

Открытое акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна».

(ОАО «Корпорация "ВНИИЭМ»)

На правах рукописи

ПУСТОБАЕВ МИХАИЛ ВИКТОРОВИЧ

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА СТОЙКОСТЬ К УДАРНЫМ
ВОЗДЕЙСТВИЯМ ОТ СРАБАТЫВАНИЯ ПИРОСРЕДСТВ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

Тютнев Андрей Павлович, доктор физико-математических наук, профессор

Москва 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ПО ЗАДАНИЮ ТРЕБОВАНИЙ И ОТРАБОТКЕ СТОЙКОСТИ БА НА ВОЗДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ НАГРУЗОК ОТ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РАЗДЕЛЕНИЯ В РФ И ЗА РУБЕЖОМ .	12
1.1 Ударные нагрузки от срабатывания пиросредств и их влияние на функционирование БА.....	12
1.1.1 Способы задания испытательных ударных нагрузок.....	13
1.1.2 Основные характеристики нагрузки при срабатывании пиросредств	15
1.1.3 Влияние ударных нагрузок на функционирование БА	20
1.1.4 Способы снижения действующих нагрузок на БА.....	21
1.2 Отечественные и международные стандарты в части отработки стойкости БА.....	25
1.2.1 Стандарты, действующие на территории РФ	26
1.2.2 Требования зарубежных и международных стандартов	29
1.2.3 Сравнение требований нормативных документов в РФ и за рубежом	32
1.3 Анализ способов испытаний БА на ударостойкость.....	35
1.3.1 Испытания в составе образца КА со штатными пиросредствами (натурные).....	37
1.3.2 Стендовые испытания БА и особенности задания ударных нагрузок	37
1.3.3 Стендовые испытания с ненулевой скоростью ОИ.....	39
1.3.4 Стендовые испытания с нулевой скоростью ОИ.....	44
1.3.5 Анализ и выбор оптимальных методов стендовых испытаний БА	50
1.4 Выводы	51

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ «СТЕНД С ОБЪЕКТОМ ИСПЫТАНИЙ/УДАРНОЕ УСТРОЙСТВО» ДЛЯ МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ БА	53
2.1 Обоснование выбора типа ударного устройства	53
2.2 Состав стенда.....	57
2.2.1 Платформа стенда	58
2.2.2 Пироударники стенда.....	59
2.2.3 Демпфирующая прокладка	63
2.2.4 Система регистрации и обработки данных	64
2.3 Экспериментально-теоретическое исследование характеристик системы «стенд с объектом испытаний-ударное устройство» для обеспечения испытаний БА на воздействие ударных пиротехнических нагрузок	67
2.3.1 Исследование факторов, влияющих на форму спектра удара	68
2.3.2 Исследование факторов, влияющих на амплитуду виброудара	73
2.3.3 Одновременное срабатывание нескольких СПУ и его влияние на получаемый СУ	77
2.3.4 Экспериментальное подтверждение теоретических зависимостей.....	79
2.4 Аттестация стенда	84
2.5 Выводы	85
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ТИПОВОЙ ПРОГРАММЫ И МЕТОДИКИ АВТОНОМНЫХ ИСПЫТАНИЙ БА НА УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЗДАННОГО СТЕНДА	87
3.1 Объект испытаний и объем испытаний.....	88
3.2 Режимы испытаний и поле допуска	88
3.2.1 Определение режима испытаний ОИ.....	89
3.2.2 Поле допуска на воспроизводимый СУ	90
3.3 Подбор параметров стенда, обеспечивающих форму СУ	93

3.4	Подтверждение формы СУ частотным молотком и ее коррекция	95
3.5	Подбор параметров стенда, обеспечивающих амплитуду удара.....	96
3.6	Испытания макета БА	97
3.7	Обработка и анализ результатов испытаний макета БА	97
3.8	Испытания БА и анализ результатов испытаний	98
3.9	Применение СПУ для испытаний опытных сборок КА и иных конструкций.....	99
3.10	Выводы	102
ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ ПРОГРАММЫ И МЕТОДИКИ ДЛЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УДАРНЫХ НАГРУЗОК		104
4.1	Испытания бортовой вычислительной машины КА «Метеор-М» №2.....	105
4.2	Испытания аккумуляторной батареи для микро КА «Звезда»	108
4.3	Исследование предельной ударной стойкости герконов КА «Ионосфера»	114
4.4	Испытания АФУ РЛЦИ КА «Канопус-В»	125
4.5	Выводы	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		130
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		131
Приложение А. Акт об использовании и внедрении результатов диссертационной работы		139
Приложение Б.Методы оценки уровней нагрузок на БА при наличии результатов испытаний прототипов или аналогов КА		140
Приложение В. Результаты испытаний для подтверждения возможностей стенда		145

ВВЕДЕНИЕ

ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» имеет богатый опыт создания продукции космического назначения, так как с самого начала эпохи освоения космоса и по настоящее время является активным участником этого процесса, обеспечивая высокотехнологичным электротехническим оборудованием (приводы, антенно-фидерные устройства, оборудование для систем электропитания и управления) отечественные ракеты-носители (в т.ч. Р-7), разгонные блоки и космические аппараты. На счету предприятия находятся более 80 запущенных космических аппаратов (КА) собственного производства, в основном метеорологического назначения, «налетающих» на орбите в общей сложности более 200 лет[1].

Актуальность работы. Любой КА является сложным электромеханическим комплексом, включающим в себя бортовую аппаратуру (БА) служебного и целевого назначения. К служебной аппаратуре относятся приборы и оборудование, обеспечивающие функционирование КА, а к целевой относятся специальные исследовательские и научные приборы, предназначенные для сбора и передачи на Землю требуемой информации. Отдельные системы КА также представляют собой электротехнические комплексы и системы, различающиеся по назначению, составу и функциям, например, система ориентации и стабилизации КА, аккумуляторные и солнечные батареи с системой электропитания, сканирующие устройства КА и антенно-фидерные системы, приводимые в движение электроприводами и др. Штатное функционирование этих систем определяет нормальное функционирование КА в целом, и в конечном итоге, успешное выполнение КА заданных целевых функций.

Одним из факторов, оказывающих значительное влияние на функционирование БА КА, является ударное воздействие от срабатывания пиротехнических средств систем разделения.

Исторически в РФ сложились два одновременно действующих блока отечественных стандартов, использующих разные подходы к заданию требований по отработке стойкости БА к ударным в широком смысле нагрузкам. В первом блоке стандартов требования задаются в относительно низкочастотной области в виде импульса ускорения той или иной формы, во втором – в виде спектра удара (СУ). Основное отличие требований стандартов указанных блоков заключается в том, что в требованиях по СУ учтены высокоинтенсивные нагрузки (1000-10000g) в высокочастотной части СУ (3000-10000 Гц), характерные для реального виброударного процесса в ближней и средней зонах от пиротехнических средств разделения.

Требования по СУ, приведенные во втором блоке стандартов, на практике крайне редко используются отечественными предприятиями ракетно-космической отрасли по следующей причине: технологически БА первых КА была нечувствительна к высокочастотному удару, поэтому испытания в высокочастотной части СУ не проводились. Успешное функционирование КА на орбите в течение срока службы подтверждало достаточность отработки. Вследствие этого в СССР и РФ практически не проводились работы по созданию испытательного оборудования и методического обеспечения для испытаний БА на высокочастотные нагрузки от срабатывания пиросредств. В связи с этим до сих пор в отечественной практике стойкость БА в основном подтверждается испытаниями полусинусоидальными импульсами на установках копрового типа или вибростендах, имитирующих лишь низкочастотные нагрузки.

Процесс создания БА космического назначения в силу предъявляемых высоких требований всегда находился на острие передовых технологий, и воплощал в себе современные достижения и технологии в области электроники, схемотехники, материаловедения и т.п. Одновременно с усложнением и удорожанием БА изменились также требования, предъявляемые к БА при отработке в наземных условиях. В последние десятилетия, в результате совершенствования технологий производства электротехнических комплексов и

систем значительно изменился состав БА, в том числе уменьшились размеры и масса её составных элементов. Например, в солнечных батареях стали широко применяться полупроводники нового типа – плёночные элементы на базе арсенида галлия и др. В части систем электропитания: постоянно совершенствуются литий-полимерные, литий-серные и литий-воздушные (с 1990 г.) аккумуляторы. С уменьшением характерного размера составляющих элементов БА на БА проявились резонансные частоты в высокочастотной области, и она стала чувствительной к высокочастотной составляющей спектра ударной нагрузки [2]. В результате этого применяемые на отечественных отраслевых предприятиях методы испытаний оказались недостаточно эффективными для подтверждения ударостойкости БА. Таким образом, имеет место противоречие между требованиями по стойкости БА КА к воздействию ударных нагрузок от срабатывания пиротехнических систем, и практикой отработки (испытаний) БА на отечественных предприятиях отрасли.

Это определило актуальность решения задачи разработки испытательного оборудования и методики подтверждения стойкости БА КА к ударным воздействиям от срабатывания пиросредств систем разделения.

Степень разработанности темы. В международной практике требования по стойкости к ударным нагрузкам от срабатывания пиросредств, заданных в виде СУ, задаются как в национальных стандартах, таких как США (NASA) [2,3], ЕС (ECSS)[4], так и в международных стандартах ISO[5], МЭК [6]. При этом испытания на ударные нагрузки с высокочастотной составляющей, заданные в виде СУ как отдельной БА, так и сборок КА и КА в целом проводятся практически всеми крупными мировыми компаниями-производителями, такими как Boeing, EADS, SSTL, SAFT, RUAG, и многими другими. Вопросу моделирования пироударных нагрузок посвящено большое количество статей зарубежных учёных [7-39], а также выпущено отдельное подробное учебно-методическое руководство [40] по измерению и

воспроизведению виброударных нагрузок всех типов, включая нагрузки от срабатывания пиросредств.

В РФ основные нормативные документы, регламентирующие задание требований к БА и отработку её стойкости к воздействию ударных нагрузок, относятся к разработке 70-90-х годов, и исторически являются закрытыми. Несовершенство отечественной нормативной базы и распространенной практики отработки ударостойкости БА отмечается в работах учёных из АО «Информационные спутниковые системы» имени М.Ф. Решетнёва [46], где ведутся работы по расчетному моделированию удара [47], созданию оборудования и методик подтверждения ударостойкости БА КА и КА к воздействию пиросредств, защищенные патентами [48-53]. Особенности реакции БА на ударное воздействие, методы проектирования ударостойкой БА, методы испытаний БА описаны в работах отечественных учёных [41-45].

Таким образом, в РФ на уровне отрасли необходимо создание единого методического подхода к испытаниям БА на высокочастотные ударные нагрузки от пиротехнических средств, заданных в виде СУ, а также соответствующей нормативной базы.

Объектом исследования является бортовая аппаратура КА, относящаяся к бортовым электротехническим комплексам или системам целевого и служебного назначения.

Предметом исследования являются методы испытаний БА КА для подтверждения её работоспособности и качества функционирования при ударных воздействиях от срабатывания пиротехнических средств разделения.

Целью работы является разработка испытательного оборудования и методики испытаний БА КА к ударным воздействиям от срабатывания пиротехнических средств разделения.

Научной задачей работы является разработка испытательного оборудования и методики испытаний БА КА к воздействию пиротехнических средств разделения.

нагрузок на основе современных расчетных и экспериментальных технологий, которая включает решение следующих частных задач:

1. Разработка испытательного оборудования для проведения автономных испытаний БА КА массой до 30 кг на ударные пиротехнические нагрузки с уровнем СУ до 5000g на частоте свыше 5000 Гц. Экспериментально-теоретическое исследование характеристик системы «Стенд с объектом испытаний-ударное устройство» для методического обеспечения испытаний БА КА на ударные пиротехнические нагрузки.
2. Разработка типовой программы и методики автономных испытаний БА КА на стойкость к ударному воздействию на созданном испытательном оборудовании.

Основные результаты, полученные лично автором и выносимые на защиту:

1. Экспериментально-теоретическое исследование характеристик системы «стенд с объектом испытаний/ударное устройство» для методического обеспечения испытаний БА КА на ударные пиротехнические нагрузки.
2. Типовая программа и методика автономных испытаний БА КА на стойкость к ударному локальному воздействию с использованием оборудования созданного стенда.

Новизна научных результатов заключается в следующем:

1. Создано и аттестовано современное испытательное оборудование для отработки стойкости БА КА массой до 30 кг на воздействие ударных нагрузок от пиротехнических средств разделения с уровнем СУ до 5000g на частоте свыше 5000 Гц, проведены экспериментально-теоретические исследования влияния характеристик системы «стенд с объектом испытаний-ударное устройство» для методического обеспечения проведения испытаний БА КА.
2. Разработана типовая программа и методика автономных испытаний БА КА на стойкость к нагрузкам от срабатывания пиротехнических

средств с использованием разработанного стенда, соответствующая мировому уровню, и не имеющая отечественных аналогов.

Практическая значимость полученных в диссертации результатов:

1. Создано, аттестовано и внедрено испытательное оборудование, которое позволяет создавать ударное воздействие на БА КА, достаточное для моделирования практически любого пироудара в средней зоне, позволяющее проводить испытания широкого перечня БА КА массой до 30 кг, обладающее мобильностью настройки параметров удара и требующее относительно небольших затрат для проведения испытаний.
2. Разработанная типовая программа и методика автономных испытаний БА на стойкость к ударным нагрузкам от срабатывания пиросредств успешно адаптирована для решения практических задач, связанных с подтверждением ударной стойкости БА КА и отдельных элементов КА.
3. Разработанные устройства локального ударного нагружения нашли эффективное применение при испытаниях опытной сборки КА.

Методы исследования: использовались как расчетные методы – для предварительной оценки значений параметров стенда, так и экспериментальные (испытания) – для подтверждения и корректировки результатов расчетов.

Достоверность научных результатов подтверждается результатами испытаний БА на созданном стенде: были успешно проведены испытания аккумуляторной батареи для микро КА «Звезда», бортовой вычислительной машины КА «Метеор-М» №2, исследовательские испытания герконов КА «Ионосфера», – а также испытаниями АФУ РЛЦИ КА «Канопус-В» и др.

Ценность научных работ соискателя заключается в том, что с использованием современных научных подходов в области исследований ударной стойкости БА КА, относящейся к бортовым электротехническим комплексам или системам целевого и служебного назначения, получены новые, научно и практически значимые результаты, а именно:

1. Исследованы возможности созданного нового оборудования, предназначенного для воспроизведения локальных пироударных процессов в заданном диапазоне параметров СУ.
2. Разработана типовая программа и методика испытаний БА КА с использованием созданного стенда.
3. Созданная типовая программа и методика адаптирована для решения практических задач по оценке функционирования разрабатываемой БА КА и отдельных элементов КА.

Внедрение. Результаты работы были внедрены в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» (акт в Приложении А).

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на:

- V всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», (ОАО «РКС», 5-7.06.2012 г.).
- Первой молодежной конференции «Инновационная деятельность в науке и технике» (НИИЭМ, 01.11.2012).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы, полученные в диссертации, опубликованы в 5 работах [54-58], в том числе: научных статей, опубликованных в изданиях из перечня ВАК – 5.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав основного текста, заключения, списка литературы, трёх приложений. Объем диссертации составляет 145 страниц, включая 12 таблиц, 58 рисунков, список литературы из 68 наименований.

Автор выражает благодарность Судомоеву Анатолию Дмитриевичу за помощь в написании работы, Гече Владимиру Яковлевичу, Захаренко Андрею Борисовичу, Канунниковой Елене Александровне за поддержку и ценную критику, Зубренкову Борису Ивановичу и сотрудникам лаборатории 182 за сборку, отладку стенда и проведение экспериментальных исследований.

ГЛАВА 1. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ПО ЗАДАНИЮ ТРЕБОВАНИЙ И ОТРАБОТКЕ СТОЙКОСТИ БА НА ВОЗДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ НАГРУЗОК ОТ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РАЗДЕЛЕНИЯ В РФ И ЗА РУБЕЖОМ

В первой главе приведен анализ отечественной и зарубежной нормативной базы, определяющей требования к ударной стойкости БА, особенности задания нагрузок на БА КА и существующие методы экспериментального подтверждения ударостойкости БА в РФ и за рубежом[54].

Проведено сопоставление методов испытаний, выявлены достоинства и недостатки методов, определена область их применения, сформулированы требования к созданию перспективного стенда для автономной отработки БА КА на стойкость к ударному воздействию от срабатывания пиросредств. Дана постановка задачи диссертационного исследования.

1.1 Ударные нагрузки от срабатывания пиросредств и их влияние на функционирование БА

Ударное воздействие от срабатывания пиросредств (пироудар) представляет собой интенсивный широкополосный быстропротекающий процесс, вызывающий динамический отклик конструкции КА и ее элементов: БА КА, систем и подсистем КА, – возникающий вследствие активации пиротехнических устройств, являющихся частью конструкции КА или соединяющихся с ней. Пиротехнические устройства являются источником локального ударного воздействия, поэтому при анализе нагрузок выделяется фаза распространения волны напряжения по конструкции (волновая фаза) и последующая фаза, при которой формируется отклик таких элементов

конструкции как балка, пластина и оболочка. В некоторых случаях пиротехническое нагружение сопровождается переходными процессами от разгрузки предварительно стянутых узлов крепления разделяющихся элементов конструкции. Схожие с пироударами нагрузки могут создаваться устройствами, не содержащими взрывчатые вещества, при работе которых высвобождается энергия от упругого преднатяга [2].

Источники пиротехнических нагрузок могут быть точечными (пироболты, пирозамки, зачековки и т.п.), пространственно-протяженными (пирошнуры, кумулятивные заряды) и комбинированными.

1.1.1 Способы задания испытательных ударных нагрузок

Существует два наиболее распространенных способа задания ударных нагрузок, в т.ч. нагрузок от срабатывания пиросредств: в виде зависимости ускорения от времени, и в виде СУ.

Любое ударное воздействие представляет собой процесс, который может быть охарактеризован зависимостью виброускорения от времени – например, осциллограмма реального ударного процесса или генерируемый испытательный импульс заданной формы. Основными характеристиками временного процесса удара являются время нагружения и пиковое ускорение.

Наряду с осциллограммами для описания ударного процесса используются также характеристики, отражающие амплитудно-частотные параметры удара. Одним из таких параметров, наиболее часто применяемым на практике, является функция «спектр удара» [59].

СУ представляет собой функцию $A(f)$, описывающую динамическую реакцию простейшей одномассовой колебательной системы независимых осцилляторов (рисунок 1) при воздействии заданного ударного импульса. Уровень СУ на частоте f определяется обычно как максимальная по модулю

амплитуда реакции осциллятора $Y_i(f)$ с собственной частотой f , и зависит также от значения коэффициента демпфирования i -го осциллятора.

Как правило, на практике используются спектры удара применительно к ускорениям, уровень СУ определяется в m/c^2 или в единицах g . В зависимости от конкретной задачи используются также спектры скоростей и перемещений.

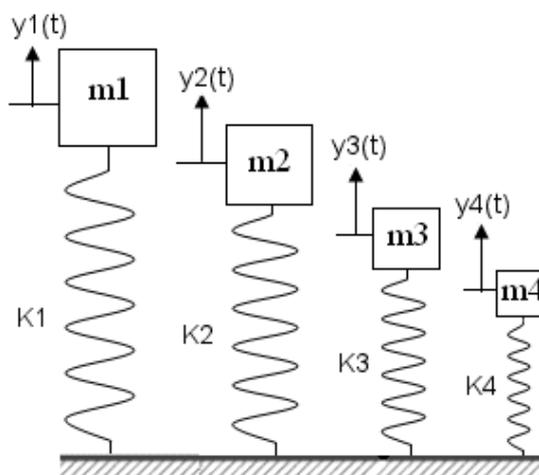


Рисунок 1 – Система независимых одномассовых осцилляторов

На рисунке 2 приведены результаты аналитического расчета СУ для процесса, имеющего форму полусинусоидального импульса.

График построен в безразмерных осях, на нем представлена зависимость коэффициента динамичности K_d от частоты осциллятора, отнесенной к частоте импульса λ .

