

УДК 539.3/.5

Наземная экспериментальная отработка изделий ракетно-космической техники на ударное воздействие от пиротехнических средств разделения

Комаров И.С.

Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИ маш),

ул. Пионерская, 4; Королев, Московская область, 141070, Россия

e-mail: komarovis@gmail.com

Аннотация

Актуальной научно-технической задачей является наземная экспериментальная отработка крупномасштабных макетов изделий ракетно-космической техники на нагрузки от срабатывания пиротехнических средств разделения. Для этих целей разработано мобильное ударное устройство, воспроизводящее ударные нагрузки нормированные по спектру удара. В статье представлены результаты экспериментальных исследований возможностей мобильного ударного устройства. Проведено сравнение экспериментальных данных при срабатывании штатных пиротехнических средств разделения и нагрузок, реализуемых на конструкции при использовании мобильного ударного устройства. Разработана методика численного моделирования ударного нагружения на примере мобильного ударного устройства.

Ключевые слова: виброударное нагружение, ударная прочность, пиротехнические средства разделения, экспериментальная отработка, численное моделирование

1 .Введение

Пиротехнические устройства широко применяются в ракетно-космической технике в качестве основных элементов систем разделения ступеней, отделения космического аппарата (КА) от разгонного блока, расчеховки и раскрытия панелей солнечных батарей и антенн, воспламенения топлива двигательных установок и прочее. В конструкции пиротехнических изделий содержатся заряды взрывчатого вещества (ВВ), инициирование которых приводит к разрушению связи и как следствие - динамическому локальному воздействию на конструкцию импульсной нагрузки. Такое динамическое воздействие представляет собою распространяющийся по конструкции быстропротекающий затухающий колебательный процесс, характеризующийся высокими частотами и амплитудами волн деформации. В ряде случаев, данное воздействие может сопровождаться составляющими от волн разгрузки, возникающими при снятии нагрузки предварительно напряженных узлов связи элементов конструкции.

Виброударный процесс в исследуемой точке конструкции характеризуется максимальной амплитудой ускорения (m/c^2) или реализуемой перегрузкой (g), полосой частот и длительностью воздействия. Параметры виброударного процесса напрямую зависят от расстояния до места срабатывания пироприборов, типа используемого средства разделения (пирочека, пиросекатор, пироболт, кумулятивный нож и т.д. [1]) и циклограммы срабатывания.

Виброударное нагружение от пироприборов в отличии от случаев нагружения при посадке, стыковке элементов КА и нестационарных режимах работы ДУ

характеризую тем, что практически не приводят к изменению скорости центра масс объекта подвергнувшегося воздействию. Воздействия пиротехники, как правило, редко сопровождаются значительными повреждениями или разрушениями несущей конструкции, однако могут быть причиной отказов электронных и оптических компонент бортового оборудования. Повреждение даже одного элемента может привести к отказу оборудования и последующей аварии. В [2] представлены различные аварии, вызванные несвоевременным замыканием реле, разрушением электронных компонент, коротким замыканием в печатных платах, разрушением хрупких элементов вследствие ударного воздействия.

В связи с интенсивным внедрением новых электронных компонент, экспериментальная отработка бортового оборудования и макетов КА на ударное воздействие приобретает актуальное значение. При этом следует отметить, что применение типовых (штатных) систем разделения при наземной отработке изделий РКТ приводит к существенному удорожанию испытаний, так как при этом уровень воздействий соответствует эксплуатационным нагрузкам, тогда как стандартами предусмотрены квалификационные испытания на воздействие нагрузок повышенного уровня, определяемых коэффициентом безопасности. Кроме этого штатные средства разделения являются разовыми конструкциями, после срабатывания которых требуется разборка конструкции и замена ряда конструктивных элементов, что недопустимо для летного изделия. Поэтому для проведения квалификационных испытаний необходимо создание устройств, способных моделировать нагрузки от срабатывания пиротехнических средств

разделения как для автономных испытаний приборов и оборудования, так и для испытаний полномасштабных КА

В настоящее время в практику эксперимента вошли современные инженерные конечно-элементные пакеты (ABAQUS, ANSYS и пр.), позволяющие проводить пред- и постиспытательное моделирование, что позволяет повысить качество отработки, определить реализуемые режимы, сократить количество отладочных испытаний и сроки отработки в целом.

В обеспечение экспериментальной отработки изделий ракетно-космической техники (РКТ) во многих научных институтах и конструкторских бюро отрасли интенсивно ведутся исследования в области моделирования и совершенствования средств воспроизведения виброударных нагрузок с использованием стендов и экспериментальных сборок [3,4]. В ФГУП ЦНИИмаш разработан метод моделирования ударных нагрузок от пиротехнических систем разделения с амплитудами до 3500 g, основанный на использовании мобильного механического ударного устройства, в котором ударник разгоняется до скорости 50 м/с при помощи пороховых газов от промышленных патронов типа Д1, Д2, Д3, Д4, Д5 или электрического капсуль-воспламенителя (ЭКВ). Для апробации рабочих режимов механического ударного устройства была построена численная модель в программно-математическом комплексе ABAQUS Explicit.

В статье представлен метод моделирования виброударного нагружения с использованием мобильного механического ударного устройства, сравнение полученных экспериментальных данных с воздействием при срабатывании

штатного пиросредства, методика моделирования виброударного нагружения и сравнение расчетных значений с экспериментальными данными.

