика. Учебник [Текст] / Е.В. Чубанов - Ленинград: Изд-во военной артиллерийской академии им. М.И. Калинина, 1975. - 244 с.

49. Косточко, А.В. Пороха, ракетные твердые топлива, и их свойства. Физико-химические свойства порохов и ракетных твердых топлив: Учебное пособие [Текст] / А.В. Косточко, Б.М. Казбан - М.: ИНФРА-М, 2014. - 400 с.

50. Century Dynamics Inc. AUTODYN Explicit Software for Nonlinear Dynamics. Theory Manual. Revision 4.3. - 2005. - 235 с.

51. Johnson, G. R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures / G. R. Johnson, W. H. Cook //Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. – 1983. – Т. 21. – С. 541-547.

52. Anderson, C. E. Computational modeling of explosive-filled cylinders / C. E. Anderson, et. al //International Journal of Engineering Science. – 1985. – Т. 23. – №. 12. – С. 1317-1330.

53. Hibbitt, Karlsson, Sorensen. ABAQUS/Explicit: User's Manual. – Hibbitt, Karlsson and Sorensen, 2001. – Т. 1.

54. Arruda, E. M. A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials / E. M. Arruda, M. C. Boyce // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 1993. – Т. 41. – №. 2. – С. 389-412.
55. Айзерман, М. А. Классическая механика [Текст] / М. А. Айзерман – М.: Наука, 1980. - 368 с.
56. Годунов, С.К. Разностные схемы [Текст] / С.К. Годунов, В.С. Рябенский-М.:Наука, 1972. – 400 с.
57. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы Пер. с англ. [Текст] / Р Галлагер -М.:Мир, 1984.-428 с.
58. Belytschko T., Bindeman L. P. Assumed strain stabilization of the eight node hexahedral element // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 1993. – Т. 105. – №. 2. – С. 225-260.
59. Кошкин, Н. И. Справочник по элементарной физике [Текст] / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич. - 2-е изд., стереотип. - М.: Физматгиз, 1962. - 208 с.
60. Абрамян, Б.Л. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах[Текст]. Том 1/ Б.Л. Абрамян и др; под ред. И.А. Биргер, Я.Г. Пановко. - М.:Машиностроение - 1968 - 831 с.
61. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике [Текст]/ О. Зенкевич - М.:Мир, 1975.- 541 с.
62. Орленко, Л.П. Физика взрыва [Текст] / Под редакцией Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – в 2 т. Т. 1. – М.: Физмалит, 2004. – 832 с – ISBN5-9221-0219- 2.
63. Любомудров, А.А. Элементы физики высоких плотностей энергии [Текст] / А.А. Любомудров - М.: Министерство обороны СССР - 1979 г. - 103 с.
64. Kalmykov, Y. V. et al. Behavior of rubber in shock waves and rarefaction waves / Y. V. Kalmykov et al. // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 1990. – Т. 31. – №. 1. – С. 116-120.
65. Демидов Б. А. Воздействие мощных потоков энергии на вакуумную резину[Текст]/ Б. А. Демидов, В.П. Ефремов // *Журнал технической физики*. – 2003. – Т. 73. – №. 6. – С. 130-135.

66. Wardlaw Jr A. B. Implementation and application of the p-alpha equation of state in the dysmas code / A. B. Wardlaw, R. McKeown, H. Chen – NAVAL SURFACE WARFARE CENTER DAHLGREN DIV VA, 1996. – №. NSWCDD/TR-95/107.

67. Kipp M. E. Polyurethane foam impact experiments and simulations / M. E. Kipp [et al.] // SHOCK COMPRESSION OF CONDENSED MATTER - 1999. – AIP Publishing, 2000. – Т. 505. – №. 1. – С. 313-316.

68. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов [Текст]/ Ю.Н Работнов - М.: Физматгиз, 1962. - 456 с.

69. Баум Ф. А. Физика взрыва [Текст]/ Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959.- 800 с.

70. Паршиков А.Н. Применение решения задачи Римана в методе частиц [Текст]/ А.Н. Паршиков // Журнал Вычислительной математики и математической физики. – 1999. – Т. 39, № 7. – С. 1216-1225.

71. Шарапов В. М. Датчики: Справочное пособие[Текст] / под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука.-М.: Техносфера. – 2012. – 624 с.

72. Доннелл Л. Г. Балки, пластины и оболочки: Пер. с англ./ Под ред. Э.И. Григолюка [Текст] / Л.Г. Доннелл – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 568 с.

73. Leissa A. W. Vibration of plates / A. W. Leissa – Ohio State University Columbus, 1969. – P. 362.

74. Young W. C. Roark's formulas for stress and strain / W. C. Young – New York : McGraw-Hill, 2002. – Vol. 7. –P. 854

75. Ананьев, И.В. Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем [Текст]/ И.В. Ананьев -М.: ОГИЗ, 1946. - 223 с.

76. Newman M. B., Pipano A. Fast modal extraction in NASTRAN via the FEER computer program(based on automatic matrix reduction method for lower modes of structures with many degrees of freedom) // NASA. Langley Res. Center NASTRAN: Users' Experiences,1973. – 1973. – С. 485-506.

77. Решетов, Д. Н. Детали машин: Учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов [Текст] / Д. Н. Решетов. - 4-е изд. - М.: Машиностроение, 1989. - 496 с. - ISBN 5-217-00335-9

78. Wriggers P. Nonlinear finite element methods / P. Wriggers – Springer Science & Business Media, 2008.- P. 560 – ISBN 978-3-540-71000-4.