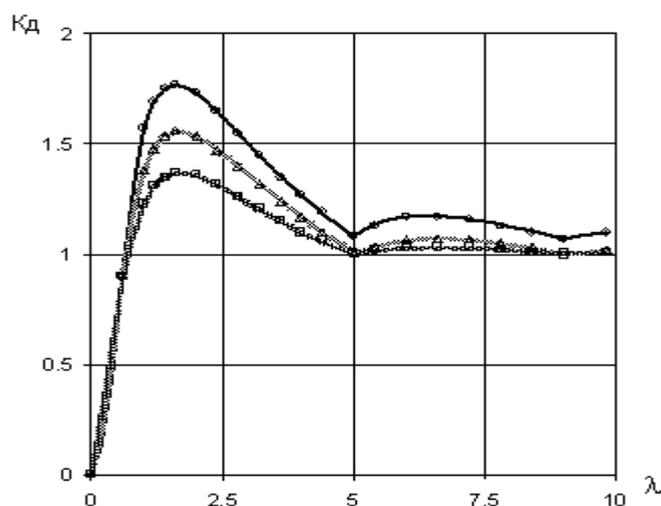


Рисунок 2 – СУ, рассчитанные для полусинусоидального импульса

В целом, оба способа задания нагрузок могут использоваться при описании ударных процессов, однако в случае срабатывания пиросредств необходимо учитывать специфику пиротехнического удара: при подрыве пиросредства за очень малый период времени (активная фаза нагружения обычно составляет 10-30 мкс) высвобождается большое количество энергии. В результате получается короткий интенсивный ударный импульс, содержащий выраженную высокочастотную составляющую, что необходимо учитывать при задании нагрузок. Ударный импульс после нескольких пробегов по конструкции трансформируется в точках крепления оборудования в нестационарный по дисперсии и частоте быстрозатухающий переходной процесс, математическое ожидание которого близко к нулю.

1.1.2 Основные характеристики нагрузки при срабатывании пиросредств

Так как нагрузки от пиротехнических устройств имеют локальный источник, то воздействие на конкретную БА определяются её расстоянием до источников нагружения, т.е. её положением на КА. Распространение ударной волны от источника воздействия до БА по конструкции КА в целом зависит от следующих факторов[40]:

- типа источника пиротехнического воздействия;
- геометрии и свойств конструкции;
- расстояния от источника воздействия.

Различное число сочетаний указанных факторов обуславливает большое разнообразие параметров удара, действующего на БА КА. Тем не менее, существует обобщенная зависимость формы СУ от расстояния до источника воздействия, положенная в основу классификации пиротехнического удара за рубежом [40].

Считается, что пиротехнический удар в ближней зоне от пиросредства (по западной терминологии *near-field*) характеризуется высоким интегральным уровнем СУ и определяется в основном источником ударных нагрузок ввиду того, что энергия удара на близком расстоянии от пиросредства еще не трансформируется в отклик конструкции.

Пиковое ускорение удара в ближней зоне часто превышает 10000g, а существенные, т.е. имеющие более высокий уровень, составляющие СУ имеют место на частотах выше 10000 Гц[2]. Типичный СУ от срабатывания пиросредств в ближней зоне приведен на рисунке 3. Измерение нагрузок проводилось при испытаниях на созданном стенде (см. раздел 2), точка измерений находилась вблизи источника возбуждения – на расстоянии 45мм.

При проектировании конструкций целесообразно не располагать чувствительное к ударам оборудование в ближних к пиросредствам зонах.

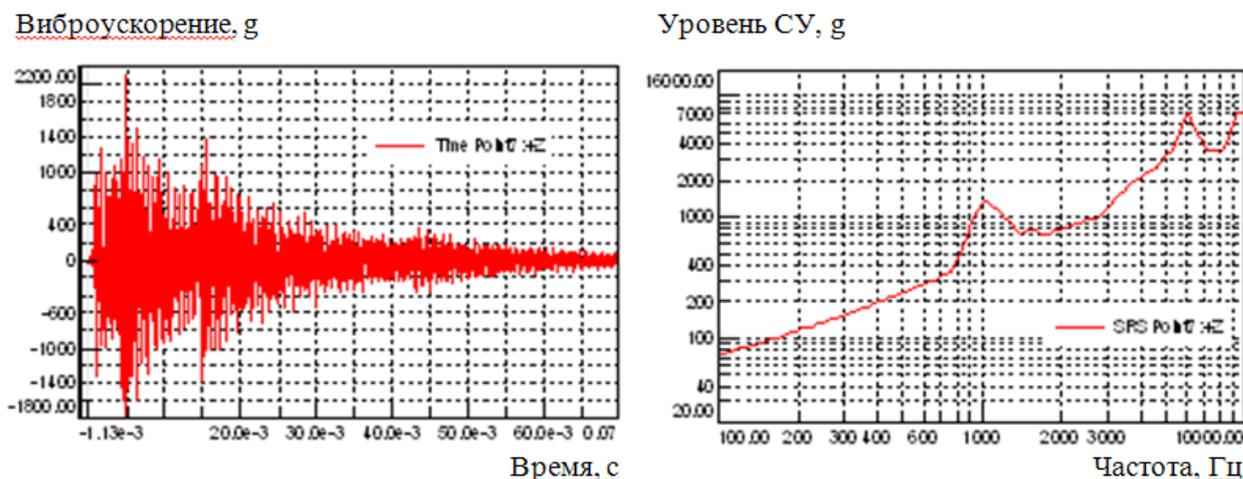


Рисунок 3 – Зависимость ускорения от времени и СУ от срабатывания типичного пиросредства, измеренная в ближней зоне от пиросредства

Пиротехнический удар в средней и дальней зонах (*mid-field* и *far-field*) характеризуется тем, что значительная часть энергии удара трансформируется в низкочастотный отклик конструкции и затухает по мере удаления. Таким образом, высокочастотная часть энергии рассеивается и общий интегральный уровень СУ при удалении от источника удара уменьшается. При этом СУ

содержит больше низкочастотных составляющих, которые сконцентрированы на характерных собственных частотах конструкции и определяет форму СУ.

Характеристики удара в средней и дальней зонах таковы[2]:

- в средней зоне пиковое ускорение удара обычно находится в диапазоне от 1000 до 10000g, а существенные составляющие СУ находятся в диапазоне частот от 3000 до 10000 Гц;
- в дальней зоне пиковое ускорение удара составляет менее 1000g, существенные составляющие СУ находятся в диапазоне до 3000 Гц.

Типичный СУ на некотором отдалении от источника воздействия (рисунок 4) имеет форму, характеризующуюся наличием точки перегиба с характерной частотой.

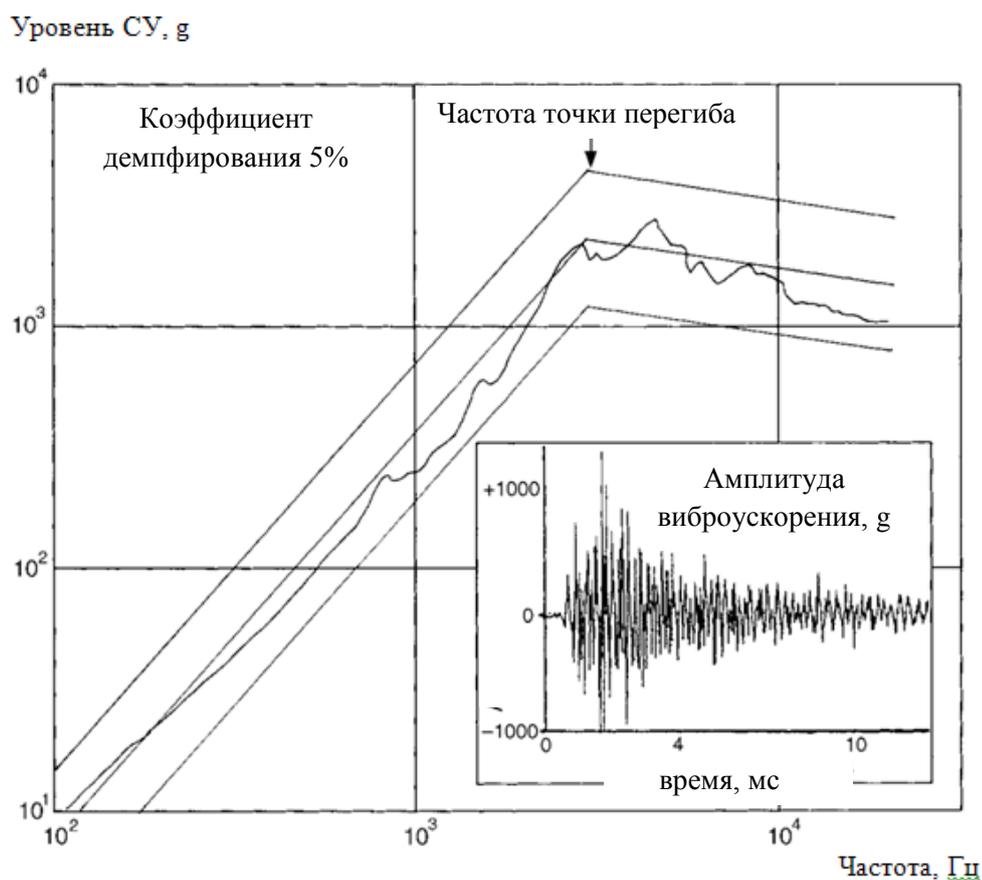


Рисунок 4 – Зависимость ускорения от времени и СУ от срабатывания типичного пиросредства, в относительном отдалении от пиросредства [40]

Данная классификация ударов используется для того, чтобы помочь разработчикам и испытателям БА выбрать подходящее испытательное оборудование и методику испытаний для конкретной БА, имеющей определенное местоположение на конструкции КА. Подробнее зависимость методов испытаний от расстояния от БА до источника воздействия рассмотрена в пункте 1.3.5.

Необходимо отметить, что в отечественной тематической литературе и нормативных документах такая классификация пиродударных нагрузок не встречается и не используется.

Различия в рисунках 3 и 4 характеризуют особенность процесса распространения ударных волн по конструкции КА: с удалением от источника возбуждения высокочастотные колебания быстро затухают благодаря большому коэффициенту демпфирования, в то время как энергия возбуждения все более концентрируется на основных собственных формах колебания конструкции.

С учетом указанной зависимости СУ от расстояния до источника воздействия, а также наличия на КА, как правило, нескольких источников ударного воздействия, расположенных в различных местах КА, можно заключить, что для КА характерна существенная неравномерность распределения ударных нагрузок по конструкции.

Неопределенность нагрузок на БА влечет за собой вывод, что задание единых требований по стойкости к ударным нагрузкам от срабатывания пиросредств для всей БА КА, независимо от ее расположения, невозможно (такой подход применяется для статических и вибрационных нагрузок). В случае задания нормативов по уровню максимальных воздействующих на всю БА КА нагрузок, т.е. огибающей всех СУ, в отдельных частотных диапазонах перегрузка на БА может превышать эксплуатационный уровень до 1000 раз, что неприемлемо и нецелесообразно. Например, вместо реально действующих нагрузок на БА $2g$ на частоте 5000 Гц БА может быть испытана на СУ с уровнем $\sim 2000g$ на данной частоте, т.е. будет иметь место неоправданное избыточное

перенагружение, которое может привести к неверным выводам об ударостойкости БА.

Оценка действующих на БА КА нагрузок, задание требований по стойкости конкретной БА или группы БА к ударным нагрузкам и нормирование этих требований – сложный творческий процесс, во многом опирающийся на результаты измерений нагрузок при проведении штатных испытаний по срабатыванию штатной системы отделения КА, зачековок трансформируемых конструкций КА на его реальной конструкции.

Методы оценки нагрузок на БА КА

Для оценки нагрузок на БА могут применяться два подхода:

- Экспериментальный – использование фактических экспериментальных данных по испытаниям натурной конструкции КА или её прототипов/аналогов со штатными пиросредствами, на основе которых прогнозируется эксплуатационный уровень СУ на конкретную БА[44].
- Расчетный – используются данные, полученные аналитическим путем. Расчет ударных нагрузок, действующих на БА, затруднён ввиду того, что используемый при расчете коэффициент демпфирования для высоких частот не является постоянным и зависит от частоты колебаний. Кроме этого, проведение динамического расчета КА с учетом волновой фазы распространения ускорений от локальных источников ударного нагружения и с учетом процесса срабатывания пиротехнических систем разделения и формирования ударной нагрузки в областях конструкции, примыкающих к пиротехническим устройствам, представляет собой задачу повышенной сложности. Для верификации расчетов зачастую используются экспериментальные данные.

Испытания со штатными пиросредствами проводятся на динамическом макете (изделии) КА или его отдельной части с подрывом пиросредств по штатной циклограмме срабатывания. При этом для серии однотипных испытаний, или в крайнем случае одного испытания, проводится регистрация уровней виброударного воздействия вблизи мест крепления БА, после чего данные анализируются, вычисляется максимальный СУ для различных мест крепления БА, который затем используют для задания требований по ударным нагрузкам.

Понятие эксплуатационной нагрузки на БА, нормирование испытательного уровня нагрузок при испытаниях БА различаются в РФ (п. 1.2.1) и за рубежом (п. 1.2.2), представлены в разделе 1.2.3.

1.1.3 Влияние ударных нагрузок на функционирование БА

Работоспособность БА при действии высокочастотных ударных нагрузок в настоящее время подробно изучена за рубежом, в РФ исследования такого рода в настоящее время ведутся в существенно меньшем объеме. Особенностью СУ от срабатывания пиросредств является относительно высокое значение уровня спектра (как правило, до 5000 g) в области частот от 1000 до 10000 Гц, что может представлять опасность для таких элементов, как: механические разъемы, паяные соединения, эпоксидные смолы, стеклянные оболочки, оптические оси приборов, кристаллосодержащие элементы, керамические элементы, реле и переключатели.

Таким образом, удар может вызвать сбои в функционировании микросхем БА и БА в целом [2, 39].

1.1.4 Способы снижения действующих нагрузок на БА

Как было показано в пункте 1.1.2, действующие на БА нагрузки зависят от 3-х факторов: типа источника воздействия, геометрии и свойств конструкции КА, расстояния от БА до источника воздействия. Совокупность этих факторов определяет область варьируемых параметров для защиты оборудования.

Для снижения действующих на БА нагрузок можно применять один или несколько методов, приведенных ниже.

Использование средств разделения с малым ударным воздействием

Констатируя опасность высокочастотных воздействий для функционирования БА и КА в целом, за рубежом на протяжении 20-30 последних лет велась активная разработка средств разделения КА с малым ударным воздействием. Например, можно отметить продукцию компаний RUAG и SENER. Так, по утверждению RUAG, СУ от срабатывания системы отделения разработки этой компании на расстоянии 25 мм от плоскости разделения не превышает СУ, приведенный на рисунке 5. В основе механизма разделения лежит кольцевая структура с предварительным натягом, где, как таковой, источник пиротехнического воздействия отсутствует.

Для КА большой массы разработать полностью безударную систему в настоящее время не удалось. Причиной этого является то, что обеспечение достаточной жесткости механической связи разделяемых частей (чтобы выдержать механические нагрузки при выведении) вынуждает использовать в конструкции системы разделения упругий элемент связи с относительно большим предварительным натягом (до 45 кН), при срабатывании которого в отделяемых частях возбуждаются высокоинтенсивные виброударные колебания.

Уровень СУ, g, измеренный на расстоянии 25 мм от плоскости
разделения

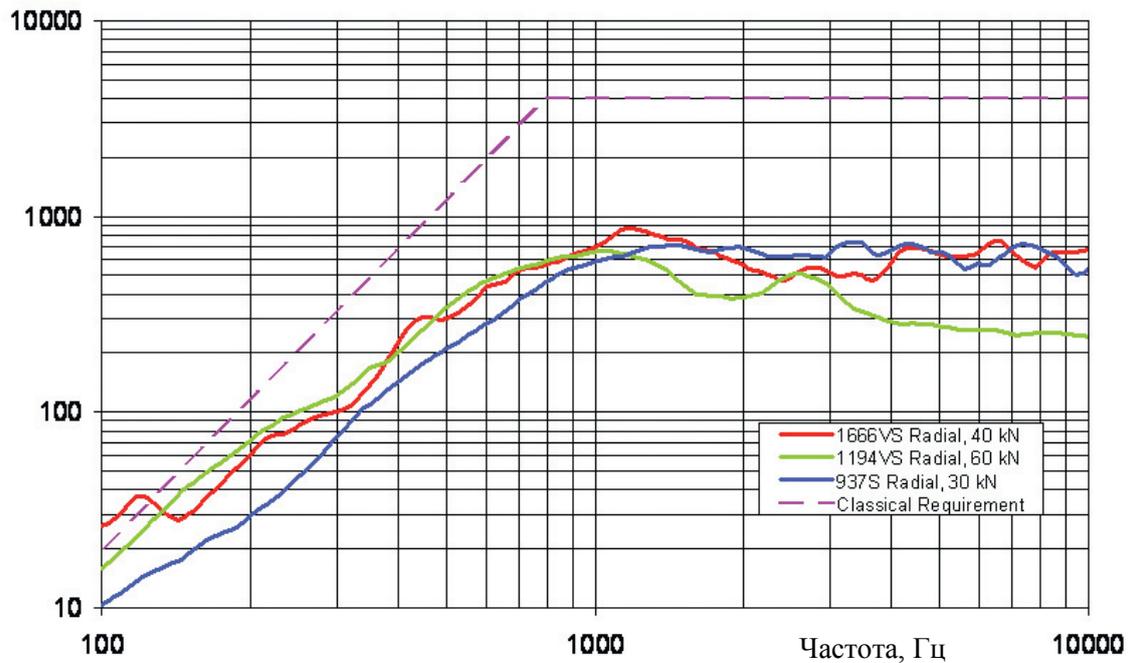


Рисунок 5 – Спектр от срабатывания системы разделения RUAG [60]

Перемещение БА в другую часть КА

В соответствии с пунктом 1.1.2, при удалении от источника воздействия нагрузки на БА уменьшаются. Необходимо отметить, что под расстоянием от источника воздействия понимается путь, который проходит ударная волна по конструкции КА, а не геометрическое расстояние между двумя точками в пространстве. Анализ экспериментальных данных по распространению на конструкции ракеты-носителя ударных перегрузок от пиротехнических средств отделения показал, что наиболее приемлемой аппроксимацией зависимости уровня СУ от расстояния при фиксированной частоте является выражение

$$A(x) = A(x_0) x_0 / L \quad (1.1)$$

где x_0 – граница первого режима нагружения (м), $A(x_0)$ – значение СУ на границе первого режима, L – расстояние по конструкции от пирсредств до блоков бортовой аппаратуры.

Параметры СУ могут быть представлены в виде билинейной зависимости значений ударных перегрузок от частоты $A(f)$ при логарифмическом масштабе по f и $A(f)$. Значение параметров ударного спектра может быть описано следующим образом:

Если f_1 и $A(f_1)$ – частота в Гц и уровень СУ на низшей частоте, f_m и $A(f_m)$ – частота в Гц и уровень СУ при частоте излома зависимости СУ, f_k и $A(f_k)$ – промежуточные значения параметров СУ, то промежуточные значения СУ при $f_1 \leq f_k \leq f_m$ определяются соотношениями:

$$A(f_k) = 10^{(b_0 + b_1 \log(f_k))} \quad (1.2)$$

где

$$b_0 = \frac{\log(A(f_1)) \log(f_m) - \log(A(f_m)) \log(f_1)}{\log(f_m / f_1)}$$

$$b_1 = \log(A(f_1) / A(f_m)) / \log(f_1 / f_m); \quad (1.3)$$

и

$$\log A(f_k) = [\log A(f_m) \cdot \log(f_k / f_1) + \log A(f_1) \cdot \log(f_m / f_k)] / \log(f_m / f_1); \quad (1.4)$$

$$A(f_k) = 10^{\log A(f_k)} \quad (1.5)$$

При $f_k \geq f_m$:

$$A(f_k) = A(f_m) \quad (1.6)$$

На распространение ударных перегрузок по конструкции КА влияет наличие стыков между элементами конструкции.

Так, коэффициент передачи через стык ступеней был оценен по имеющимся экспериментальным данным.

На рисунке 6 приведены коэффициенты передачи по СУ компонент вектора ускорений при переходе плоскости типового фланцевого стыка, элементы которого изготовлены из одинаковых материалов.