2. Моделирование ударного нагружения

Экспериментальная отработка на ударное воздействие проводится с целью определения надежности функционирования и стойкости бортового оборудования КА к высокоинтенсивным ударным воздействиям вследствие срабатывания пиротехнических систем разделения. В зависимости от прогнозируемых уровней реализуемых нагрузок, осуществляется выбор наиболее подходящих методов и методик наземной отработки изделий. Уровни нагрузок регламентируются различными нормативными документами, как в России так и за рубежом [5,6,7]. Основными параметрами виброударных нагрузок являются - амплитуда ускорения (m/s^2), перегрузка (g) и полоса частот (Гц). Интенсивность воздействия ударного процесса на бортовое оборудование КА в каждой конкретной точке зависит от конструкции изделия, расстояния до средства разделения, характеристик и конструктивных особенностей пиросредств.

Для формализации и описания ударных процессов выделяют три основных зоны - ближняя, средняя и дальняя [5]. Ближней зоной от источника воздействия принимается расстояние до 150 мм. Отклик конструкции в ближней зоне характеризуется высокой амплитудой ускорения и частотой от проходящей в материале ударной волны. Средняя зона, 150 – 600 мм, характеризуется комбинацией проходящих упругих волн деформаций и основных форм колебаний

конструкции. В дальней зоне, от 600 мм, энергия удара (воздействия) полностью трансформируется в затухающий колебательный процесс конструкции.

Для инженерного анализа ударных перегрузок, действующих на конструкцию, используют ударные спектры [8], представляющие зависимость максимальных абсолютных ускорений или относительных перемещений осциллятора от частоты колебаний. Ударный спектр является характеристикой переходного вибрационного процесса, позволяющей нормировать режимы испытаний оборудования, сравнивать различные виды ударно-импульсных воздействий, заменять при испытаниях штатные воздействия другими, эквивалентными и технически реализуемыми в лабораторных условиях. Ударный спектр получают при помощи решения уравнений системы несвязанных осцилляторов .

$$\ddot{y} + (2\pi f / Q) \dot{y} + (2\pi f)^2 y = -\ddot{x} \quad (1)$$

где, \ddot{x} - виброускорение (измеренное), f - собственная частота осциллятора, Q - коэффициент усиления на резонансной частоте (добротность). Коэффициент демпфирования обычно берется на уровне 5%, что эквивалентно добротности - $Q=10$. Максимальные значения ускорения для каждой частоты по всей системе осцилляторов представляют собой ударный спектр. Типовой спектр удара представлен на рисунке 1, где ломаной линией обозначен допустимый уровень спектра удара (СУ). Кривая СУ, вычисленного по формуле (1) на основании истории ускорения от времени, представлена гладкой линией.

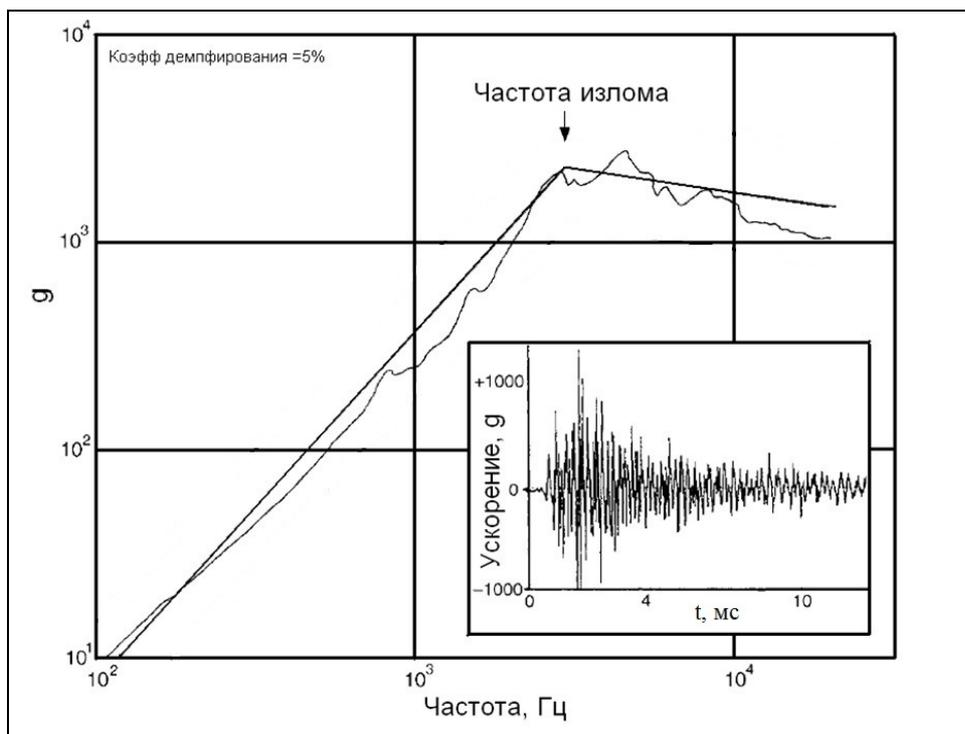


Рисунок 1–Типовой спектр удара

Анализ характеристик динамического процесса при экспериментальной отработке на ударное воздействие необходим для оценки соответствия данных испытаний нормированным значениям, а также их влияния на конструкцию и составные части КА. Формальный объем технических средств, способный регистрировать ударные процессы с высокой точностью и прогнозировать экстремальный отклик в различных точках конструкции, является недостаточным и требует оптимизации из анализа математической модели объекта. Применение конечно-элементных пакетов для численного моделирования при анализе ударных процессов является источником дополнительной информации и средством повышения качества и надежности наземной экспериментальной отработки.

2.1 Экспериментальная отработка

Экспериментальная отработка включает в себя использование ряда методов, применение которых позволяет с максимальной точностью воспроизвести физические

процессы с требуемым уровнем перегрузок и частотным наполнением на реальном объекте испытаний или имитационной модели. В настоящее время моделирование ударного нагружения проводится с использованием штатных пиротехнических средств, взрывчатых веществ, механических ударников. Уровни перегрузок и условия проведения автономных, зачетных испытаний регламентируются стандартами. В таблице 1 представлены характеристики виброударного процесса для ближней средней и дальней зоны, согласно стандартам [5, 6]. Для каждого воздействия, стандартами предусмотрен доверительный интервал ± 6 дБ и ± 3 дБ в зависимости от рассматриваемых частот.

Характеристики виброударного процесса

Таблица 1

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

В обеспечение моделирования ударных воздействий соответствующих величинам представленным в таблице 1 создана широкая номенклатура стендов [9]. В зависимости от конструкции стенда, в качестве источника энергии может выступать взрывчатое вещество (накладное ВВ, шнуровые заряды и т.д.) или энергия механического удара. При этом возникает ряд проблем. Во-первых, поскольку критерием моделирования для каждого изделия является СУ с

характерной частотой излома (см. рисунок 1), не все стационарные стенды способны воспроизводить требуемые нагрузки нормированные по спектру удара. Во-вторых, применение ВВ ухудшает повторяемость экспериментов и накладывает специальные требования к испытательному стенду. В-третьих, стенды предназначены для автономных испытаний бортового оборудования непригодны для крупномасштабных сборок.

В обеспечении динамических испытаний макетов КА, бортового оборудования и крупномасштабных сборок в ФГУП ЦНИИмаш разработан метод моделирования виброударного воздействия от штатных пиротехнических систем разделения при помощи ударных устройств, использующих для разгона механического ударника пороховые газы от строительных патронов или электрических капсуль-воспламенителей (ЭКВ). Критерием моделирования при этом является погрешность воспроизведения спектра удара от штатного пирозамка. В качестве исходных данных для примера моделирования выбран спектр удара (СУ), полученный на адаптере РКН Днепр/БелКА при срабатывании пирозамка № 00.267.0006.0000.02.0. На рисунке 2 представлены осциллограммы виброударного процесса и СУ, вычисленный по результатам решения системы (1).

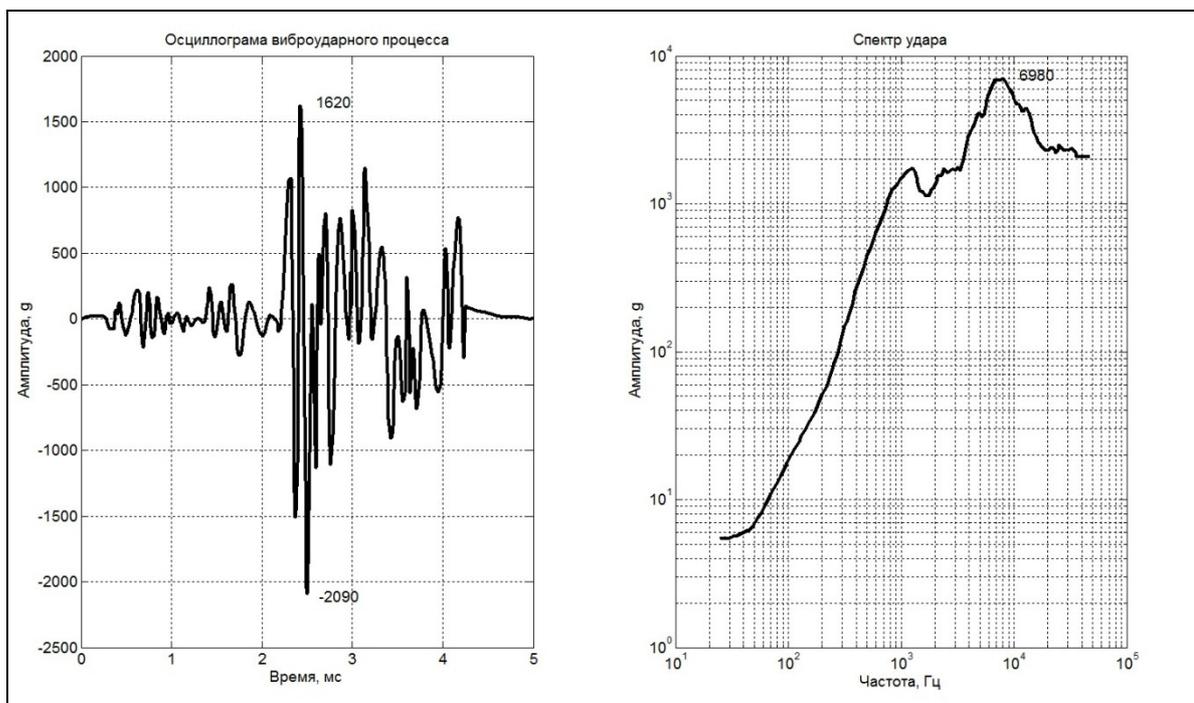


Рисунок 2 – Осциллограмма виброударного процесса и СУ пирозамка

Мобильное устройство состоит из фрагмента ствола калибра 14,5 мм, пробки для установки ЭКВ, ударника массой 120 г и диаметра 12 мм, демпфера (набор шайб из алюминия АД1 и резины) и установочных шпилек и планки для крепления ударника к изделию. На рисунке 3 показано ударное устройство, смонтированное на шпангоуте отсека макета бака.