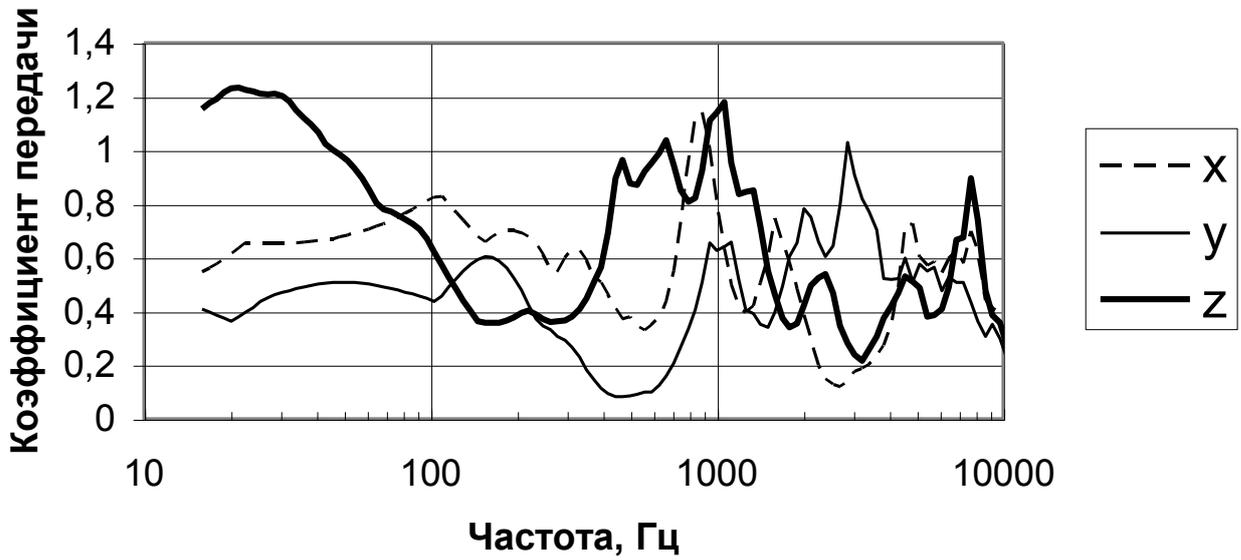


Рисунок 6 – Коэффициент передачи СУ через стык

На рисунке 6 компоненты x, y находятся в плоскости разделения, а z – по нормали к плоскости разделения.

Розетки датчиков ускорений были установлены непосредственно на шпангоутах стыка.

Изменение параметров ударных перегрузок при переходе через стык в частотной области имеет ряд особенностей. Из анализа приведенного рисунка видно, что в диапазоне от 100 до 10000 Гц амплитуда СУ при переходе через стык в среднем по частотному диапазону уменьшается в $\sim 1,6$ раз. Однако, следует отметить, что в низкочастотном диапазоне нормальная к плоскости разделения составляющая вектора ускорений практически не изменяется при переходе стыка.

Таким образом, перемещение БА может снизить передающиеся на БА нагрузки.

Использование систем амортизации

Использование однокаскадных или двухкаскадных систем амортизации позволяет снизить нагрузки на БА КА до 100 и более раз. Это позволяет при необходимости расположить чувствительную к ударным нагрузкам БА КА в непосредственной близости от источника возбуждения.

1.2 Отечественные и международные стандарты в части отработки стойкости БА

В настоящее время на территории РФ действуют два блока отечественных стандартов, использующих разные подходы к заданию требований по стойкости БА к ударным нагрузкам.

Исторически раньше появились ГОСТ РВ серий 20.39 и 20.57, актуальные версии которых переизданы в 1998 году. Эти стандарты используются в большинстве отечественных предприятий отрасли – разработчиках БА, и содержат требования по стойкости к удару в виде полусинусоидальных импульсов.

Более актуальным и современным стандартом с точки зрения ударных нагрузок от срабатывания пиросредств является закрытый стандарт второго блока, и ссылающийся на него ОСТ 92-5100-2002. Эти стандарты задают требования по стойкости в виде СУ и также применяются на практике, однако в целом менее распространены, чем вышеуказанные.

В настоящее время два блока этих стандартов с различными требованиями действуют одновременно.

С учетом указанного выше противоречия, а также того, что при коммерческих запусках иностранных КА в ряде случаев требуется проводить наземную отработку в соответствии с требованиями зарубежных и международных стандартов, проанализируем имеющиеся международные и зарубежные стандарты в этой области и сравним их с требованиями отечественных ГОСТов.

Иностранные стандарты, такие как ECSS-E-ST-10-03C (Space engineering. Testing), MIL STD 1540 (NASA), международный стандарт МЭК IEC 60068-2-81:2003, стандарт NASA -STD-7003A регламентируют как требования к БА, заданные в виде СУ, так и способы испытаний БА и требования к испытательному оборудованию [54].

1.2.1 Стандарты, действующие на территории РФ

Отечественные стандарты, описывающие требования к стойкости БА КА на ударные воздействия, как было отмечено выше, делятся на два блока.

Стандарты первого блока – те, в которых требования к БА задаются в виде полусинусоидального импульса. При этом амплитуда импульса находится в диапазоне от 40 до 150g, длительность – от 0,3 до 3 мс.

Эти режимы нагружения для БА соответствуют случаям ударного воздействия при нестационарных режимах работы двигательной установки ракеты-носителя, разделении её ступеней, посадки спускаемого аппарата.

Стандарты второго блока – те, в которых требования к БА задаются в виде СУ. При этом уровень СУ в зависимости от расстояния до пиротехнического устройства составляет от 30 до 10000 g в частотном диапазоне от ~100 до 10000 Гц.

В последнее время в рамках унификации отечественных стандартов с международными был выпущен 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», описывающий методический подход к испытаниям по воспроизведению СУ, который также относится ко второму блоку стандартов. Необходимо отметить, что данный стандарт позиционируется для применения при испытаниях на вибростендах, и частотный диапазон СУ, регламентируемый в данном стандарте, составляет от 0,1 до 5000 Гц, что эффективно перекрывает лишь СУ, соответствующий нагрузкам в дальней зоне, и частично перекрывает СУ в средней.

Основное отличие требований к БА стандартов разных блоков заключается в том, что в требованиях по СУ учтены высокие нагрузки (уровень СУ 1000-10000g) в высокочастотной части СУ (3000-10000 Гц), характерные для реального пиротехнического процесса в ближней и средней зонах, в то время как испытательные полусинусоидальные импульсы в лучшем случае имитируют только нагрузки в дальней зоне и в низкочастотном диапазоне.

Требования по СУ, приведенные во втором блоке стандартов, более соответствуют реальным нагрузкам при срабатывании пиросредств, однако на практике крайне редко используются отечественными предприятиями ракетно-космической отрасли, по следующим причинам:

1. Первые образцы БА космического назначения разрабатывались с применением технологий, для которых высокочастотное нагружение было не критично. Поэтому высокочастотными нагрузками можно было обоснованно пренебречь, моделируя на всю БА лишь удар в низкочастотной области (технологическая причина).
2. Стандарты первого блока являются более ранними по времени разработки, и испытанная в соответствии с ними БА тех времен успешно функционировала на орбите в составе КА (историческая причина).

3. Установление определенного уровня нагрузок было удобно на практике: нормативные документы, как правило, устанавливали единые требования и методику испытаний для всей БА. В то же время в случае пиродара высокочастотные составляющие даже в пределах одного КА не всегда являются определяющими для всей БА данного КА.

В силу приведенных причин отечественные предприятия при разработке БА опирались на стандарты первого блока, и при наземной отработке подтверждали стойкость БА испытаниями полусинусоидальными импульсами.

В части задания эксплуатационных и испытательных нагрузок на конкретную БА КА необходимо отметить, что в отечественных нормативных документах обоих блоков:

- отсутствует определение термина «расчётный уровень нагрузок» в отношении ударных нагрузок от пиросредств, воздействующих на конкретную БА, и нет рекомендаций по его реализации.
- испытательный уровень нагрузок на БА привязан к эксплуатационному уровню и не отвечает принятому коэффициенту безопасности. В первом блоке стандартов он задан в виде полусинусоидального импульса с незначительно варьируемыми параметрами. Во втором блоке стандартов предписывается устанавливать испытательный уровень СУ согласно программе испытаний или техническим условиям на БА с коэффициентом безопасности, равным единице. При отсутствии опытных данных существует рекомендация проводить испытания на некоторый обобщенный уровень СУ, который может иметь существенные различия с реально действующими на БА нагрузками.

1.2.2 Требования зарубежных и международных стандартов

В международной практике требования по стойкости к ударным нагрузкам по спектру удара задаются как в национальных стандартах: США (NASA) [2,3], ЕС (ECSS)[4], так и в международных стандартах [5,6].

Основными стандартами за рубежом, описывающими требования к КА, составным частям КА и БА КА, и методы испытаний на воздействие ударных нагрузок от срабатывания пиросредств, являются следующие:

- Стандарт ЕС ECSS-E-ST-10-03C (01 June 2012). Space engineering. Testing описывает требования к бортовому оборудованию космического назначения различных типов. В том числе, требования по стойкости к удару предъявляются не ко всему оборудованию на обязательной основе. Так, требования не предъявляются к солнечным батареям и панелям (подразумевается подтверждение стойкости при проверке раскрытия), а к антеннам, сосудам под давлением требования предъявляются по решению заказчика. Требования к ударному воздействию задаются в виде СУ.
- Стандарт NASA MIL STD 1540C описывает полный объем испытаний изделий космической техники. Для всех уровней сборки КА (блок, подсистема, система, аппарат в целом) и всех категорий испытаний (разработочные, квалификационные, приемочные) определена необходимость проведения ударных испытаний объектов, объём испытаний и уровни воздействий [54]. Требования к ударному воздействию задаются в виде СУ.
- Стандарт NASA-STD-7003A детально описывает объем и методику испытаний КА, подсистем КА и БА КА к испытаниям на ударные нагрузки от срабатывания пиротехнических средств, включая рекомендации по использованию методов испытаний.

- Международный стандарт ISO 15864:2004 «Space systems. General test methods for spacecraft, subsystems and units» по своей сути аналогичен NASA MIL STD 1540C, однако менее подробен, в части требований содержит больше рекомендаций, нежели предписаний. При воспроизведении ударных нагрузок предписывает имитирование реально воздействующего СУ.
- Международный стандарт МЭК IEC 60068-2-81:2003 (аналог ГОСТ Р 53190-2008) описывает общие принципы воспроизведения ударного спектра при испытаниях на вибростендах.

Нормативные документы за рубежом не всегда носят обязательный характер, в отличие от отечественных стандартов, которые «по умолчанию» обязательны к исполнению. Как правило, предписываемые зарубежными стандартами требования выполняются как разработчиками комплектующих КА (БА), так и разработчиками КА и средств выведения.

Мировая практика соответствует принятым стандартам: крупнейшие мировые производители КА, ракет-носителей и БА, такие как EADS, Boeing, SSTL, SAFT и многие другие проводят испытания продукции на ударные нагрузки, заданные в виде СУ. Зачастую испытания проводятся на максимальные уровни нагрузок, тем самым расширяется возможная сфера применения продукции.

Особое внимание в указанных стандартах уделяется определению уровней нагрузок на БА. Установлено понятие «максимального ожидаемого уровня воздействия» (maximum expected flight environment, далее МОУВ) ударной нагрузки на БА, для определения которого могут использоваться следующие методы[2]:

- Расчёт нестационарного процесса;
- Огибающая измеренных данных лётных или наземных испытаний;
- Статистический анализ измеренных данных.

Последний метод является предпочтительным в том случае, если есть данные по трём и более измерениям. В том случае, если выбран статистический метод, МОУВ определяется как такой уровень СУ, который не будет превышен в 95% случаях полёта с вероятностью 50% (P95/50, по терминологии [3]).

Испытательный уровень на БА определяется как добавка в дБ к МОУВ. Для разных схем отработки прочности КА и стойкости БА КА – с созданием дополнительной матчасти для отработочных испытаний (классическая) или без неё (стратегия «протофлайт»), – установлены различные испытательные уровни СУ, и варьируется число воздействий по каждой оси. Режимы испытаний БА и частей КА к ударным нагрузкам в NASA в зависимости от категории испытаний и наличия собственных источников пироударных нагрузок внутри объекта испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы испытаний на пироудар БА и частей КА в NASA [2]

Тип пироудара по отношению к объекту испытаний	Категория испытаний		
	Отработочные (квалификационные)	Протофлайт	Лётные приёмочные
Иницируемый внутри объекта/ является источником ударных нагрузок	2 срабатывания	2 срабатывания	Одно срабатывание
Внешний по отношению к объекту испытаний/ имитирование	МОУВ+3дБ, 2 раза вдоль каждой оси	МОУВ+3дБ, 1 раз вдоль каждой оси	МОУВ, 1 раз вдоль каждой оси

Примечание: отработка стойкости к удару ведется либо квалификационными+лётными приёмочными испытаниями, либо с использованием стратегии «протофлайт»

Для определения МОУВ на БА при наличии результатов испытаний прототипов-аналогов были разработаны специальные рекомендации [2], приведенные в Приложении Б.

1.2.3 Сравнение требований нормативных документов в РФ и за рубежом

Для сравнения требований к БА, предъявляемых различными нормативными документами, выберем в качестве примера определенные исходные данные, и определим для них испытательные уровни в соответствии с требованиями каждого из сравниваемых стандартов.

Пусть требуется определить испытательный уровень воздействия для БА, находящейся на КА «Метеор-М» №1, расположенной на расстоянии 0,5м от системы отделения.

По результатам измерений ударных нагрузок при срабатывании системы отделения (СО) КА «Метеор-М» №1 на расстоянии 0,5м (в средней зоне) получен СУ, представленный в таблице 2.

Таблица 2 – СУ от срабатывания СО КА «Метеор-М» №1

Частота, Гц	100	1000	3000	10000
Уровень СУ, g	20	1500	2000	2000

В соответствии со стандартами первого блока отечественных стандартов выберем 3 типичных испытательных полусинусоидальных импульса со следующими параметрами:

- максимальная амплитуда импульса – 40g, длительность – 3 мс;
- максимальная амплитуда импульса – 80g, длительность – 3 мс;
- максимальная амплитуда импульса – 150g, длительность – 0,3 мс.

В соответствии со стандартами второго блока отечественных стандартов выберем испытательный режим, соответствующий расстоянию до пиросредства – от 0,5 до 0,7м – спектр удара, представленный в таблице 3.

Таблица 3 – СУ по требованиям второго блока отечественных стандартов

Частота, Гц	500	1000	5000	10000
Уровень СУ, g	1750	5000	5000	2500

Испытательный уровень в соответствии с стандартами США и ЕС установим как превышающий заданный в таблице 1 на +3 дБ.

В результате получим 6 спектров удара, сопоставленных на рисунке 7.

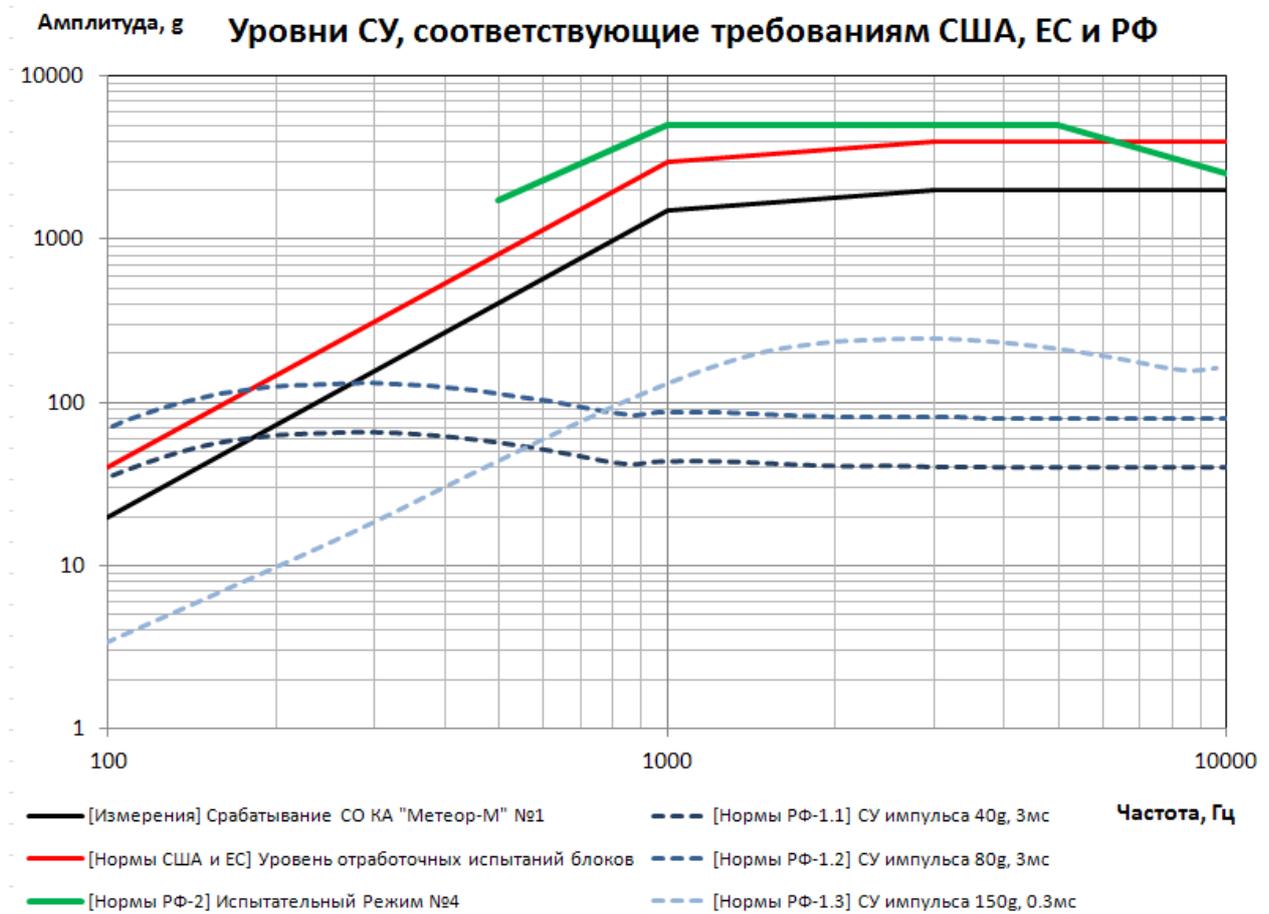


Рисунок 7 – Сравнение СУ в средней зоне по нормативным требованиям США, ЕС и двух блоков стандартов РФ

СУ «Нормы РФ-1.1», «Нормы РФ-1.2», «Нормы РФ-1.3» относятся к полусинусоидальным импульсам первого блока отечественных стандартов. Эти режимы нагружения соответствуют случаям нестационарных режимов работы двигательной установки и разделению ступеней ракеты-носителя, т.е. по сути, имитируют удар в дальней зоне от пиросредства. «Нормы РФ-2» относятся ко второму блоку отечественных стандартов, и показывают обобщенный режим испытаний для БА, находящейся на заданном расстоянии от пиросредства.

Как видно из рисунка 7, СУ, отвечающие требованиям отечественных стандартов первого блока, не соответствуют реальным нагрузкам от срабатывания пиросредств как в средней, так и тем более в ближней зоне от пиросредства, где высокочастотные составляющие СУ еще более выражены. При испытаниях БА на ударные нагрузки в соответствии с этими стандартами наблюдается существенное недогружение БА в высокочастотной области СУ, и перегрузка в низкочастотной области (<100 Гц), что, во-первых, может привести к выходу БА из строя, а во-вторых, не позволяет сделать объективный вывод об ударостойкости БА.

Таким образом, отечественные стандарты первого блока могут применяться только при испытаниях БА, находящейся в дальней зоне от пиросредств, например, при имитировании нагрузок от разделения ступеней ракеты-носителя, или для отработки стойкости БА, находящейся в отдалении от всех источников пироударных нагрузок, где в ряде случаев допускается заменять ударные испытания испытаниями на вибростенде.