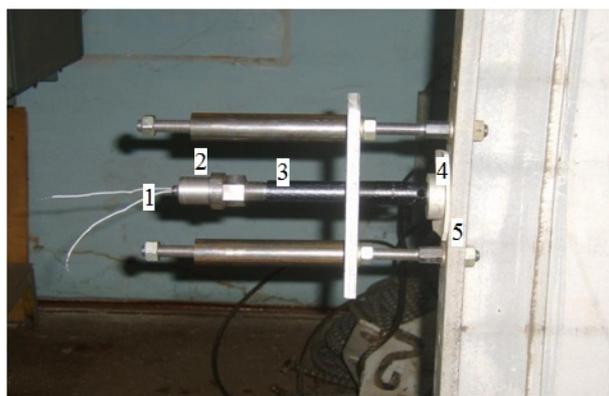


Рисунок 3 – Устройство нагружения: 1- ЭКВ; 2- пробка; 3-ствол 14,5 мм с ударником; 4 –демпфер; 5 - шпангоут отсека.

Измерения ускорений проводились на расстоянии 370 мм от точки нагружения и при установке ударника на расстоянии 80 мм от переднего торца ствола (случай

наименьшей скорости ударника) с использованием розетки акселерометров фирмы PCB модель M350 B23 и информационно-измерительной системы на базе DAQ модулей NI PXI 6254 фирмы National Instruments. Осциллограммы виброударного процесса для трех взаимно перпендикулярных направлений представлены на рисунке 4.

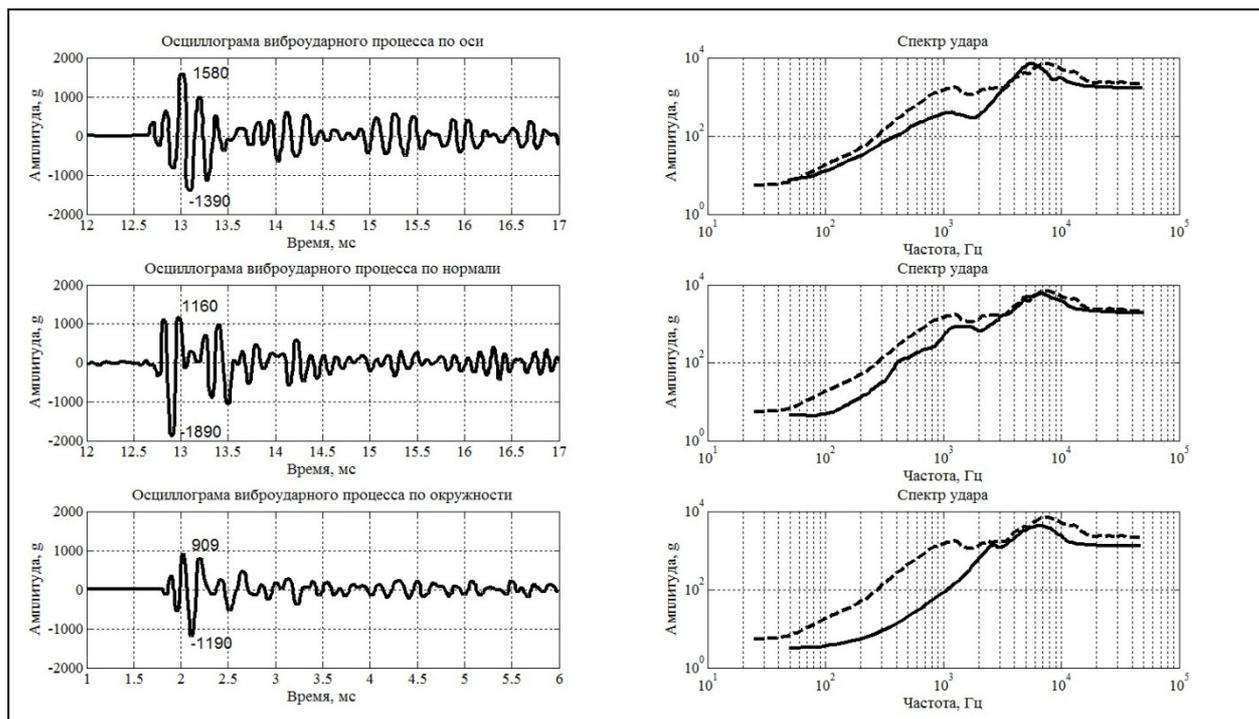


Рисунок 4 – Осциллограммы процессов и СУ при моделировании в сравнении с СУ пирозамка

Следует отметить наличие экстремальных значений СУ в окрестности 1 и 7 кГц, что достаточно хорошо соответствует характерным частотам заданного СУ от пирозамка. экспериментально подобранный режим испытаний позволяет смоделировать заданный СУ в пределах 6 дБ путем изменения пути разгона ударника, выбором патрона и демпфера. Сравнение результатов нагружения с экспериментальными данными от штатного пирозамка позволило определить погрешность воспроизведения заданного СУ и средние значения относительной погрешности для всего диапазона спектра. Для высокочастотной области спектра

(от 2000 до 10000 Гц) погрешность не превышает 3 дБ. В низкочастотной области относительная погрешность находится в области 6 дБ. Следует отметить, что при полученных уровнях экстремальных значений ускорений (до 2000 g) погрешность канала измерений ($\pm 10\%$) составляет ± 200 g, поэтому достоверные результаты на СУ имеют место после значений более 400 g.