Отечественные стандарты второго блока более приближены к реальным нагрузкам, могут имитировать нагрузки от срабатывания пиросредств в ближней и средней зонах. Однако, ввиду отсутствия сформулированной привязки испытательного режима БА к эксплуатационному уровню нагрузок, действующих на эту БА **в составе конкретного КА**, предъявляемые стандартами второго блока требования являются недостаточно обоснованными. Применение обобщенных нагрузок во многих случаях будет являться

необоснованно завышенным, что является недостатком данного стандарта, который можно устранить учетом рекомендаций, приведенных в п. 1.2.2.

В связи с тем, что абсолютное большинство отечественных предприятий при разработке БА руководствуется нормативными документами первого блока (см. 1.2.1), имеет место следующее противоречие:

Сложившаяся практика отработки стойкости БА к ударным воздействиям от пиросредств в высокочастотной области на отечественных предприятиях ракетно-космической отрасли не соответствует современным требованиям и мировому уровню, во многом вследствие исторически сложившейся двойственности отечественной нормативной базы и отсутствия однозначности предъявляемых требований к БА по нагрузкам.

1.3 Анализ способов испытаний БА на ударостойкость

Для подтверждения стойкости БА к воздействию ударных нагрузок от срабатывания пиросредств могут использоваться только испытания, поскольку только экспериментально можно проверить работоспособность БА после воздействия механического фактора. Рассмотрим и сопоставим существующие способы испытаний БА на стойкость к ударным воздействиям [55].

Все испытания можно разделить на две основные группы: натурные и стендовые[61]. В западной литературе в отношении ударных нагрузок чаще встречается следующая классификация: полевые (field) и испытания на ударных стендах (shock machines) [40]. Приведенные термины по сути попарно аналогичны.

Под натурными испытаниями понимаются «испытания объекта в условиях, соответствующих условиям его использования по прямому назначению с непосредственным оцениванием или контролем определяемых характеристик свойств объекта»[61]. В данном случае под натурными испытаниями БА на

воздействие ударных нагрузок от срабатывания пиросредств понимается подрыв пиросредств КА и СО по штатной циклограмме срабатывания, при этом испытываемая БА должна быть штатно смонтирована на изделие КА (опытный или лётный образец КА).

Стендовыми испытаниями считаются те испытания, которые проводятся на испытательном оборудовании [61], т.е. под это определение попадают все методы испытаний, не являющиеся натурными.

Стендовые испытания являются более предпочтительными, чем натурные, по следующим причинам[40]:

1. Создаваемое ударное воздействие является контролируемым, и испытания могут быть повторены с определенной точностью, т.е. имеет место повторяемость процесса испытаний. Это позволяет при необходимости проводить сравнительную оценку реакции испытываемой БА, при этом осуществляя запись параметров функционирования БА.
2. При стендовых испытаниях возможно задание ударного воздействия с требуемыми параметрами удара, тогда как при натуральных испытаниях реализуется лишь одно определенное воздействие. Таким образом, проведение отработочных (по западной терминологии – квалификационных) испытаний БА на увеличенные по отношению к эксплуатационным уровни воздействий возможно только на испытательном оборудовании.
3. Испытательное оборудование может быть размещено в подходящем месте, оснащенном соответствующими средствами измерений и контроля параметров испытаний.
4. Проведение стендовых испытаний обычно не требует больших материальных затрат, что обеспечивает возможность проведения значительного объема доводочных и отработочных испытаний опытных

образцов БА и подсистем КА на воздействие ударных нагрузок. Натурные испытания в этом случае непрактичны и нецелесообразны.

1.3.1 Испытания в составе образца КА со штатными пиросредствами (натурные)

При испытаниях образца КА со штатными пиросредствами испытываемый образец КА может быть укомплектован опытными образцами БА, содержащими функциональную часть в объеме, достаточном для проверки функционирования. Тогда в результате испытаний ДИ КА можно подтвердить (без запаса по уровню воздействия) стойкость любой БА КА к эксплуатационным ударным нагрузкам. Однако ввиду отсутствия возможности испытаний БА на увеличенный с учетом коэффициента запаса 1.3-1.4 уровень воздействия, технических и организационных сложностей данный способ крайне редко применяется для испытаний БА.

Рациональная область применения: испытания батарей фотоэлектрических, антенн и других компонентов КА, имеющих сложное многоточечное крепление к конструкции КА, а также элементов конструкции КА, имеющих собственные источники ударных нагрузок (как правило, пиросредств зачеховок трансформируемых конструкций КА).

1.3.2 Стендовые испытания БА и особенности задания ударных нагрузок

Стендовые испытания БА в целом подразделяются на два типа: удары с ненулевой (velocity shock) и нулевой (high-frequency shock) скоростью конструкции с жестко закрепленным на ней объектом испытаний (ОИ) в момент

удара [40]. К испытаниям с ненулевой скоростью ОИ относятся следующие: копровые с ненулевой скоростью ОИ, пневматические, на вибростенде. К испытаниям с нулевой скоростью ОИ относятся следующие: копровые с нулевой скоростью ОИ, пневматические, пиротехнические.

В последующих пунктах подраздела содержится описание существующих методов стендовых испытаний БА обоих типов, применяемых в РФ и за рубежом, определены их преимущества и недостатки, сформулирована рациональная область применения.

Особенности задания ударных нагрузок при стендовых испытаниях

В зависимости от типа испытательного оборудования и предъявляемых требований, при испытаниях БА испытательные нагрузки могут быть заданы в виде импульсов, характеризующихся формой, пиковым значением и длительностью, или в виде СУ.

В случае задания требований в виде СУ, что практикуется в большинстве случаев в мировой практике, параметры испытательных импульсов подбираются таким образом, чтобы соответствующий им СУ охватывал требуемый СУ в пределах заданного поля допуска. В случае если СУ от одного импульса не полностью перекрывает требуемый СУ, подбираются дополнительные импульсы другой длительности и амплитуды так, чтобы огибающая спектров от этих импульсов перекрывала требуемый СУ, как показано на рисунке 8.

График построен в безразмерных осях, на нем представлена зависимость коэффициента динамичности K_d (вертикальная ось) от частоты осциллятора, отнесенной к частоте импульса (параметр λ).

Нормативные уровни СУ при испытаниях и объем испытаний зависят от уровня сборки ОИ (блок, система, КА), наличия в составе ОИ источника ударных нагрузок, и категории испытаний ОИ (квалификационные, приемочные, протофлайт). Подробнее испытательные нагрузки описаны в разделе 3.2.1.

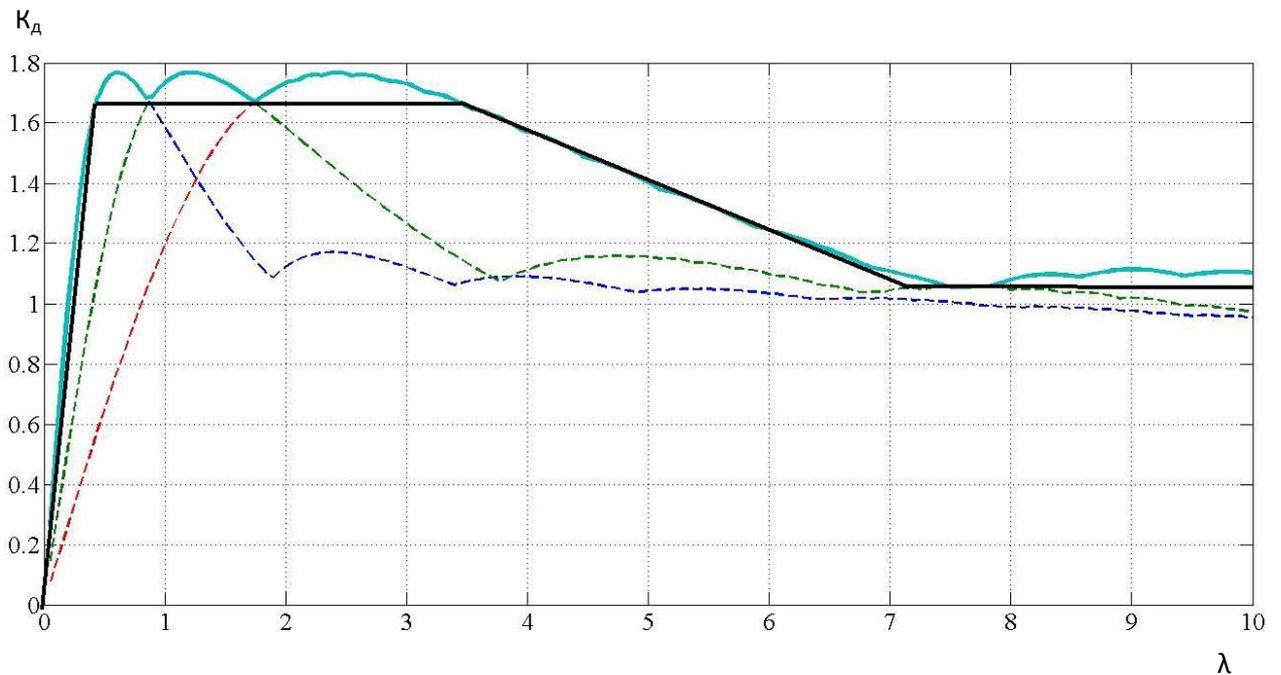


Рисунок 8 – Принцип суперпозиции СУ при испытаниях

Поле допуска при воспроизведении СУ зависит от особенностей конкретного оборудования, хотя существуют и общие рекомендации [2,40].

На рисунке 8 показаны следующие спектры:

- чёрная линия – требуемый уровень СУ;
- зелёная, красная, синяя линии – СУ от воздействия 3 испытательных импульсов;
- голубая линия – результирующий СУ, является оглабающей СУ от всех испытательных импульсов.

1.3.3 Стендовые испытания с ненулевой скоростью ОИ

Одним из двух типов стендовых испытаний являются стендовые испытания с ненулевой скоростью конструкции, жестко закреплённой с ОИ в

момент удара – для простоты далее будем называть «с ненулевой скоростью ОИ».

Считается, что произошёл удар с ненулевой скоростью ОИ, если продолжительность ударного воздействия меньше периода, соответствующего главной собственной частоте ОИ [40]. Такие удары имеют импульсный характер воздействия и генерируют основную энергию на собственных частотах ОИ.

При ударных испытаниях БА с ненулевой скоростью происходит доминирование низкочастотных (как правило до ~500-1000 Гц) составляющих СУ. При определенных условиях, а именно: наличие у ОИ собственных частот ниже уровня $0.2/T$, где T – длительность испытательного полусинусоидального или треугольного импульса, – удары с ненулевой скоростью могут привести к механическому повреждению ОИ[40].

Требуемый СУ при испытаниях БА не должен иметь существенных составляющих СУ в высокочастотной части, что делает невозможным применение методов испытаний данного типа для воспроизведения пироудара в ближней зоне, и накладывает существенные ограничения на возможность воспроизведения СУ, характерного для средней зоны. Возможность применения конкретного метода испытаний для имитирования пироудара в дальней, и особенно в средней зоне, определяется параметрами испытательного оборудования.

В пункте приведены основные виды стендовых испытаний с ненулевой скоростью ОИ. Два из трех приведенных способов испытаний – **испытания на вибростенде и копровые с ненулевой начальной скоростью ОИ** – являются **самыми распространенными методами стендовых испытаний на удар в РФ.**

Испытания на вибростенде

При испытаниях на вибростенде ударное воздействие имитируется, как правило, одним или несколькими полусинусоидальными импульсами.

Эталонный полусинусоидальный импульс (рисунок 9) состоит из основного импульса, который определяется пиковой амплитудой и длительностью воздействия, а также предварительного и последующего импульса, которые необходимы для обеспечения выхода стенда на режим.

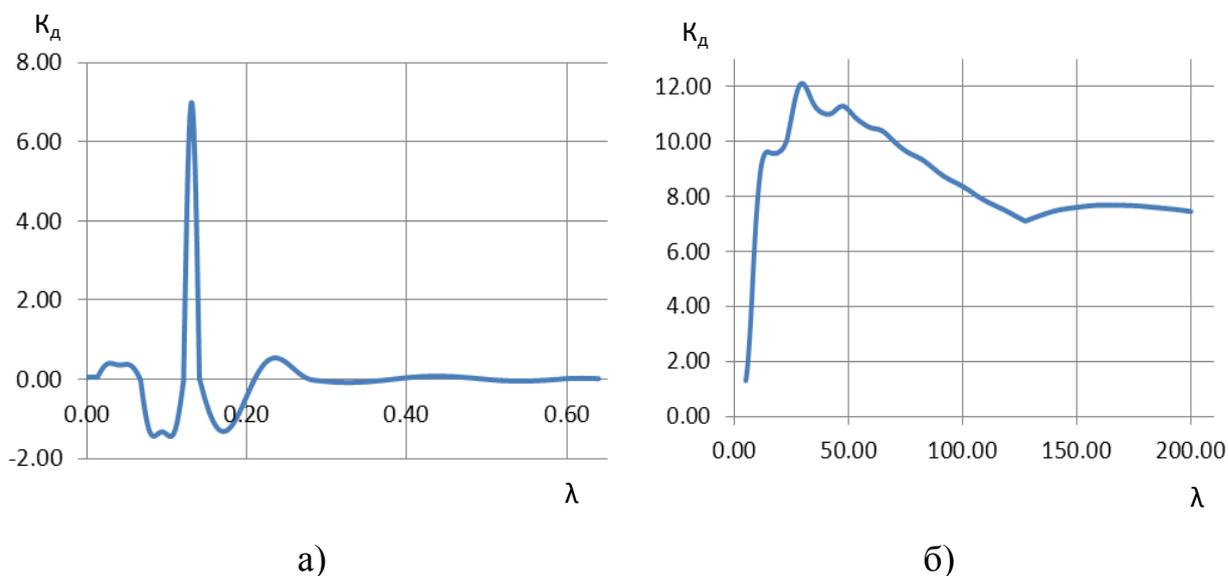


Рисунок 9 – Эталонный испытательный импульс (а), спектр ответа от воздействия эталонного испытательного импульса(б)

Сложность метода состоит в получении высоких уровней воздействий во всем частотном диапазоне. Возможности современных вибростендов в создании ударных импульсов ограничены: как правило, пиковая амплитуда импульса не превышает 100-200g, контролируемая с достаточной точностью длительность импульса составляет не менее 0,6 мс, что ограничивает возможность применения метода. Ограничения вибростендов в создании высокочастотных нагрузок также отражены в стандарте ГОСТ Р 53190-2008, в котором верхняя граница частотного диапазона при испытаниях на вибростенде составляет 5000 Гц, что не позволяет использовать данный метод для имитирования нагрузок в ближней зоне, и накладывает существенные ограничения по моделированию удара в средней зоне.

Рациональная область применения метода – испытания БА с имитированием пироудара в дальней зоне.

Копровые испытания с ненулевой скоростью ОИ

Копровые испытания с ненулевой скоростью (drop test) – испытания, в которых ОИ жестко прикреплен к подвижной тележке или платформе. Тележке или платформе с ОИ сообщается определенная скорость, с которой происходит взаимодействие с преградой. При этом формируется ударное воздействие. Копровые стенды могут быть как вертикальные – с подъемом плиты с ОИ, так и горизонтальные – с разгоном тележки.

В целом копровые испытания с ненулевой начальной скоростью ОИ активно используются в отечественном авиастроении, судостроении и космонавтике. Стенды с тележкой нашли применение на многих отечественных предприятиях ракетно-космической отрасли, в т.ч. развиты в НПО Машиностроения (Реутов), где испытываются на воздействие ударных нагрузок таким образом составные части ракет и ракеты в целом[62]. Типичный спектр копровых испытаний представлен на рисунке 10.

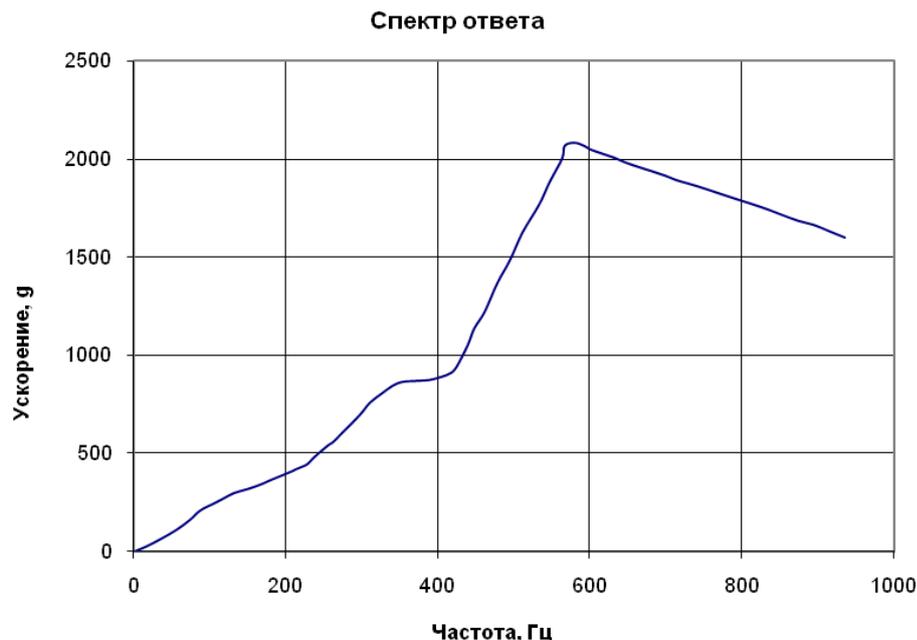


Рисунок 10 – Типичный спектр ответа для копровых испытаний [42]

СУ имеет пик в области частот до ~ 1000 Гц, не поддающийся «отстройке» вследствие физики процесса удара. При использовании данного метода для испытаний БА будет иметь место существенная перегрузка в области низких частот, и недогрузка в области высоких. Высока вероятность механического повреждения БА из-за существенной низкочастотной перегрузки.

Рациональная область применения метода – может применяться для автономных испытаний БА КА в дальней зоне с ограничениями.

Пневматические испытания с ненулевой скоростью ОИ

Пневматические испытания на ударные нагрузки представляют собой способ испытаний, использующий энергию сжатого газа для возбуждения ударных волн в оснастке для крепления ОИ. Принцип действия пневматических стендов с ненулевой скоростью ОИ таков:

ОИ жестко закреплена к поршню, который механически связан с передним концом пневматической трубы. В переднем конце трубы нагнетается давление газа, при этом поршень удерживается в своём положении механической связью. Далее срабатывает механизм быстрого снятия связи поршня с трубой, и поршень под давлением ускоряется вниз по трубе. Задний торец трубы закрыт, поэтому поршень останавливается из-за сжатия газа в задней части трубы. При этом в стволе содержатся специальные отверстия для отвода избытка энергии и предотвращения колебательного движения поршня.

Для испытания электронной БА используют модернизированный способ, заключающийся в том, что:

- используется труба большой длины;
- начальное ускорение минимально;
- на коротком расстоянии от заднего торца трубы расположены отверстия большого диаметра;

- ударное воздействие большой амплитуды и короткой длительности создается за счет остановки ОИ после прохождения пистоном с ОИ открытых отверстий трубы: происходит резкое сжатие газа в заднем конце трубы. Иногда дополнительно используют инертный газ для предотвращения возгорания смазки при интенсивном сжатии, сопровождаемом повышением температуры.

Данный способ испытаний может использоваться для автономных испытаний БА. Ограничения на использование метода следующие:

- регулировка и настройка стенда определяется его конструктивными особенностями, что накладывает ограничения на параметрах и погрешности создаваемого удара. Повторяемость испытаний также сложно достижима ввиду разбросов параметров температуры и давления газа;
- для испытаний БА разных размеров требуется использование трубы большого диаметра или нескольких сменных труб, что создает неудобство в эксплуатации;
- для нагнетания избыточного давления используется компрессор, в связи с чем для работы стенда требуется регулярное техническое обслуживание.

Рациональная область применения метода – может применяться для автономных испытаний БА КА с имитированием удара в дальней и средней зоне, с учетом указанных выше недостатков.

1.3.4 Стендовые испытания с нулевой скоростью ОИ

При проведении стендовых испытаний с нулевой скоростью ОИ подразумевается, что ОИ установлен на платформу стенда, а возбуждение

колебаний происходит либо в определенной части платформы – точечное, либо распределено каким-то образом по поверхности платформы.

Форма СУ при этом определяется параметрами платформы, что является общим для методов данной группы. Различия методов обусловлено лишь различной природой источников ударного воздействия.

Можно выделить три наиболее распространенных типа испытаний: копровые с нулевой скоростью ОИ (по западной терминологии – bump test), пневматические с нулевой скоростью ОИ, пиротехнические. Каждый из представленных методов испытаний формирует отдельное направление исследований, связанных с научно-методологическим обеспечением работы стенда с источником нагрузок данной природы, а именно: воспроизведение заданной амплитуды удара с необходимой точностью, при этом должна быть обеспечена повторяемость результатов.

Все методы данной группы можно применять для моделирования пиродара в ближней зоне от источника воздействия, а СУ, соответствующие средней и дальней зоне, могут быть получены путём смещения места крепления ОИ на платформе от источника воздействия, в том числе с использованием специальных приспособлений – технологической оснастки.

В связи с этим методы являются универсальными для автономных испытаний БА. Целесообразность применения того или иного метода зависит от его преимуществ и недостатков, возможностей научно-технической базы предприятия.

Копровые испытания с нулевой скоростью ОИ

Данный метод испытаний реализуется при ударе металлической конструкции («молота» копра) по неподвижной платформе с закрепленной на ней ОИ.

Метод широко применяется на практике, причем масштабы стенда варьируются в зависимости от массы ОИ и создаваемой энергии удара – от нескольких кг (для испытаний электронных блоков) до нескольких тонн (корабельные копры).

Типичный пример стенда приведен на рисунке 11.

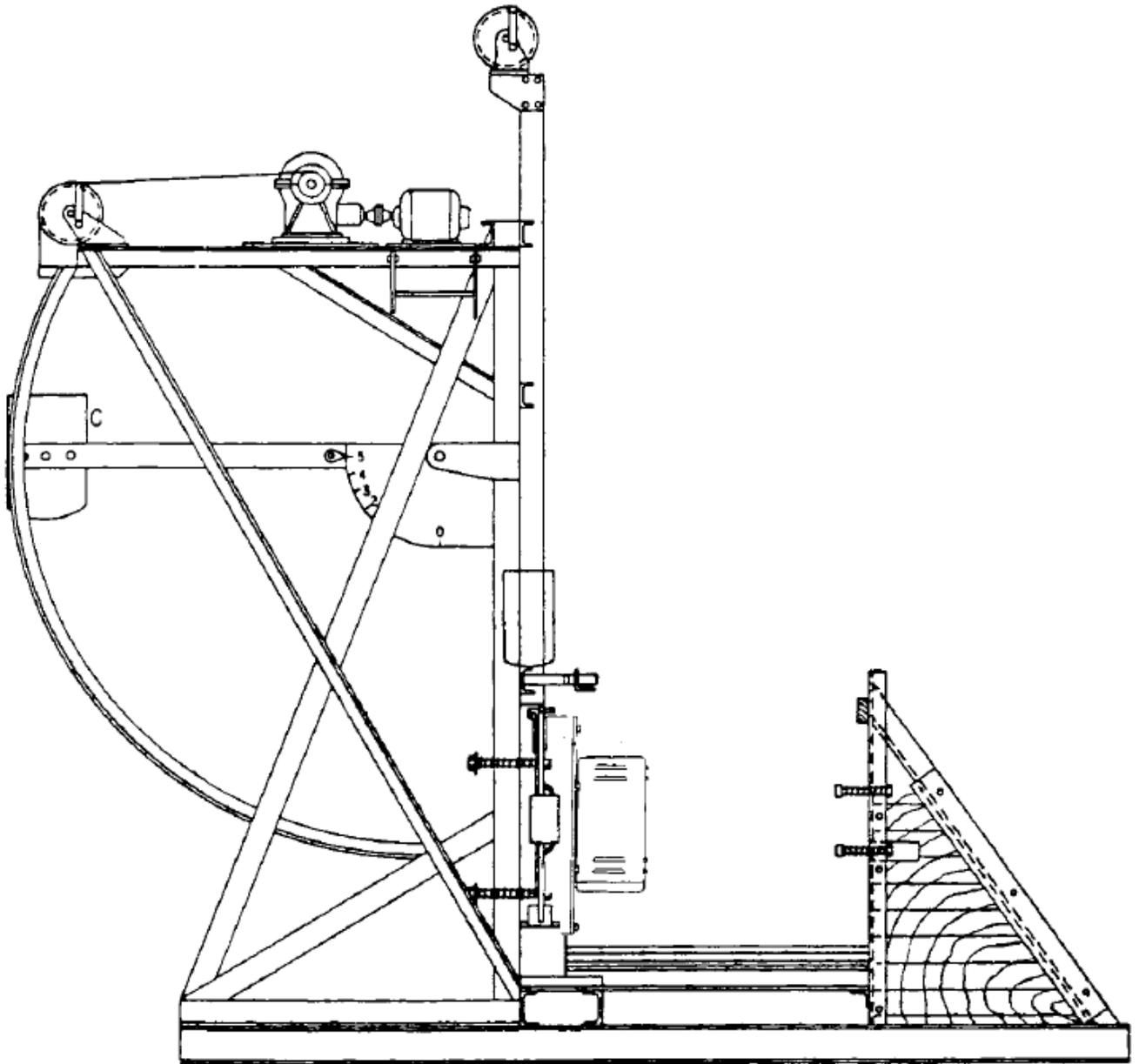


Рисунок 11 – Копровый стенд для испытаний судового оборудования[40]

Пневматические испытания с нулевой скоростью ОИ

Источником нагрузок служит энергия сжатого воздуха. Схема стенда представлена на рисунке 12. Применяемая на стенде платформа имеет изменяемые конструктивные и геометрические параметры, варьирование которых обеспечивает получение определенной резонансной частоты платформы в широком диапазоне (~250-7000 Гц). Удар пневмопистолета по платформе стенда при этом возбуждает ударное воздействие, СУ которого имеет точку перегиба в частоте, совпадающей с резонансной частотой платформы.

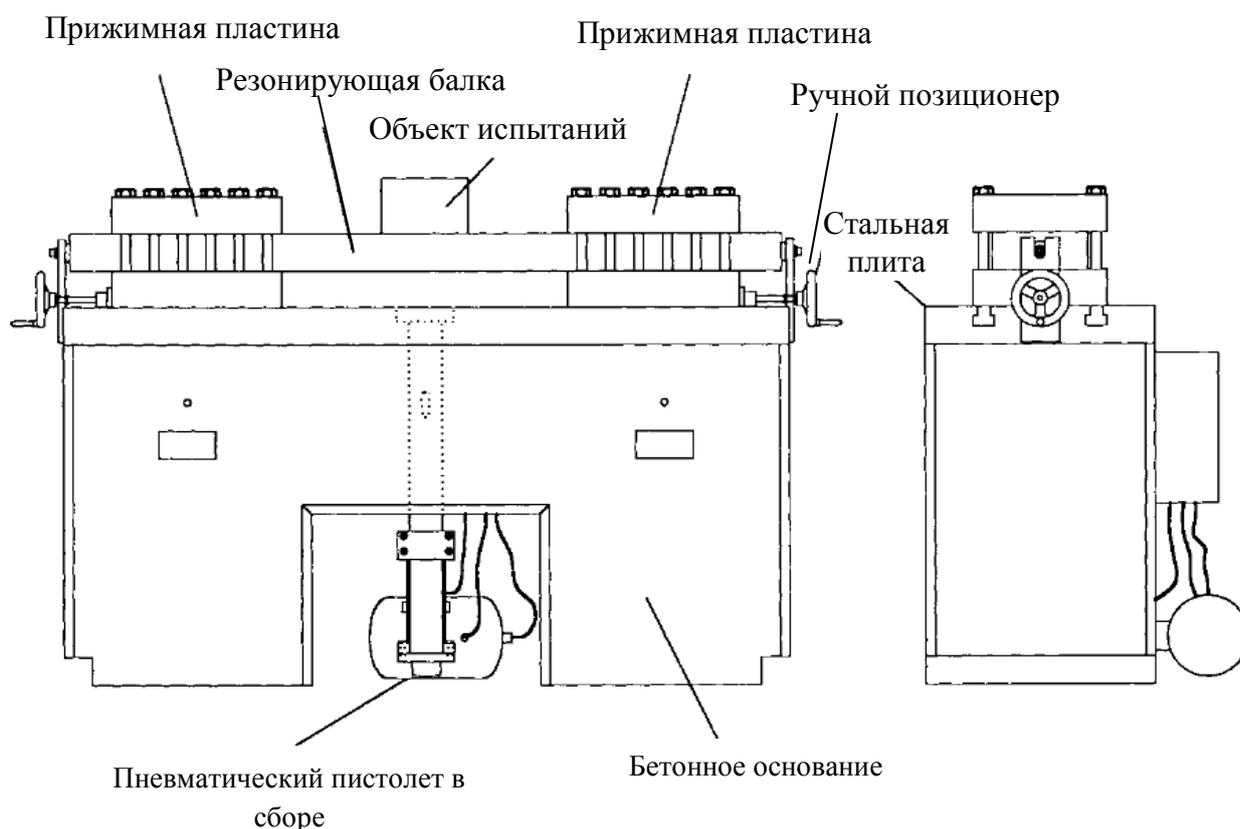


Рисунок 12 – Пневматический стенд с нулевой скоростью ОИ[40]

Недостаток метода такой же, как и у пневматических испытаний с ненулевой скоростью ОИ: регулировка и настройка пневматического пистолета определяется его конструктивными особенностями, что накладывает ограничения на параметры и погрешности создаваемого удара. Повторяемость

испытаний также сложно достижима ввиду разбросов параметров температуры и давления газа.

Пиротехнические стенды

Источником воздействия при испытаниях на пиротехнических стендах служат ударные нагрузки от срабатывания пиросредств. Разнообразие пиротехнических стендов обусловлено существованием различных типов пиротехнических устройств. Существуют стенды, использующие пиропшнуры, например, приведенный на рисунке 13.

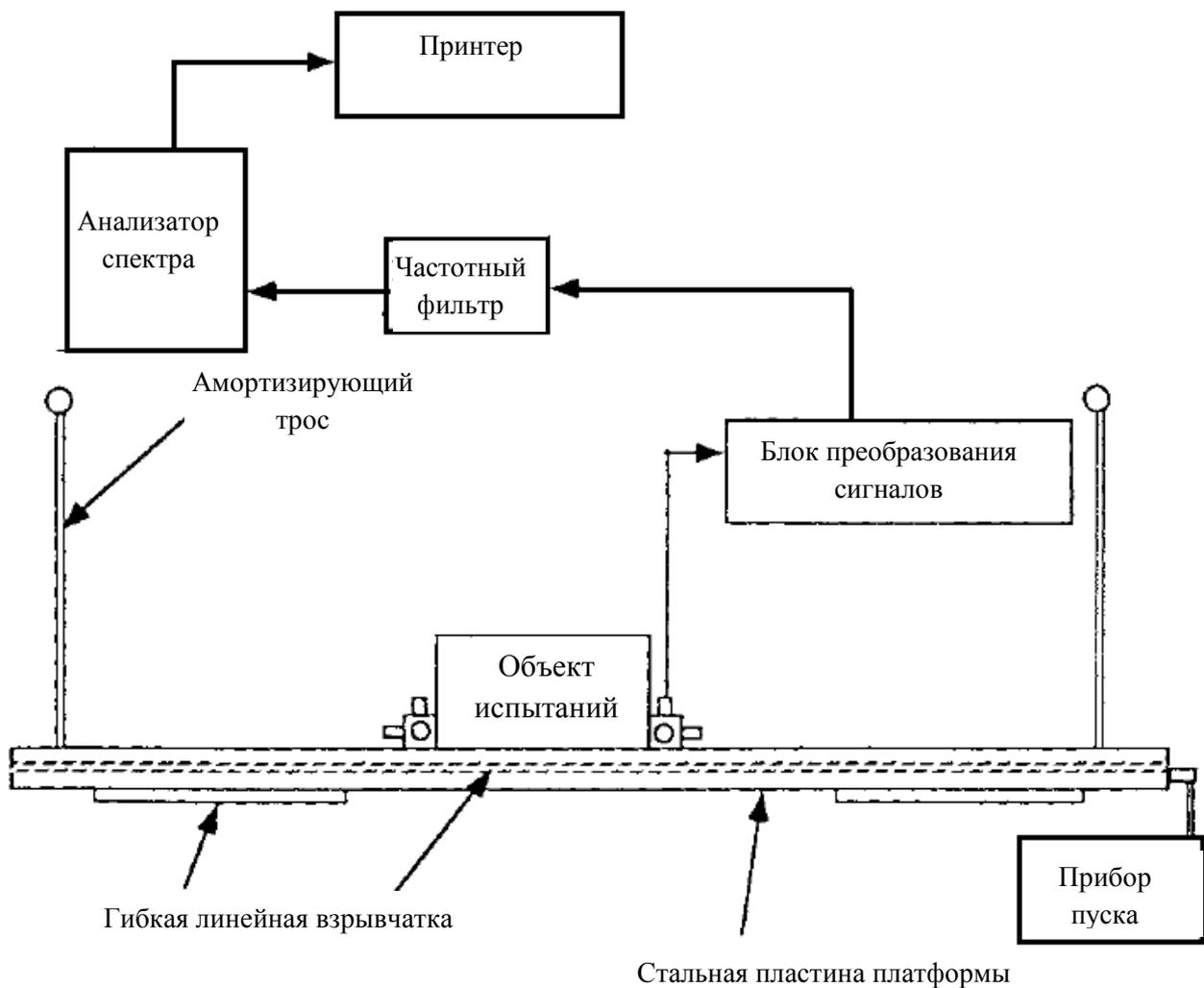
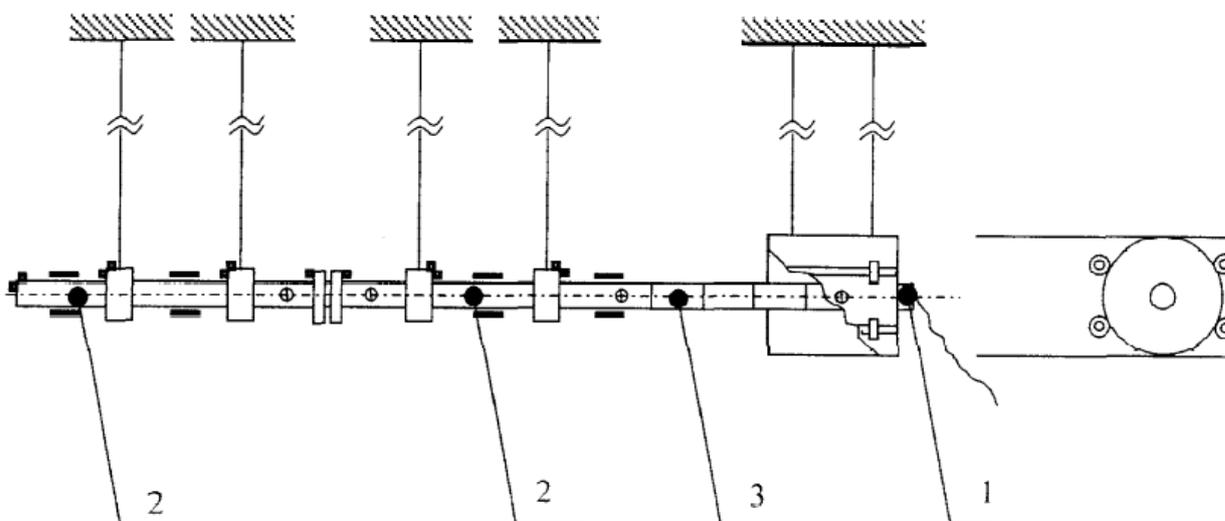


Рисунок 13 – Пиротехнический стенд с пиропшнуром[40]

Многообразие пиротехнических стендов и методик стендовых испытаний основано на том, что использование источника воздействия пиротехнической природы для имитирования пироудара является логичным, т.к. максимально приближено к реальному ударному процессу от пиротехнических средств разделения.

Например, для имитирования ударного воздействия от срабатывания пиросредств в АО «ИСС» были созданы специальные источники ударного воздействия, а также сопутствующие методики испытаний. Для испытаний БА в АО «ИСС» используется стенд с пиротехническим источником ударного воздействия (см. патент №2377524), представленный на рисунке 14 .



1-устройство ударного нагружения;2-волноводы;3-набор вкладышей

Рисунок 14 – Пиротехнический стенд для испытаний БА в АО «ИСС»[49]

Имитирование нагрузок от срабатывания пиросредств для испытаний макетов и сборок КА проводится аналогичным способом (патенты №№ 2354950, 2383000).

Таким образом, можно утверждать, что приведенные в данном пункте методы испытаний с нулевой скоростью ОИ могут применяться для автономных испытаний любой БА – в ближней, средней и дальней зоне. А приведенные источники ударного воздействия, если не смонтированы внутри стенда, также могут применяться и вне стендов, для создания ударного воздействия на других

конструкциях, например, опытных сборках частей конструкции КА, а также при испытаниях его отдельных систем.

1.3.5 Анализ и выбор оптимальных методов стендовых испытаний БА

Как упоминалось в пунктах 1.3.3, 1.3.4, для испытаний БА на действие ударных нагрузок от срабатывания пиросредств могут применяться различные методы, причем возможность применения методов зависит от параметров требуемого СУ, определяемых зоной близости к источнику воздействия. Это подтверждается рекомендациями зарубежных нормативных документов[2]. Обобщенная информация о возможности применения методов и их эффективности сведена в таблицу 4.

Таблица 4 – Эффективность методов испытаний с имитированием пироудара

Метод стендовых испытаний	Применимость метода для имитирования ударных нагрузок от пиросредств		
	в ближней зоне	в средней зоне	в дальней зоне
С ненулевой скоростью ОИ			
На вибростенде	–	–	О
Копровый стенд	–	–	О
Пневматический стенд	–	О	О
С нулевой скоростью ОИ			
Копровый стенд	Х	Х	Х
Пневматический стенд	Х	Х	Х
Пиротехнический стенд	Х	Х	Х

Примечание: «–» – применение метода невозможно; «О» – применение метода возможно, но имеются ограничения на создаваемое воздействие и/или габаритно-массовые

параметры БА, вызванное особенностями испытательного оборудования; «Х» – применение метода возможно без ограничений.

При отсутствии на предприятии испытательного оборудования для воспроизведения ударных нагрузок, имитирующих СУ в ближней и средней зоне, рационально разработать и использовать такое испытательное оборудование, которое может имитировать СУ в обеих зонах без ограничений на создаваемое воздействие или же габаритно-массовые параметры БА.

Исходя из этого, с учетом таблицы 4, целесообразно развивать либо копровые, либо пневматические, либо пиротехнические методы испытаний с использованием неподвижной платформы стенда, т.е. с нулевой скоростью ОИ.

При этом источники ударного воздействия, лежащие в основе стендов, могут быть использованы также для испытаний опытных сборок КА или систем КА.

1.4 Выводы

По результатам первой главы можно сделать следующие выводы:

- Отечественная нормативная база в части задания требований и отработки стойкости БА к ударным воздействиям от срабатывания пиросредств в высокочастотной области неоднозначна, недостаточно проработана, и в целом не соответствует современным требованиям. Рекомендуемые испытательные уровни нагрузок БА в обоих блоках стандартов не привязаны к эксплуатационному уровню нагрузок **на БА конкретного КА** через коэффициент запаса (не равный единице), что не позволяет эффективно проводить отработочные испытания БА.
- Сложившаяся практика отработки ударостойкости БА на отечественных предприятиях ракетно-космической отрасли в целом не соответствует современным требованиям. Широко применяемые методы испытаний

БА – копровые с ненулевой скоростью ОИ и на вибростендах, – не позволяют адекватно имитировать высокочастотные ударные нагрузки от срабатывания пиросредств в средней, и особенно в ближней зоне.

- По результатам обзора наиболее приемлемым методом испытаний БА на воздействие ударных нагрузок от срабатывания пиросредств являются стендовые испытания с созданием воздействия на неподвижную платформу стенда с ОИ, т.е. с нулевой скоростью ОИ.