Численное моделирование

Конечно-элементные пакеты являются мощным современным инженерным инструментом, позволяя проводить моделирование различных физических процессов с высоким уровнем точности и достоверности в сравнении с экспериментальными данными. Из результатов численного моделирования можно получить дополнительную информацию об исследуемых процессах, оптимизировать конструкцию, критические узлы и элементы изделий, правильно интерпретировать экспериментальные данные. Стоит отметить, что в случае исследований быстропротекающих процессов (взрыв, удар) не всегда удается выполнить некоторые из поставленных задач в условиях натурального эксперимента, вследствие скоротечности процесса и несовершенства средств измерения.

В случае использования механического ударного устройства, критическим элементом конструкции, отвечающим за формирования амплитуды и профиля нагрузки в области установки пиротехнических средств разделения, являются демпфирующие элементы различной формы. Применяемые в устройстве демпфирующие элементы состоят из формирующих профиль нагрузки резиновых и алюминиевых прокладок, которые испытывают гиперупругие, упругопластические

деформации в процессе удара. Хотя применение аналитических методов позволяет проводить расчеты упругопластического удара и возникающих при этом нагрузок и сил в материалах [10, 11] широкое применение их ограничено, вследствие нехватки данных по материалам и специфики проведения экспериментальных исследований. Аналитическое решение задачи колебаний оболочки с внутренними отсеками, различной толщиной стенки в условиях динамического нагружения так же представляется трудновыполнимой задачей. Проведение экспериментальных исследований по подбору оптимальных параметров демпфирующих элементов для реализации требуемых режимов нагружения потребовало бы значительных временных и финансовых затрат, что не всегда возможно при сжатых сроках наземной экспериментальной отработки. Из выше сказанного можно заключить, что единственным средством получения достоверной информации об реализуемых режимах нагружения и характеристики отклика конструкции на ударное воздействие при варьировании параметров демпфирующих элементов и скорости ударника в механическом ударном устройстве является численное моделирование.

Для сокращения времени расчета и упрощении процессов анализа результатов, задача прогнозирования режимов нагружения была разделена на два этапа. На первом этапе, решалась задача ударного-волнового нагружения при взаимодействии ударника с демпфирующим элементом. Результаты моделирования, а именно профиль ударной волны в демпфере, принимались за исходные данные на втором этапе расчета. Численное моделирование на втором этапе позволило провести анализ отклика конструкции на ударное нагружение. Построение конечно-

элементной модели конструкции и устройства нагружения, а также численное моделирование проводилось в программном пакете ABAQUS, с использованием явной схемы интегрирования уравнений движения (решатель Abaqus Explicit). Полученные при расчете данные сравнивались с экспериментальными значениями, что позволило верифицировать предложенную методику моделирования.

На первом этапе проводились расчеты ударно-волнового процесса. Конечно-элементная модель, с плоскостью симметрии XOZ, представлена на рисунке 5. Модель включает в себя: стальной ударник (1), алюминиевый демпфер (2), резиновый демпфер (3), фрагмент алюминиевой нагружаемой оболочки (4) и

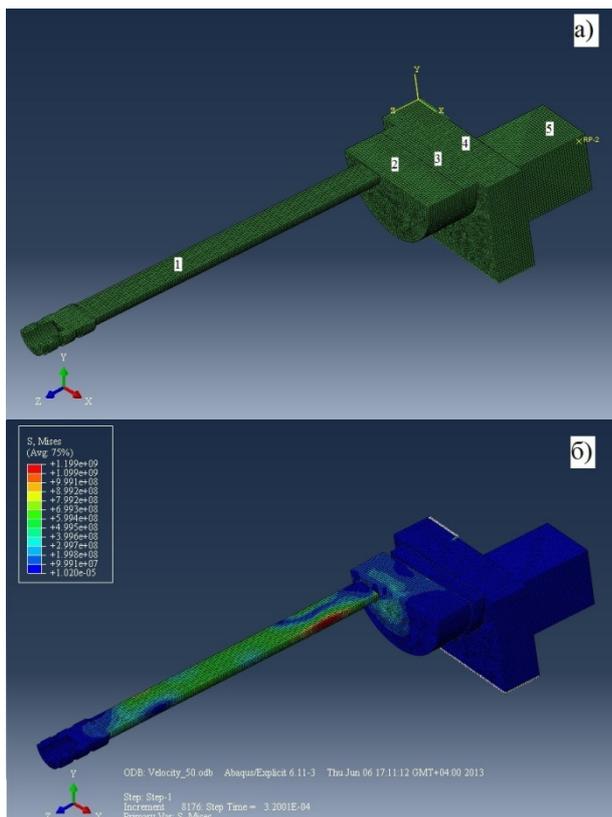


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель механического ударника с фрагментом нагружаемой оболочки: а) – исходная конфигурация $t=0$ с; б) – конфигурация через $t=0.32$ мс

алюминиевый куб для крепления акселерометра (5). В точке RP-2, расположенной в плоскости XOY на кубе (5) регистрировались ускорения вдоль оси Z, для последующего сравнения с экспериментальными данными. Расчетная модель была построена с использованием конечных элементов C3D8R совместно с полубесконечными элементами CIN3D8. Применение последних позволило исключить влияние отраженных волн от свободной поверхности, что повысило качество и точность расчета. Для описания

поведения стали (ударника) и алюминия (демпфер) в процессе ударного нагружения использовалась модель Джонсона–Кука [12] с уравнением состояния Ми–Грюнайзена [13], для резины – гиперупругая модель с потенциальной энергией в форме Арруда-Бойса [14]. Физико-механические характеристики и модели поведения материалов, используемых в расчете, представлены в таблицах 2,3,4. Количество расчетных элементов в модели 100343, количество узлов – 116222, характерный размер расчетного элемента – 1 мм. Длительность моделируемого процесса 1 мс. На рисунке 6 представлены результаты моделирования для скорости ударника 50 м/с. в сравнении с экспериментальными данными.