Для совершенствования отработки ударной стойкости БА КА, была поставлена следующая цель работы: **разработать испытательное оборудование и методику испытаний БА КА к ударным воздействиям от срабатывания пиротехнических средств разделения.**

Для разработки оборудования необходимо определить требования, предъявляемые к нему. Поскольку подавляющее большинство БА КА имеет массу до 30 кг, а максимальный уровень СУ в средней зоне для типичных пиросредств в соответствии с отечественными и зарубежными стандартами составляет около 5000g на частотах 5000-10000 Гц, то в этих границах и была определена целевая область применения стенда.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработать испытательное оборудование для автономных испытаний БА КА массой до 30 кг на ударные пиротехнические нагрузки с уровнем СУ до 5000g на частоте свыше 5000 Гц, провести экспериментально-теоретическое исследование характеристик системы «Стенд с объектом испытаний-ударное устройство» для методического обеспечения испытаний БА на ударные пиротехнические нагрузки.
2. Разработать типовую программу и методику автономных испытаний БА КА на стойкость к ударному воздействию от срабатывания пиросредств на данном оборудовании.

**ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ,
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ «СТЕНД С ОБЪЕКТОМ
ИСПЫТАНИЙ/УДАРНОЕ УСТРОЙСТВО» ДЛЯ МЕТОДИЧЕСКОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ БА**

2.1 Обоснование выбора типа ударного устройства

В соответствии с результатами предварительного анализа (п.1.4), оптимальным вариантом стенда для проведения автономных испытаний БА на воздействие ударных нагрузок от срабатывания пиротехнических средств является стенд, состоящий из неподвижной платформы, на которой жестко закреплен ОИ, а источники ударного воздействия могут быть как закреплены на платформе, так и использоваться в мобильном переносном варианте.

При этом частотный состав получаемого СУ будет определяться геометрическими и физико-механическими параметрами платформы с ОИ, в то время как уровень СУ определяется энергией удара, т.е. физико-механическими и геометрическими параметрами ударного устройства и демпфирующей прокладки.

В составе стендов указанного вида наиболее распространено применение следующих типов источников воздействия (п. 1.3.4):

- Копровые;
- Пневматические;
- Пиротехнические.

Копровый стенд основан на моделировании ударного воздействия, полученного при взаимодействии ударника (молота копра) с платформой, т.е. на

стыке «металл-металл». Настройка энергии удара осуществляется через подбор значений параметров системы «стенд с объектом испытаний/ударное устройство», обеспечивающих:

- получение необходимой энергии удара. В этом случае к определяющим параметрам относятся масса копра, скорость соударения или высота подъема;
- трансформирование энергии удара в импульс перегрузки на стыке «металл-металл» определяется формой наконечника ударного стержня и физико-механическими и геометрическими параметрами упруго-механической прокладки.

В основе работы пневматического стенда лежит использование энергии сжатого воздуха для разгона металлического поршня, который в свою очередь взаимодействует с платформой (рисунок 12). Таким образом, используется достаточно сложное по конструкции ударное устройство, в котором для подбора требуемых характеристик удара варьируются следующие параметры системы «стенд с объектом испытаний-ударное устройство»:

- параметры, обеспечивающие необходимую энергию удара для создания заданной скорости ударного поршня в момент соударения с платформой. К ним относятся параметры газовой среды – температура, состав и давление газа, параметры «ствола», в котором происходит разгон поршня;
- параметры, определяющие взаимодействие на стыке «металл-металл», такие как форма наконечника и физико-механические и геометрические параметры механической прокладки.

Пиротехнические стенды можно условно разделить на два типа. Первый тип использует для создания удара взрывчатый материал различного типа (пирошнур, пластит, листовое взрывчатое вещество), непосредственно контактирующий с платформой, на которой установлен ОИ, как это показано на

рисунке 13. Стенды второго типа используют для создания ударных нагрузок одно или несколько комбинированных устройств – пиротехнических ударников (пироударников). Каждый пироударник состоит из источника энергии – пороховой навески, при инициировании которого приводится в движение примыкающий к камере сгорания металлический ударный стержень. Разгоняясь по стволу пироударника, стержень на срезе ствола взаимодействует с упруго-пластической механической прокладкой, и создает ударное воздействие на стыке с платформой стенда, на которой установлен ОИ.

Очевидно, что пиротехнические стенды первого типа, хотя и могут использоваться для испытаний БА на пироудар в ближней зоне, в целом менее удобны в эксплуатации, чем пиротехнические стенды второго типа, ввиду следующих причин:

- стенды первого типа содержат меньшее количество варьируемых параметров ударного устройства (вес заряда, место установки на платформе и прокладка между зарядом и платформой стенда), обусловленное более простой конструкцией, что ограничивает настройку стенда и дополнительно требует разработку защитных устройств от продуктов взрыва. Кроме этого, рабочее место, где проводятся испытания с использованием взрывчатых веществ, должно быть аттестовано на взрывобезопасность и обслуживаться обученным персоналом;
- в составе стенда второго типа стендовые пироударники (далее – СПУ) можно использовать как мобильные устройства, которые расширяют область применения стенда благодаря появлению возможности одновременного срабатывания нескольких СПУ, расположенных в различных местах платформы стенда и создающих одновременное воздействие вдоль требуемых осей.

- обслуживание стенда первого типа может быть более дорогим и опасным ввиду использования специфических комплектующих (например, взрывчатого материала и средств подрыва);

Таким образом, выбор оптимального стенда для проведения автономных испытаний БА проводится из трёх вариантов: пневматический, копровый, пиротехнический второго типа.

Пиротехнический стенд второго типа является более предпочтительным вариантом по следующим причинам:

- использование типовых строительных пиросредств для создания ударных нагрузок является более дешевым по затратам, делает стенд более удобным и легким в настройке, чем копровый и пневматический стенды;
- использование нескольких СПУ значительно расширяет возможности стенда, так как позволяет моделировать многокомпонентное ударное нагружение; кроме этого мобильные пироударники могут применяться для возбуждения ударных нагрузок не только в составе стенда, но и при испытаниях опытных сборок, или частей конструкции КА/систем КА.

Следует отметить, что затраты при испытаниях на пиротехническом стенде являются относительно низкими, сопоставимы с затратами на испытания на пневматическом стенде, и обходятся лишь немногим дороже копровых испытаний.

Ввиду указанных причин оптимальным стендом для испытаний БА на ударные нагрузки от срабатывания пиросредств является **пиротехнический стенд с неподвижным ОИ, использующий в качестве источника воздействия мобильные стендовые пиротехнические ударники..**

Такой стенд был разработан и создан в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»[56].

2.2 Состав стенда

Общий вид стенда представлен на рисунке 15.

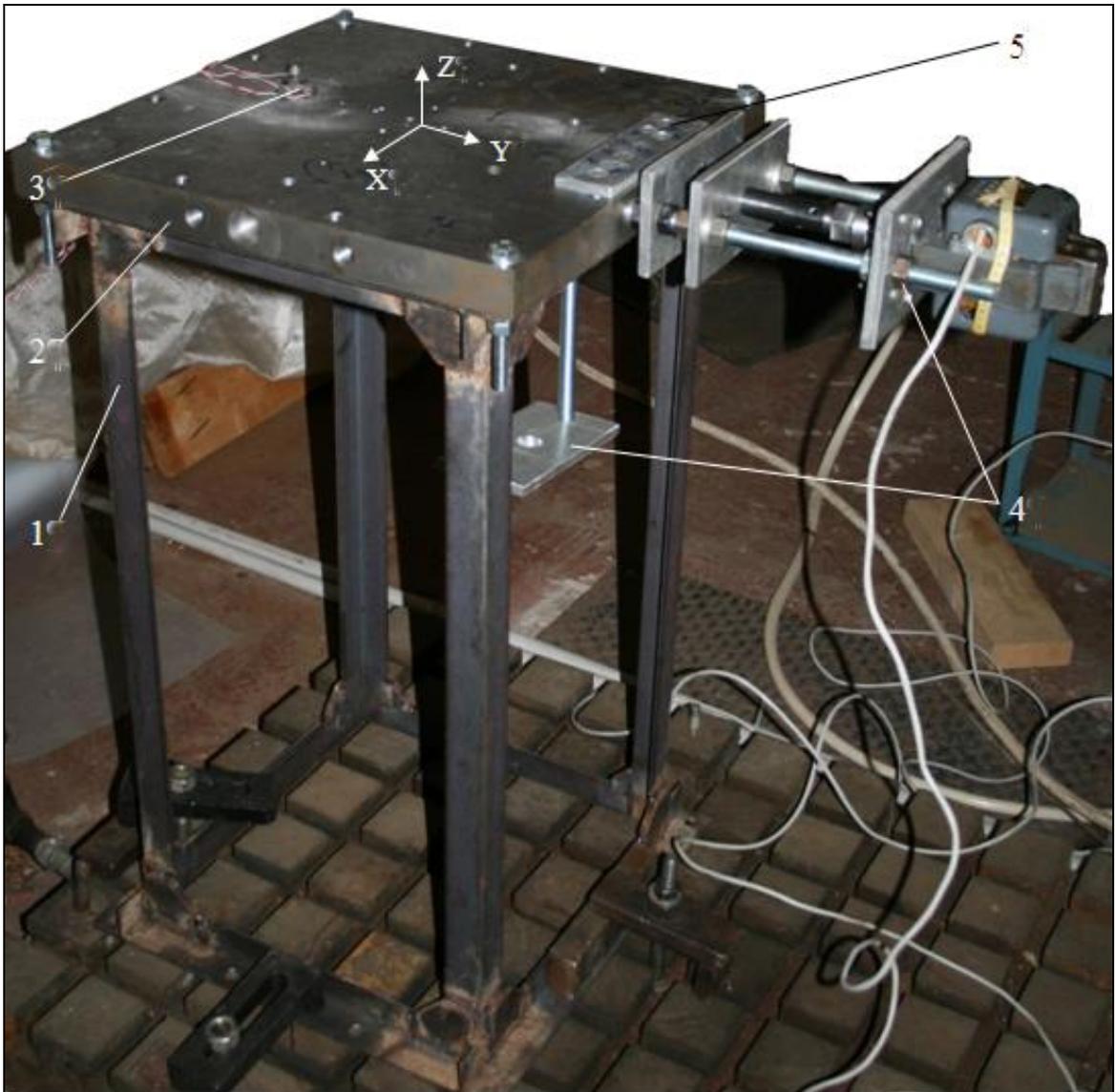


Рисунок 15 – Общий вид стенда

Стенд состоит из следующих основных частей:

1 – опора стенда, 2 – платформа стенда, 3 – розетка из 3-х измерительных датчиков ускорения, 4 – источники локального ударного нагружения (пироударники), 5 – демпфирующая упруго-пластическая металлическая проставка.

2.2.1 Платформа стенда

Платформа является основанием, на котором непосредственно, с помощью болтовых соединений, или опосредованно с использованием технологической оснастки, размещается и закрепляется ОИ. При испытаниях на платформе жестко прикреплены одна или две розетки из 3-х ударных акселерометров, также к ней крепятся СПУ.

В стенде используется две платформы – одна основная и другая – сменная. Дополнительные платформы также могут быть изготовлены для расширения технических возможностей испытаний.

Основная платформа представляет собой металлический параллелепипед размерами 440*440*40. Материал платформы – сталь 45. Сменная платформа из стали 45 имеет размеры 440x440x20.

Основная платформа может быть закреплена к опорной раме стенда болтами в количестве от 3 до 12 штук, которые определяют граничные условия платформы: защемление, опирание и свободные на её различных краях. Точечное закрепление платформы осуществляется при помощи втулок и прокладок, устанавливаемых на болтах между платформой и рамой. Сменная платформа может устанавливаться как вместе со штатной, так и вместо неё. Способы взаимного расположения и закрепления дополнительной платформы оказывают существенное влияние на параметры получаемого при испытаниях СУ и могут применяться для коррекции формы СУ (3.4).

Для закрепления ОИ и пиродударников к платформам используются болты и шпильки, отверстия под которые при необходимости изготавливаются в процессе подготовки к испытаниям.

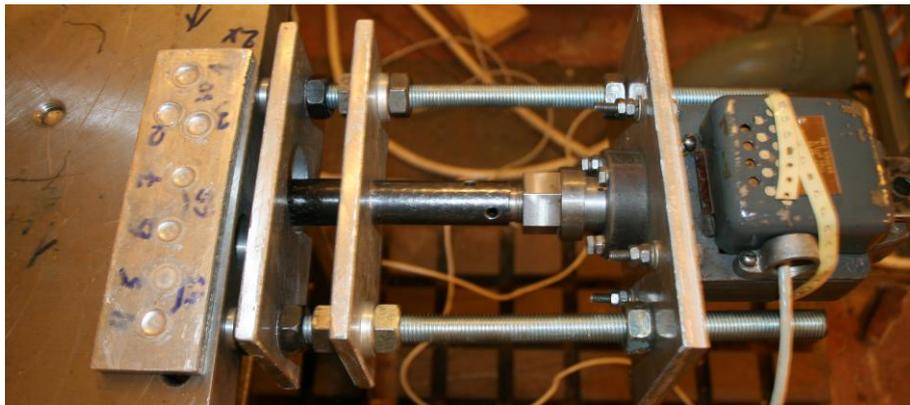
2.2.2 Пироударники стенда

В составе стенда предусмотрены два различных типа пироударников: мобильный пироударник на основе модернизированного строительного пистолета ПЦ-84 (МПУ) и мобильный стендовый пироударник (СПУ).

Внешний вид пироударников приведен на рисунке 16. Источником энергии удара являются широко распространенные пиротехнические патроны для строительных (монтажных) пистолетов, выпускающиеся в ассортименте Д1-Д5, где Д1 соответствует наименее мощному патрону, Д5 – наиболее мощному.



а



б



в

Рисунок 16 – общий вид МПУ (а), СПУ(б), пиротехнических патронов (в)

Основное отличие пиродарников разных типов состоит в том, что МПУ приводится в действие вручную, путём спуска курка пистолета, в то время как СПУ монтируется к стенду, и инициирование СПУ проводится дистанционно, что обуславливает преимущества его использования перед МПУ. Для стенда было изготовлено 2 СПУ.

Конструкция СПУ и схема работы

Принципиальная схема СПУ представлена на рисунке 17.

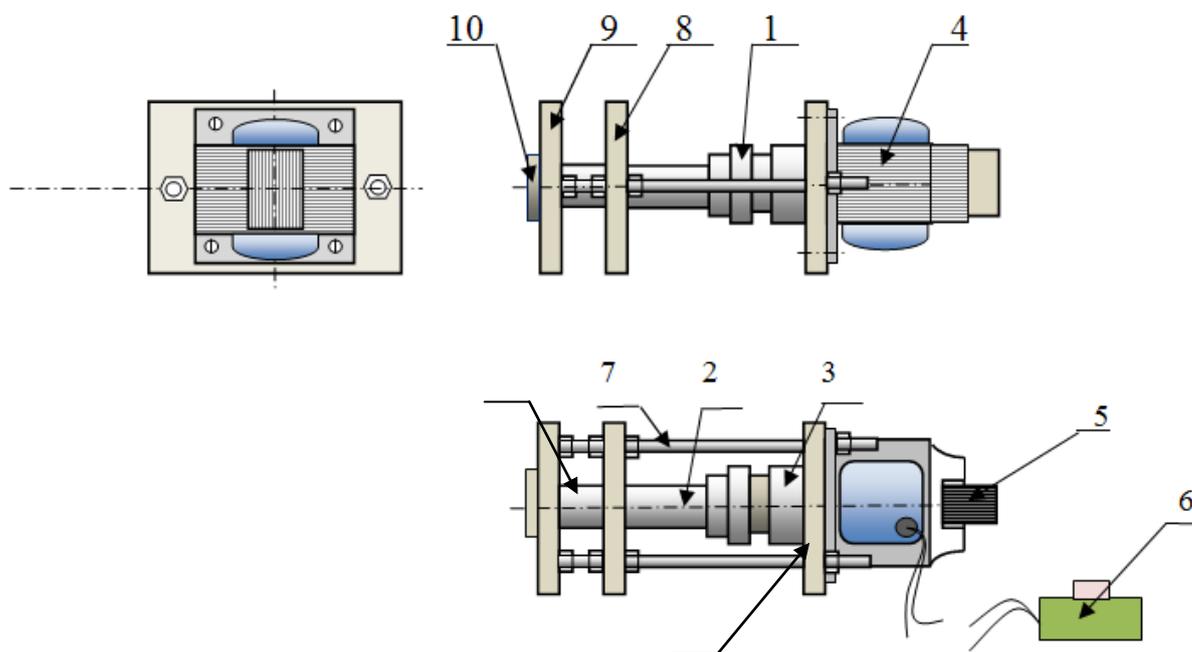


Рисунок 17 – Общий вид СПУ

На рисунке 17 показаны следующие части СПУ:

1 – рабочая камера; 2 – ствол калибра 14,5 мм, внутри которого находится поршень с наконечником 11; 3 – втулка; 4 – электромагнит с подвижным якорем 5 и пультом включения 6, составляющие систему инициирования.

Технологическая оснастка для крепления СПУ к платформе стенда состоит из двух шпилек 7 М16х1,5 длиной 200 мм, планки 8 для крепления ствола

ударника, прижимной планки 9 для фиксации набора прокладок 10 из резины и упруго-пластического материала, планки для установки электромагнита 12.

Набор прокладок 10 не входит в состав СПУ, приведен для отражения взаимного положения частей системы «стенд с объектом испытаний/ударное устройство» при испытаниях. Более подробно информация о прокладке приведена в пункте 2.2.3.

Созданное устройство СПУ отличается от приведенного в запатентованном АО «ИСС» способе испытаний №2386939 по сути тем, что применяется специализированный электромагнит для инициирования удара, а также типом применяемого пиросредства, в качестве которого выступает стандартный патрон от строительного пистолета из ассортимента Д1-Д5.

Работа с СПУ включает следующие операции:

- сборка СПУ с заданным типом патрона из ассортимента Д1-Д5, установка СПУ на стенде;
- проведение ударных испытаний с использованием СПУ;
- внешний осмотр и, при необходимости, перезарядка устройства.

Инициирование СПУ проводится путём подачи управляющего сигнала с пульта 6 на электромагнит 4 (рисунок 17), при этом пульт с сигналом находится в отделённом от испытательной камеры помещении, для обеспечения безопасности персонала при работе с пиротехническими устройствами.

При параллельном соединении электрических цепей от двух СПУ инициирование осуществляется по аналогичной схеме.

Конструкция МПУ и схема работы

Принципиальная схема МПУ представлена на рисунке 18.

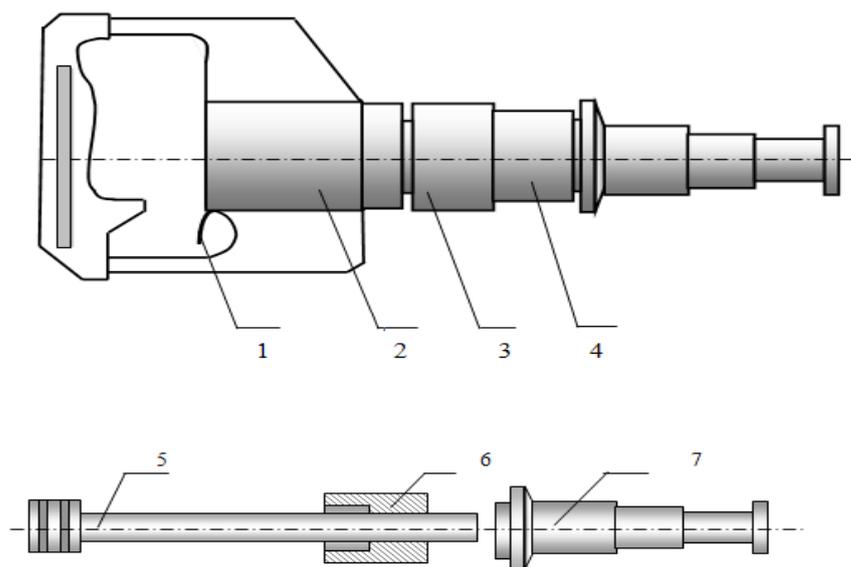


Рисунок 18 – Общий вид и схема МПУ

В состав МПУ входят: 1 - курок; 2 поворотная муфта; 3 - патронник; 4 - ствол; 5 - поршень; 6 – втулка; 7 – наконечник.

В основе МПУ лежит модернизированный пистолет ПЦ 84 – однозарядный, ручной монтажный инструмент с поршневым принципом забивки дюбеля за счет использования энергии расширяющихся пороховых газов. Для моделирования ударного импульса ПЦ 84 применяется без устройства установки дюбеля и системы торможения с использованием системы инициирования патрона и поршня, который разгоняется на участке 45мм и далее происходит его торможение за счет сопротивления материала прокладки, установленной на платформе ударного стенда или на силовом шпангоуте испытуемой конструкции. При этом ударная нагрузка в местах крепления приборов и оборудования регулируется при помощи подбора уровня мощности промышленных патронов (КЗД, КАД, Д1, Д2, Д3, Д4, Д5) и параметров демпфирующих прокладок из различных материалов.

Работа с МПУ включает следующие операции:

- подобрать патрон необходимой мощности;

- повернуть муфту по отношению к рукоятки против часовой стрелки и выдвинуть её вперед;
- раскрыть пистолет, повернув муфту по оси, и вставить в патронник ствола патрон;
- закрыть пистолет плавным движением, сохраняя наклонное положение ствола направителем вниз;
- занять устойчивое положение и установить пистолет под прямым углом к поверхности платформы в точке нагружения и оттянуть спусковой курок;
- провести ударное испытание с использованием МПУ;
- провести внешний осмотр и перезарядку устройства.

Для перезарядки устройства следует выполнить следующие операции:

- раскрыть пистолет, при этом произойдет выдвижение стреляной гильзы из патронника;
- установить новый патрон и закрыть пистолет.

2.2.3 Демпфирующая прокладка

Демпфирующая прокладка является элементом, преобразующим кинетическую энергию поступательного движения ударного стержня СПУ или МПУ в энергию высокочастотного удара, соответствующую удару от срабатывания пиросредств в ближней зоне. В качестве прокладки обычно используется прямоугольная пластина из сплава АМг3 размерами 50x120x8 мм, из которых определяющими параметрами для получаемого удара являются её толщина и материал.

Прокладка также может быть изготовлена из резины с большим модулем упругости, а также представлять собой комбинацию резины с металлом.

2.2.4 Система регистрации и обработки данных

Измерительная система стенда является основным инструментом для оценки создаваемого ударного воздействия. В состав системы регистрации и обработки данных входят одноосные датчики-акселерометры, сгруппированные в две розетки из 3х взаимно-перпендикулярных датчиков, анализатор спектра и ПК с установленным соответствующим программным обеспечением. Розетки крепятся к платформе через резьбовое соединение.

Основные характеристики системы регистрации и обработки данных приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики системы регистрации и обработки данных

Наименование параметра (характеристики)	Единица измерения	Значения	Допустимые отклонения,
Количество акселерометров PCB Piezotronics 350C02	шт	6	
Чувствительность датчиков	мВ/g	0,1	согласно паспортам датчиков
Частотный диапазон измерений	Гц	4÷25000	
Количество каналов анализатора	шт	8	

Примечание. В качестве дополнительных средств измерения могут использоваться анализаторы типа 2034, PULSE фирмы «Брюль и Кьер».

Измерения ударных нагрузок датчиками-акселерометрами имеет определенные недостатки. При проведении испытаний на СУ, соответствующий нагрузкам в ближней, а иногда и в средней зоне, неправильно выбранные акселерометры могут выйти из строя, перегрузиться при ударном воздействии, также неправильно настроенные формирователи и преобразователи сигналов могут «зашкалить» при существенном возбуждении резонансных частот

акселерометров. Полученные в результате этого данные будут неинформативными.

Эту проблему можно легко избежать при использовании акселерометров, чья резонансная частота существенно превышает частотный диапазон измеряемого пиродара, как минимум в 5 раз [2]. Частотные диапазоны ударных нагрузок с существенными уровнями СУ при пиродарах в разных зонах приведены в п. 1.1.2.

Применяемые в стенде датчики РСВ 350С02 имеют резонансную частоту выше 100 кГц [63], что теоретически позволяет проводить измерения в частотном диапазоне от 4 Гц до 20-25 кГц, покрывающую требуемый частотный диапазон для любого вида удара при испытаниях БА.

Однако при испытаниях необходимо учесть следующую особенность: ударное возбуждение является процессом, распространяющимся по конструкции платформы стенда во всех направлениях. В связи с этим наиболее полная информация об ударном нагружении ОИ может быть получена при анализе вектора ударных нагрузок, т.е. огибающей СУ по трём ортогональным направлениям. Для этого датчики стенда объединены в розетки-переходники по 3 датчика, проводящих измерения в 3х взаимно-перпендикулярных направлениях. Розетка-переходник представляет собой металлический кубик, соединяющийся с платформой стенда через резьбовое соединение, и имеющий отверстия для закрепления трёх акселерометров в трёх взаимно-перпендикулярных направлениях.

Наличие переходника оказывает влияние на форму СУ, ввиду того, что собственная частота розетки-кубика попадает в диапазон частот измерений 100-10000 Гц. Это подтверждается формой СУ, представленного на рисунке 19, полученного при возбуждении колебаний ударным частотным молотком.

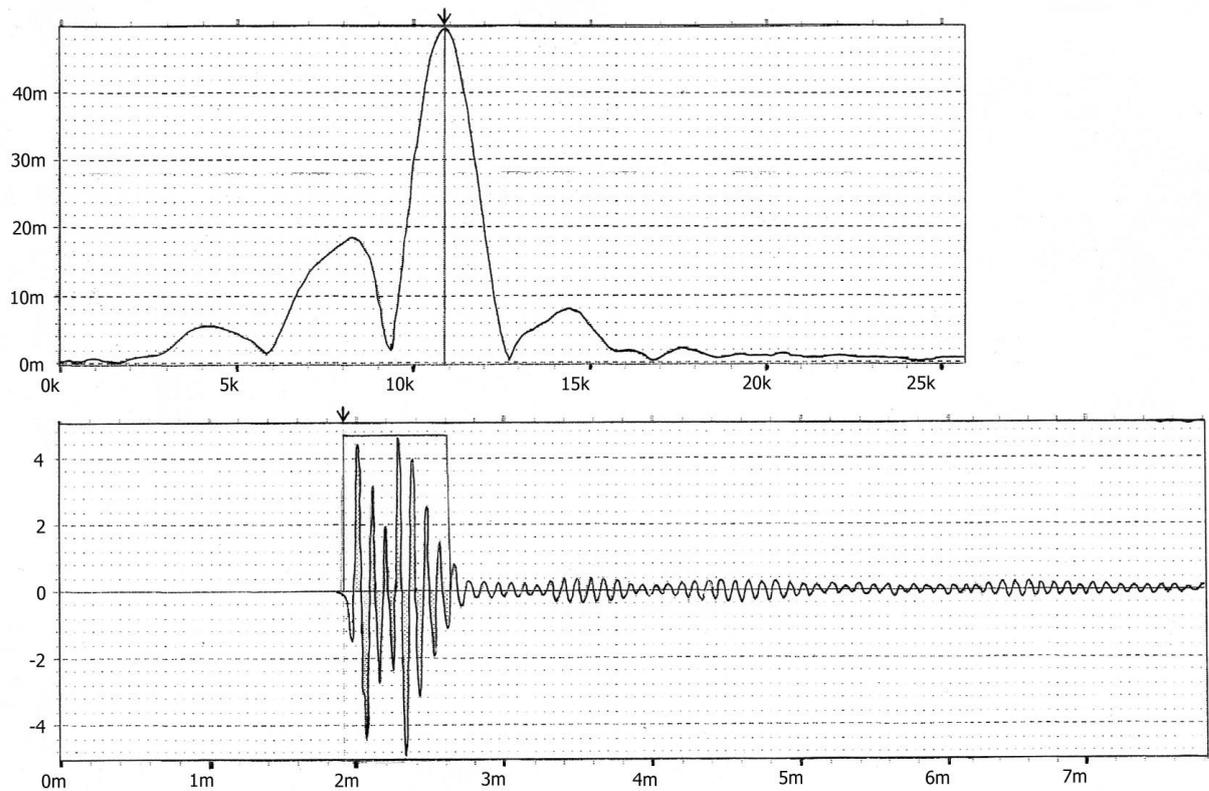


Рисунок 19 – Спектр удара и осциллограмма свободных колебаний розетки от воздействия ударного молотка

Как видно из рисунка 19, в частотном диапазоне 7000-9000 Гц акселерометры регистрируют повышенный отклик, обусловленный именно резонансной частотой металлической розетки.

Таким образом, при проведении измерений на стенде с использованием данных розеток из 3х датчиков необходимо учитывать, что уровни СУ, зарегистрированные в частотном диапазоне ~7000-10000 Гц, не отражают реально воздействующие на платформу с ОИ нагрузки, что должно быть учтено при оценке полученного при испытаниях СУ на соответствие заданным требованиям.

Для учёта этой особенности при воспроизведении требуемого СУ должно быть дополнительно скорректирована верхняя граница поля допуска СУ в высокочастотной области (см. п. 3.2.2).

2.3 Экспериментально-теоретическое исследование характеристик системы «стенд с объектом испытаний-ударное устройство» для обеспечения испытаний БА на воздействие ударных пиротехнических нагрузок

При проведении испытаний БА на стенде моделируется режим нагружения в форме СУ. При этом к воспроизводимому СУ предъявляются требования как к амплитудным значениям виброударного процесса, так и к его частотному составу.

Для обеспечения проведения испытаний БА на созданном стенде необходимо исследовать влияние варьируемых параметров системы «Стенд с объектом испытаний/ударное устройство» на характеристики получаемого удара: амплитуду виброудара и форму СУ [57].

Как было указано ранее в п. 1.3.4, частотные характеристики получаемого СУ при данном методе стендовых испытаний определяются параметрами платформы, в то время как амплитуда виброудара определяется параметрами пироударника и демпфирующей прокладки. Таким образом, исследуемые факторы можно разделить на две группы: влияющие на характерные частотные характеристики виброударного процесса в окрестности крепления БА к платформе стенда, и влияющие на амплитуду удара (уровень СУ) и время действия.

Возможные варьируемые параметры системы «стенд с объектом испытаний/ударное устройство» представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Варьируемые параметры системы

Определяющие форму СУ	Определяющие амплитуду виброудара (уровень СУ) и время действия
Размеры a,b,h платформы стенда	Мощность патрона пироударника
Материал платформы стенда	Форма наконечника стержня

<p>Вид закрепления платформы (граничные условия) Вес ОИ</p>	<p>Объем камеры сгорания и путь разгона стержня Материал и толщина упругопластической проставки</p>
---	---

В качестве исследуемой рассматривается система виброударного стенда, представленная на рисунке 20.

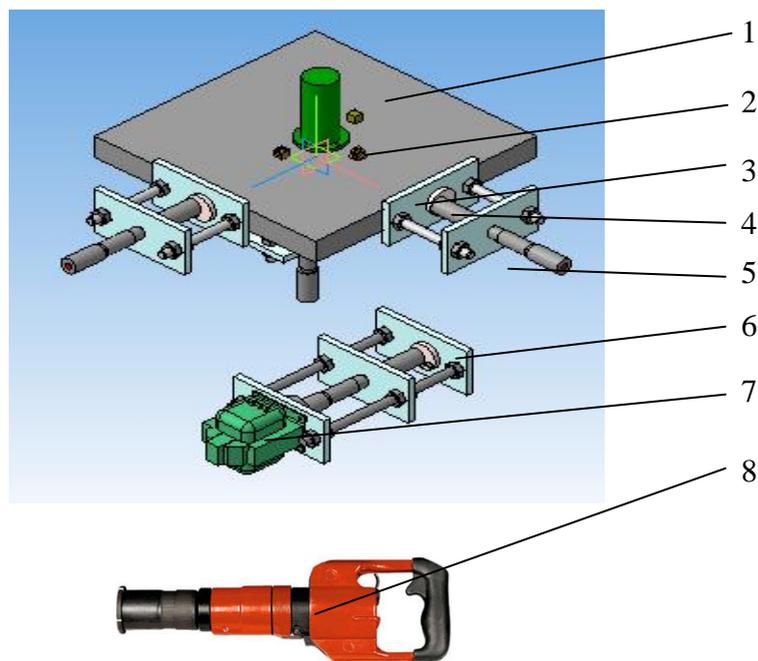


Рисунок 20 – Общий вид системы ВС

На рисунке 20 указаны следующие компоненты системы: 1 – платформа стенда, 2 – розетка акселерометров, 3 – демпфер, 4 – ствол СПУ с ударником, 5 – пробка с электрокапсьюльным воспламенителем, 6 – СПУ с патронами Д1-Д5, 7 – электромагнит системы инициирования патрона, 8 – МПУ

2.3.1 Исследование факторов, влияющих на форму спектра удара

Рассмотрим систему «стенд с объектом испытаний/ударное устройство». Данную систему можно представить в виде линейно-упругой колебательной

модели. При импульсном ударном нагружении реакция модели в различных точках определяется собственными частотами и формами колебаний.

Цель исследований – определение параметров модели, которые реализуют собственные частоты системы, отвечающие требованиям к характерным частотным составляющим заданного в техническом задании или программе испытаний СУ.

Проведем расчетную оценку собственной частоты платформы стенда в зависимости от её геометрических параметров, вида закрепления, физико-механических свойств материала и веса прибора БА по методике, изложенной в работе [64]. Основная собственная частота пластины рассчитывается методом Релея-Ритца по формуле:

$$f = \frac{k_m k_b c h 10^4}{a^2}, \text{ Гц} \quad (2.1)$$

где k_m - поправочный коэффициент для материала пластины по отношению к стали,

$$k_b = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{Q_i}{Q_p}}} - \text{ поправочный коэффициент, учитывающий}$$

присоединенный вес испытываемого оборудования, h – толщина пластины, a –

величина максимальной стороны пластины, $c = \frac{\theta}{2\pi} \sqrt{\frac{Eg}{12(1-\gamma^2)\rho}}$, где θ –

коэффициент, зависящий от способа закрепления сторон пластины и отношения сторон пластины ($k=b/a$ – отношение сторон) [64], E – модуль упругости, γ – коэффициент Пуассона, ρ – плотность материала пластины, Q_p – вес пластины, Q_i – вес оборудования.

Дополнительно также оценим частоты продольных колебаний в плоскости пластины по формулам:

$$f_a = \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad f_b = \frac{1}{2b} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2.2)$$

где a, b - стороны пластины.

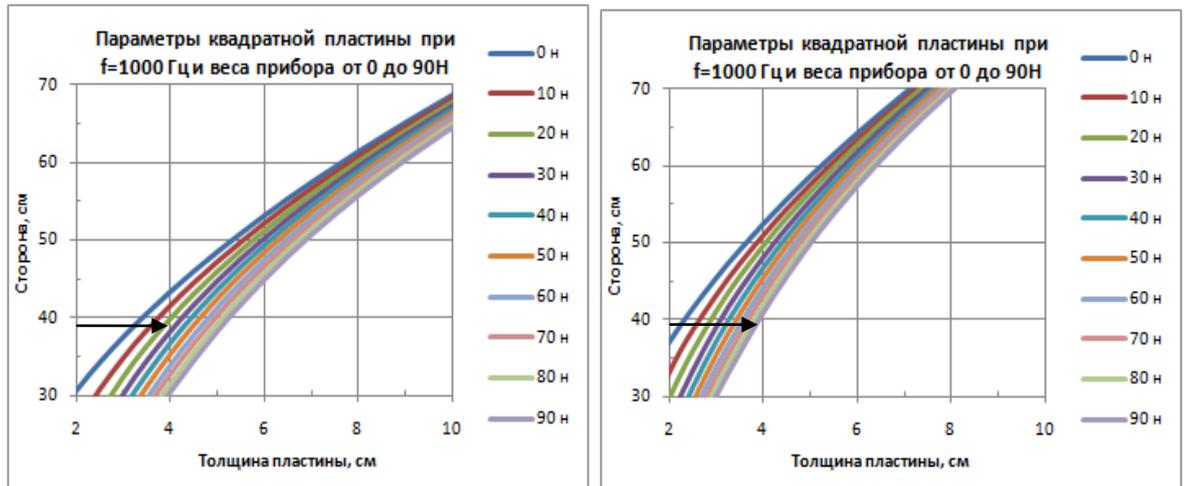
Для оценочных расчетов оптимальных параметров системы «Стенд с объектом испытаний/ударное устройство» при заданных характерной частоте СУ и весе прибора уравнение (2.1) разрешим относительно величины большей стороны a пластины

$$a = \sqrt{-\frac{Q_i}{2h\rho k} + \sqrt{\frac{Q_i^2}{4h^2\rho^2k^2} + \frac{c^2h^2k_m^210^8}{f^2}}} \quad (2.3)$$

При заданных характерных частотах СУ (f), весе (Q_i) и габаритах (a_0, b_0) объекта испытаний в плоскости платформы уравнение (2.3) определяет область четырех параметров (a, h, k_m, c), в пределах которых методом итераций и перебора решается задача оптимизации их значений. Классическое определение экстремума функционала затруднено, так как отсутствует аналитическое выражение для параметра c .

Для расчета по формуле (2.3) была составлена программа на языке VBA EXCEL. Программа содержит также таблицы коэффициентов c для различных граничных условий [41] и механических свойств материалов. В результате расчетов на диалоговое окно выводятся основные частоты пластины, а на лист 1 – серия табличных и графических форм для заданной частоты СУ, граничных условий и веса прибора.

На рисунке 21 представлены примеры расчета оптимальных параметров пластины стенда при различном весе испытываемых приборов и граничных условиях. Начальные величины сторон платформы предварительно выбираются исходя из площади, занимаемой узлами крепления макета прибора. Семейство данных кривых, рассчитанных для определенной частоты точки перегиба СУ, определяется в качестве **тарировочных зависимостей**.



а)

б)

Рисунок 21 – Тарировочные зависимости при $f=1000$ Гц для двух случаев закрепления пластины: а) опирание по контуру, б) 2 стороны-опирание, 2 – заземление

Подобные тарировочные зависимости могут быть получены из созданной программы для различных схем закрепления платформы (21 вариант) и материалов пластины (предварительно отобраны 2 рабочих варианта материала).

На основе тарировочных зависимостей была создана база данных параметров стенда, которые применяются для подбора оптимальной конфигурации и способа крепления платформы стенда при испытаниях конкретной БА.

Для основной платформы созданного стенда $440 \times 440 \times 40$ и определенных на рисунке 21 тарировочных зависимостях стрелочками отмечены линии, определяющие возможность реализации нагрузок на основной платформе стенда при данных граничных условиях закрепления и необходимой характерной частоте. В случае заземления краев основная собственная частота составляет 1.7 кГц. На рисунке 21,а для прибора весом 30Н собственная частота 1.0 кГц системы достигается при условиях свободного опирания контура платформы толщиной 50 мм, а при граничных условиях на рисунке 21,б необходимая толщина пластины составит 35 мм.

Аналогичные оценки можно получить, фиксируя ту или иную варьируемую величину на рисунках 21 и 22.

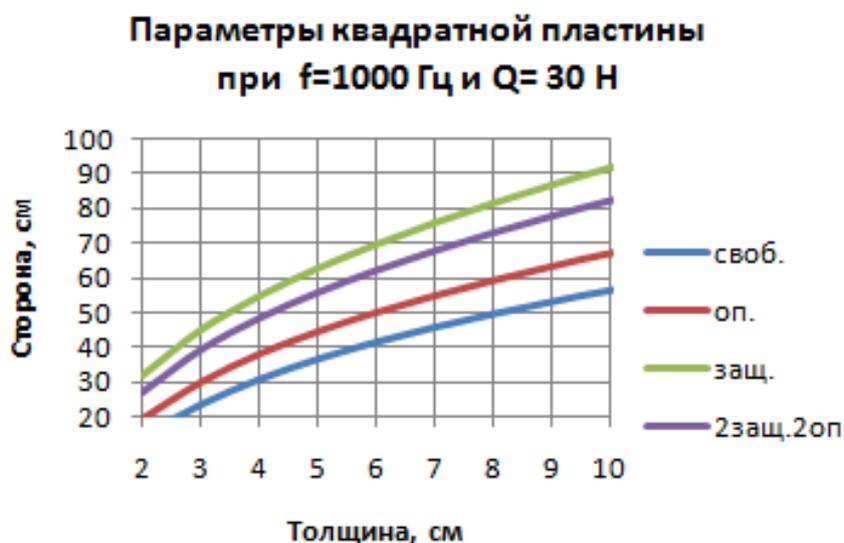


Рисунок 22 – Тарировочные зависимости для квадратной пластины для разных видов закрепления

Для более сложных граничных условий пластины стенда (точечные опоры) и случая одновременного испытания группы приборов, приведенная методика применяется с использованием решений, изложенных в работах [65, 66].