Параметры для модели Ми-Грюнайзена [13]

Таблица 2

Материал	Плотность, кг/м ³	Коэфф. Г 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

Параметры для модели Джонсона–Кука [12]

Таблица 3

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

Параметры для модели Арруда-Бойса [14]

Таблица 4

Материал	Плотность, кг/м ³	μ _u , МПа	λ _m	D, 1/Па
Силиконовая	1150	19,7	7.9	10 ⁻⁹

резина				
--------	--	--	--	--

Из верхнего графика можно заключить, что в начале процесса, амплитуда и длительность отклика системы для случая численного моделирования соответствует данным из эксперимента. Последующее расхождение значений обусловлено идеализированной конечно-элементной моделью, в которой участвует только фрагмент шпангоута нагружаемой оболочки и не учитывается демпфирование материала. Из рисунка 5 видно, что активная фаза взаимодействия ударника с

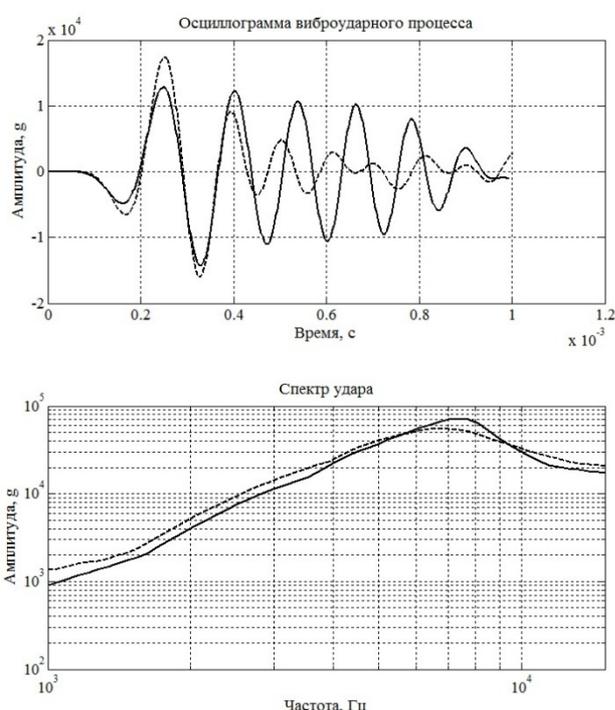


Рисунок 6 – Осциллограмма процесса в точке RP-2 и спектр удара для первого этапа расчета: пунктирная линия - экспериментальные данные; сплошная линия - численный расчет

демпфером и, соответственно, нагрузка оболочки составляет менее 0,3 мс, поэтому дальнейшее расхождение расчетного случая с экспериментальными данными не влияет на точность моделирования на втором этапе. График спектра удара по амплитуде и частотному наполнению соответствует случаю ближней зоны, как определяющему, что характерно для процессов вблизи срабатывания пиротехнических средств разделения.

Для проведения численного моделирования отклика оболочки на ударное нагружение, за исходную нагрузку был принят профиль ударной волны в алюминиевом демпфере (2) из первого этапа расчета. Следует заметить, что в

области непосредственного контакта шпангоута оболочки находится резиновый демпфер (3) (см. рисунок 5). Из-за того, что гиперупругая модель некорректно описывает профиль ударной волны в материале (модуль объемного сжатия принимается константой [14]) использование полученных расчетных данных для резины неправомерно. Метод акустического и ударного нагружения [15] применялся для последующего моделирование виброударного нагружения. Конечно-элементная модель фрагмента оболочки, с плоскостью симметрии YOZ, для численного моделирования представлена на рисунке 7. Область приложения нагрузки обозначена - 1.

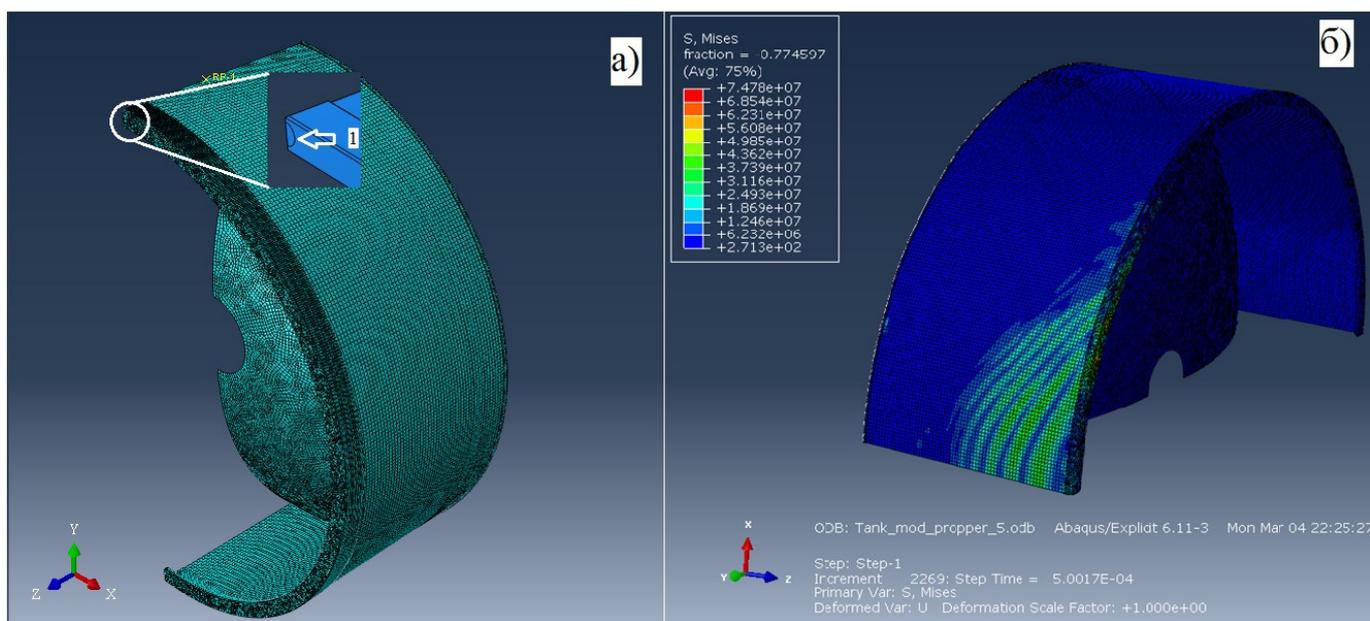


Рисунок 7 – Конечно-элементная модель фрагмента нагружаемой оболочки: а) – исходная конфигурация $t=0$, 1 – область нагружения; б) – результаты расчета для $t=0,5$ мс

На расстоянии 300 мм от области нагружения, вдоль оси OZ, в точке RP-1 (см. рисунок 7 а) регистрировались ускорения конструкции по трем направлениям.

Физико-механические характеристики алюминия, для упругой модели поведения материала, принимались следующими: плотность – 2785 кг/м³, модуль

Юнга – $E=75,6$ ГПа, модуль Пуассона – $\mu=0,33$. Расчетная математическая модель была построена с использованием оболочечных элементов S4R совместно с 3-х мерными элементами C3D8R и полубесконечными элементами CIN3D8. Количество расчетных элементов в модели 129651, количество узлов – 93457, характерный размер расчетного элемента – 1 мм. Длительность моделируемого процесса 15 мс.

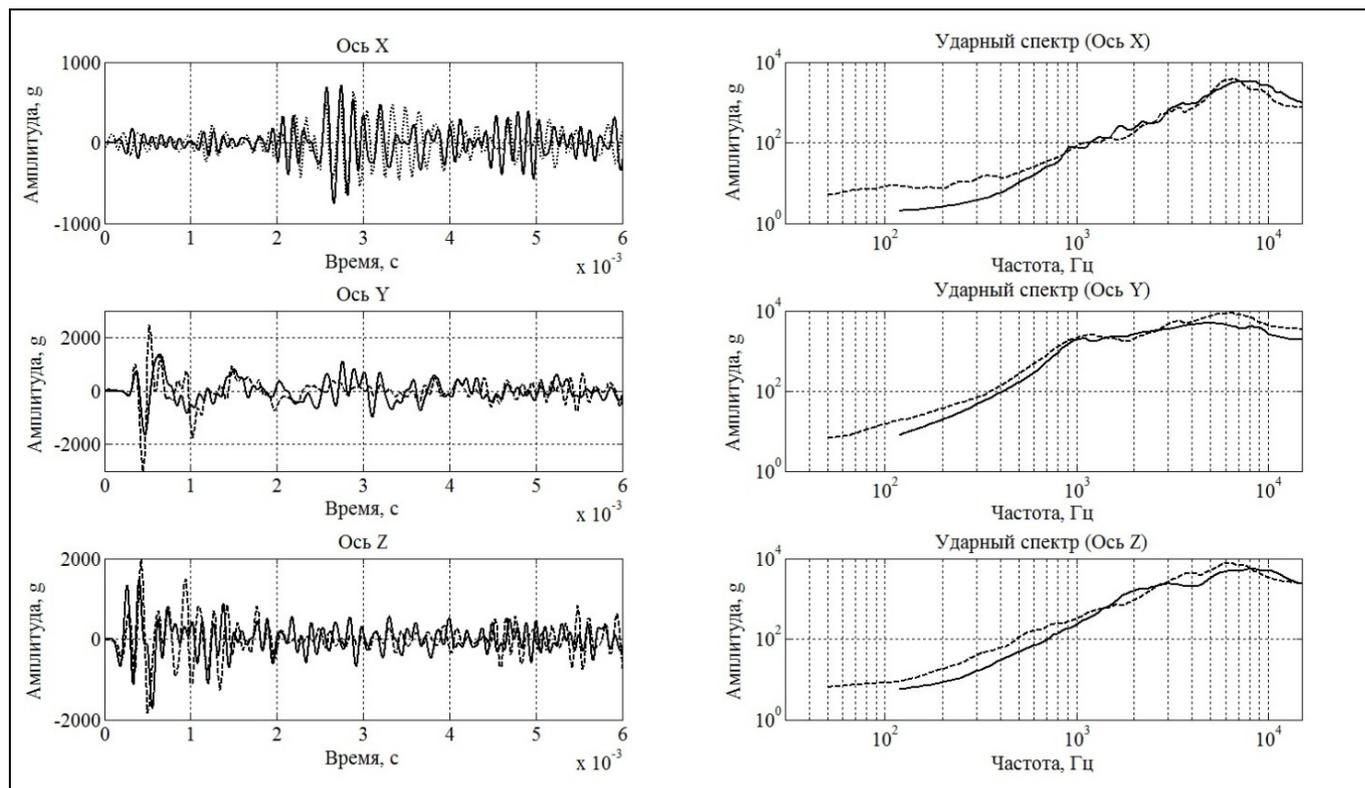


Рисунок 8 – Осциллограммы ударных процессов и спектры ударов для случая численного моделирования (сплошная линия) и измеренного процесса (пунктирная линия).

На рисунке 8 представлены графики отклика конструкции на ударное нагружение и вычислен спектр удара по трем направлениям. Дополнительно, для подтверждения точности и достоверности численного моделирования, на рисунке приведены осциллограммы и спектры ударного процесса, измеренные в ходе экспериментальных исследований. На графиках СУ приведенных на рисунке 8, особенно для оси X, можно заметить существенное расхождение

экспериментальных данных и расчетных значений в низкочастотной области (до 300 Гц). Данное расхождение обусловлено не центрированным характером процесса результатов измерений, из-за несовершенства крепления акселерометров к конструкции и электрических помех в каналах измерений. Применение низкочастотных фильтров позволяет удалить из полезного сигнала данные помехи и таким образом выделить реальные уровни СУ в низкочастотной области. Расхождения на осциллограммах виброударных процессов можно объяснить несовершенством математической модели, в которой без существенного увеличения времени расчета на данный момент нельзя учесть характеристики сварных швов и вафельную конструкцию оболочки, при моделировании динамических процессов.

Заключение

В результате проведенной работы был решен ряд важных инженерно-научных задач, среди которых можно отметить следующие.

Разработано устройство, позволяющее моделировать воздействие пиротехнических средств разделения на конструкции изделий РКТ с относительной погрешностью 3 дБ в высокочастотной области (2-10 кГц) и с погрешностью 6 дБ в низкочастотной области. Устройство позволяет проводить одновременное нагружение по циклограмме срабатывания групп пиросредств в случае применения электрических капсуль-воспламенителей (ЭКВ). Малые габариты и простота использования устройства, позволяют проводить как автономные испытания приборов и аппаратуры, так и квалификационные испытания полномасштабных сборок (летных изделий).

Для проведения автономных испытаний приборов и оборудования на нормированные ударные режимы нагружения возможно использование разработанных ударных устройств. Устройства создают импульсное воздействие на платформу с изделием. Частотные параметры платформы выбираются расчетным путем из заданных характерных частот спектра удара. При испытаниях опытных сборок, ударные устройства моделируют нагрузки от штатных систем разделения с учетом коэффициента безопасности.

Предложена методика моделирования виброударного нагружения конструкций с целью прогнозирования реализуемых режимов в контрольных точках. Применение полубесконечных элементов в математических моделях, позволило повысить точность и достоверность получаемых результатов, а также сократить время расчета. Верификация методики для случая механического ударного нагружения была проведена в программно-математическом комплексе ABAQUS.

Работа выполнялась при частичной поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-1091.2013.10

Библиографический список

1. Chang K. Y., Pyrotechnic Devices, Shock Levels And Their Applications. // 9th International Congress on Sound and Vibration Orlando, USA, July 2002, 19 p.
2. Moening C.J., Pyrotechnic shock flight failures. // IES Pyrotechnic Shock Tutorial Program. 31st Annual Technical Meeting, Institute of Environmental Sciences, April-May 1985, 13 p.
3. Стенд для ударных испытаний. Патент РФ №2244910 с приоритетом от 04.08.2003. Авторы: Викторов В.А., Камчатный В.Г., Клобукова В.И., Мельник А.В., Осипова В.А.
4. Способ испытаний на высокоинтенсивные ударные воздействия приборов и оборудования. Патент РФ №2262679 с приоритетом от 07.04.2004. Авторы: Орлов А.С, Орлов С.А.
5. Mulville D.R., NASA-STD-7003.Pyroshock test criteria. NASA Technical Standard. // NASA, USA, May 18, 1999, 26 p.
6. Bateman V.I., IEST-RP-DTE032: Pyroshock testing techniques. // Institute of Environmental Science and Technology, 2011. URL: <http://www.iest.org/Standards-RPs/Recommended-Practices/IEST-RP-DTE032> (дата обращения: 14.10.2013).
7. ГОСТ Р 51371-99. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие ударов. - М., 2000, 24 с.
8. Harris, C. M., Piersol A. G., Harris Shock and Vibration Handbook. Fifth Edition. // McGraw-Hill, 2002, pp. 735-749.

9. Lee J.-R., Chia C.C., Kong C.-W., Review of pyroshock wave measurement and simulation for space systems. // J. Measurement, 2012, Vol. 45, pp. 631-642.
10. Батуев Г.С., Голубков Ю.В., Ефремов А.К., Федосов А.А., Инженерные методы исследования ударных процессов. - М.: Машиностроение, 1977, 241 с.
11. Бирюков Д.Г., Кадомцев И.Г. Динамический упругопластический контакт ударника и сферической оболочки. // ПИМТФ, 2002, т. 43, № 5, С. 171-175.
12. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. // Proc. of 7th Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, 1983, pp. 541-547.
13. Anderson C. E., Predebon W. W., Karpp R. R. Computational modeling of explosive-filled cylinders. // Int. J. of Engineering Science, 1985, Vol. 23, No. 12, pp. 1317–1330.
14. Arruda E. M., Boyce M. C. A three-dimensional model for the large stretch behavior of rubber elastic materials. // J. Mech. Phys. Solids, 1993, Vol. 41, No. 2, pp. 389–412.
15. Abaqus/CAE version 6.11. Abaqus documentation. Abaqus Analysis User's Manual. // Dassault Systems, New York, Springer, 2009, chapter 30.4.5.