Полученные зависимости характеризуют влияние отдельных параметров на форму получаемого СУ.

Из рисунков 21 и 22 можно сделать следующие выводы:

1. Основная частота собственных колебаний системы «Стенд с объектом испытаний/ударное устройство» уменьшается с увеличением веса прибора. Если для существующего ВС собственная частота получается завышенной, то уменьшить частоту можно за счет установки на платформу дополнительной массы. В противном случае используются накладные съемные пластины или изготавливается новая плита.
2. Начальное значение параметров системы оценивается из анализа предварительно полученного набора расчетных данных в форме

параметрических графиков, далее значения уточняются результатами расчета и подтверждаются частотными испытаниями с ОИ или его габаритно-массовым макетом.

2.3.2 Исследование факторов, влияющих на амплитуду виброудара

При анализе ударных процессов практический интерес представляют величина максимальной контактной силы (перегрузки соударяющихся тел) и длительность переднего фронта ударного импульса. Для оценки этих параметров была разработана инженерная методика [41], основанная на результатах измерения остаточной деформации упруго-пластического демпфера. В нашем случае для расчета взаимодействия ударника с упруго-пластическим демпфером принимается, что материал демпфера – идеально пластический и характеризуется единственным параметром – пределом текучести. При относительно больших пластических деформациях это допущение приводит к погрешности не более 10 %. При расчете волновые эффекты в стержне не учитываются.

Процесс взаимодействия ударника с тормозным устройством описывается уравнением:

$$m \frac{dv}{dt} = -p(t), \quad (2.4)$$

где m - масса ударника, v – скорость удара, $p(t)$ - сила в месте контакта ударника с тормозным устройством. Задача является физически и геометрически нелинейной, поэтому в общем случае, как правило, решается численным методом.

Для ударника с плоским торцом можно получить аналитическое решение в форме:

$$V_0^2 = 2 \cdot y_{\max} Q_0, t_a = \frac{V_0}{Q_0} \quad (2.5)$$

где V_0 – начальная скорость удара стержня, $Q_0 = \frac{\pi \sigma_T g a_n^2}{m}$ – правая часть уравнения (2.5) для стержня с плоским торцом, σ_T – предел текучести материала демпфера, a_n – радиус стержня, m – масса стержня,

Для выбранной скорости удара относительная погрешность по известной методике определяется по соотношению:

$$\varepsilon_{v_0} = \frac{1}{V_0} \sqrt{\left(\frac{\partial V_0}{\partial a_n}\right)^2 \Delta a_n^2 + \left(\frac{\partial V_0}{\partial y_{\max}}\right)^2 \Delta y_{\max}^2} \quad (2.6)$$

где Δa_n , Δy_{\max} – доверительные интервалы погрешности измерений радиуса и глубины кратера.

Для других форм торца поверхность наконечника ударника предварительно аппроксимируется при помощи кусочно-линейной функции.

Принятая кусочно-линейная аппроксимация поверхности ударника позволяет построить эффективный численный алгоритм расчета взаимодействия для различных форм наконечника ударника. Для k -го конического участка ударника в процессе внедрения правая часть уравнения движения стержня имеет вид:

$$Q_k = Q_0 \left\{ \begin{array}{l} \cos f_1 \left(\frac{a_1^2}{a_n^2} \right) + \sum_{i=2}^{k-1} \cos f_i \left(\frac{a_i^2 - a_{i-1}^2}{a_n^2} \right) + \\ + \cos f_k \left(\left[\frac{a_{k-1}}{a_n} + \frac{(y - \sum_{m=1}^{k-1} h_m \operatorname{ctg} f_k^2)}{a_n} \right]^2 - \frac{a_{k-1}^2}{a_n^2} \right) \end{array} \right\} \quad (2.7)$$

где f_k – угол k -го конического участка, a_k – радиус основания k -го конического участка, h_k – высота k -го конического участка аппроксимации,

y – перемещение ударника. Из общей формы правой части уравнения выделим два частных случая, имеющие практическое значение:

- плоский наконечник ударника $Q_1 = Q_0$;
- наконечник с фаской h_1 на плоском торце

$$Q_k = Q_0 \left\{ \left(\frac{a_1^2}{a_n^2} \right) + \cos f_1 \left(\left[\frac{a_1 + y \operatorname{ctg} f_1}{a_n} \right]^2 - \frac{a_1^2}{a_n^2} \right) \right\} \text{ при } y < h_1$$

$$Q_k = Q_0 \left\{ \left(\frac{a_1^2}{a_n^2} \right) + \cos f_1 \left(1 - \frac{a_1^2}{a_n^2} \right) \right\} \text{ при } y \geq h_1 \quad (2.8)$$

Для расчета параметров удара при различных вариациях параметров была составлена диалоговая программа на VBA Excel. На лист Excel выводятся: максимальное ускорение в точке удара, время активной фазы нагружения и величина остаточной деформации демпфера.

С помощью указанной программы проведено исследование влияния формы наконечника на глубину кратера в упруго-пластическом демпфере.

На рисунке 23 представлены результаты расчета глубины кратера в упруго-пластическом демпфере при различных скоростях удара и форме наконечника ударника.

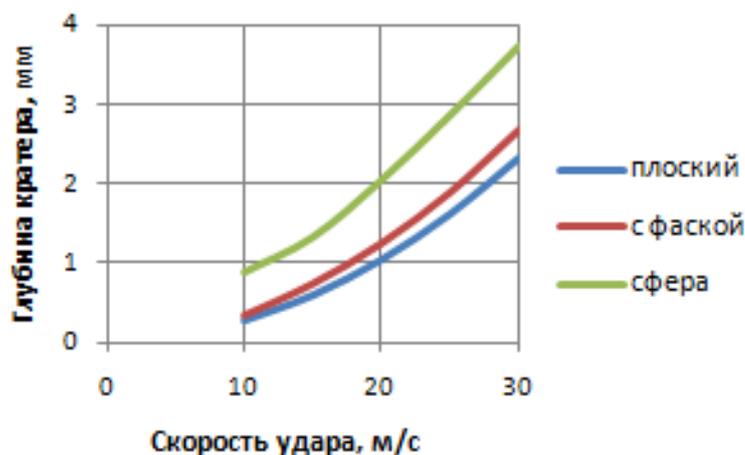


Рисунок 23 – зависимость глубины кратера от скорости удара для различных форм наконечника

Из рисунка 23 видно, что при переходе от плоской формы к сферической через коническую увеличивается глубина кратера, также увеличивается время процесса взаимодействия ударника с преградой. Для случая шарового сегмента время взаимодействия в 1,5-2 раза превышает время для случая плоского наконечника и наконечника с фаской. Соответственно, характерная частота спектра удара в случае шаровой формы наконечника ниже, чем в других вариантах, ее проще «поместить» в диапазон до 10000 Гц, что необходимо для того, чтобы имитировать пироударное нагружение в средней, и тем более дальней зоне. Амплитуда удара также выше, что однозначно характеризуется глубиной кратера.

Параметры удара в точке воздействия стержня приведены на рисунке 24.

Влияние фактора объема камеры сгорания проявляется в том, что при увеличении камеры путём сдвига стержня по стволу в сторону пластины происходит уменьшение начального давления в камере, что одновременно сопровождается уменьшением пути разгона стержня в стволе, в результате чего уменьшается скорость ударника, и, как следствие, амплитуда виброудара.

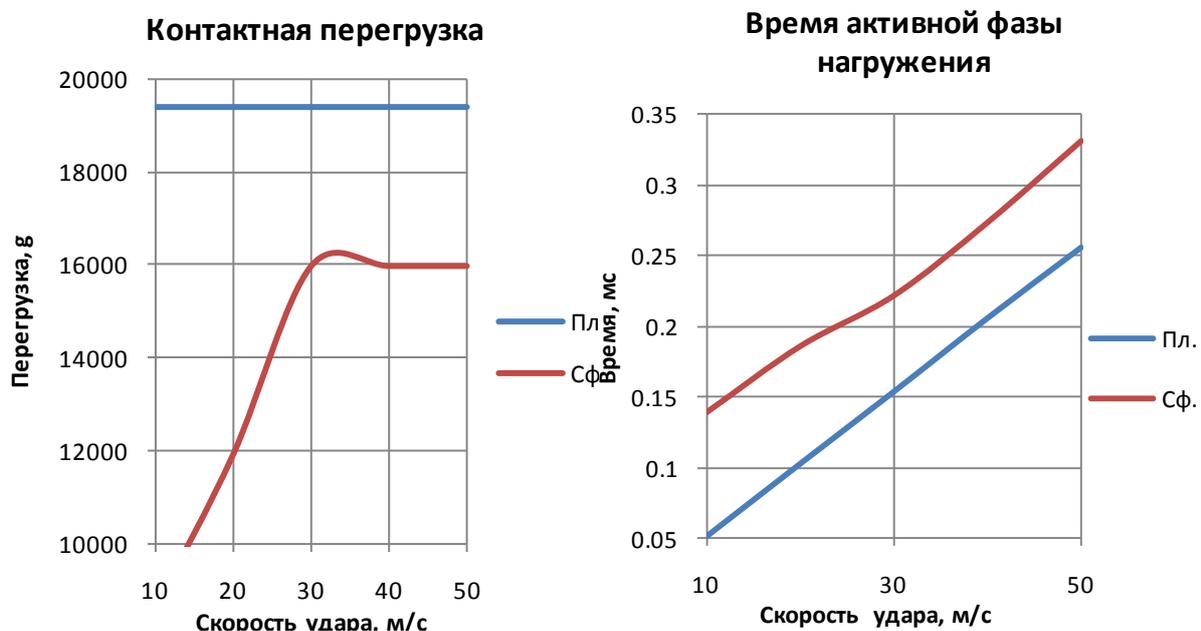


Рисунок 24 – Амплитуда и время удара для двух вариантов формы наконечника – плоского (пл.) и сферического (сф.)

Влияние фактора мощности патрона влияет исключительно на начальную скорость ударника. Увеличение скорости на 20% незначительно (на 3-5%) увеличивает время взаимодействия, и значительно (на 10-20%) увеличивает глубину кратера. Т.е. мощность патрона существенно влияет на амплитуду удара.

2.3.3 Одновременное срабатывание нескольких СПУ и его влияние на получаемый СУ

При одновременном применении двух и более СПУ происходят виброударные колебания, оказывающие влияние и на уровень, и на форму создаваемого СУ.

Опыт испытаний показал, что при одновременной работе двух возбудителей по осям Z и Y (рисунок 15), СУ, как правило, заметно не увеличивается по отношению к случаю, если действует только один из них – по оси Z. В ряде случаев наблюдалось даже уменьшение составляющих СУ.

Причинами этого явления могут быть следующие:

Пусть $x_1(t)$ – ударный импульс, возбуждаемый только первым источником, $x_2(t)$ – возбуждается только вторым источником.

Реакция осциллятора $y_i(t)$, определяющая составляющую СУ на i -ой частоте, будет:

от работы 1го источника:

$$y_{i1}(t) = \int_0^{\infty} h_i(t - \tau) x_1(\tau) d\tau,$$

от работы 2го источника:

$$y_{i2}(t) = \int_0^{\infty} h_i(t - \tau) x_2(\tau) d\tau,$$

от двух источников:

$$y_{i3}(t) = \int_0^{\infty} h_i(t - \tau)[x_1(\tau) + x_2(\tau)]d\tau, \quad (2.9)$$

здесь $h_i(t)$ – импульсная переходная функция от i -го осциллятора.

Процедура определения i -ой составляющей СУ состоит в отыскании максимума функций $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$.

Таким максимумам соответствуют временные координаты t_{1m} , t_{2m} , t_{3m} , и $y_{i1}(t_{1m}) > y_{i1}(t_{3m})$,

$$y_{i2}(t_{2m}) > y_{i2}(t_{3m}), \quad (2.10)$$

отсюда

$$y_{i3}(t_{3m}) = |y_{i1}(t_{3m}) + y_{i2}(t_{3m})| < |y_{i1}(t_{1m})| + |y_{i2}(t_{2m})| \quad (2.11)$$

Учитывая, что $y_{i1}(t_{3m})$ и $y_{i2}(t_{3m})$ могут иметь разные знаки, можно сделать вывод, что амплитуда СУ от подключения второго источника может не увеличиться. Для модуля вектора имеем:

$$\begin{aligned} y_{i3}(t_{3m}) &= \sqrt{(y_{i1}^2(t_{3m}) + y_{i2}^2(t_{3m}))} \geq |y_{i1}(t_{1m})| \\ y_{i3}(t_{3m}) &= \sqrt{(y_{i1}^2(t_{3m}) + y_{i2}^2(t_{3m}))} \geq |y_{i1}(t_{2m})| \end{aligned} \quad (2.12)$$

где $y_{i3}(t_{3m})$ – отклик вектора ускорений.

Таким образом, СУ вектора ускорений в идеальном случае всегда больше СУ его составляющих. Следует отметить, что при частоте дискретизации 25 кГц в районе высоких частот из-за грубой аппроксимации временного процесса имеют место случаи, когда СУ вектора меньше СУ составляющих. Поэтому для расчета СУ в диапазоне до 10 кГц частота дискретизации процесса не должна быть меньше 50 кГц.

В целом, одновременное применение двух и более СПУ оказывает влияние на форму и уровень СУ. Оценить это влияние возможно экспериментальным путём.

На данный момент накопленный опыт испытаний на стенде не позволяет провести детальный развернутый анализ последствий применения дополнительных СПУ при испытаниях БА на стенде, и дать оценку оптимальной области применения стендовых испытаний с несколькими СПУ.

Вследствие этого подключение дополнительных СПУ может быть рекомендовано как способ коррекции СУ, однако решение о их применении должно быть основано на результатах испытаний опытных образцов.

2.3.4 Экспериментальное подтверждение теоретических зависимостей

Для верификации результатов расчета было проведено 3 блока серий испытаний, и проанализированы их результаты.

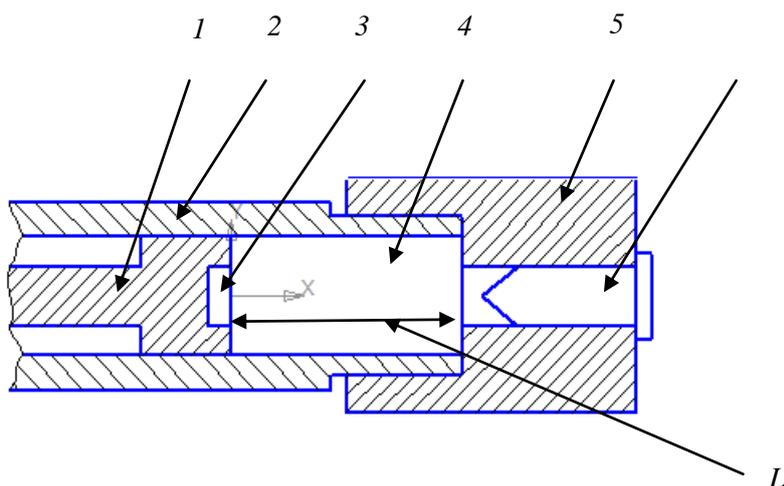
В первой серии испытаний экспериментально исследовалась задача воздействия ударника СПУ на демпфер в зависимости от используемого материала АМГ6, мощности применяемых патронов и объема камеры высокого давления. При испытаниях использовались две схемы начальной установки объема камеры высокого давления. Первая связана с использованием части объема ствола (рисунок 25), где начальное положение устанавливается за счет смещения поршня в стволе.

При заданном начальном объеме V пороховой камеры из тарировочной зависимости начальное положение L поршня определяется по формуле:

$$L = (V - V_0) / (\pi R_c^2) \quad (2.13)$$

где R_c – радиус калибра ствола.

На рисунке 26 приведена экспериментальная зависимость глубины вмятины демпфера из АМГ6 от начального объема пороховой камеры с использованием патрона Д4.



1 – поршень СПУ, 2-ствол, 3- цилиндрическая полость в торце поршня (начальный объем $V_0 = 0.472$ см³), 4- начальный объем камеры высокого давления (пороховой камеры), 5 – пробка, 6- патрон.

Рисунок 25 – схема начальной установки объема камеры

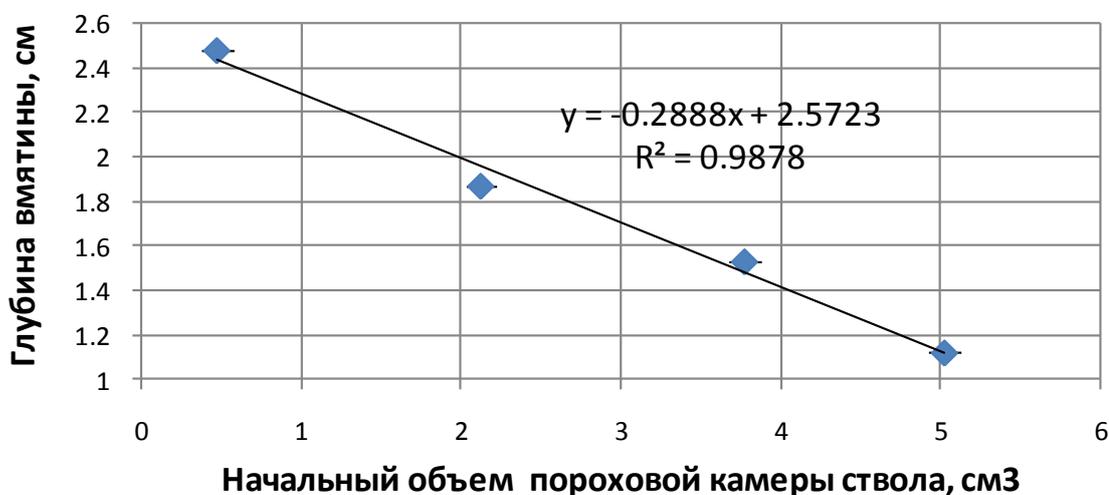


Рисунок 26 – Зависимость глубины вмятины демпфера из АМг6 от начального объема пороховой камеры с использованием патрона Д4

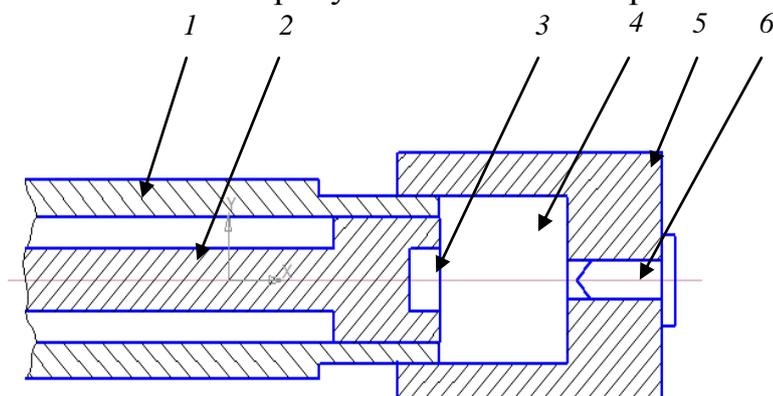
Экспериментальные точки на графике соответствуют средним значениям серии испытаний. Количественные данные и оценки погрешностей приведены в таблице 7.

Из таблицы 7 следует, что относительная погрешность при проведении однотипных испытаний находится в пределах 5-8%. Здесь же приведены величины доверительных интервалов ($P=0.95$).

Таблица 7 – Глубина вмятины для 4х объемов пороховой камеры

Объем пороховой камеры, см ³	№ опыта	Глубина вмятины, см	Среднее, см	Среднеквадратичное отклонение	Доверит. интервал	Относит. погрешность, %
0.472	1	2.5	2.48	0.044	0.19	7.63
	2	2.4				
	3	2.55				
1.762	1	1.9	1.87	0.033	0.14	7.68
	2	1.8				
	3	1.9				
4.932	1	1.5	1.53	0.017	0.07	4.67
	2	1.55				
	3	1.55				
8.072	1	1.1	1.12	0.017	0.07	6.42
	2	1.15				
	3	1.1				

Во **второй серии** испытаний экспериментально исследовалась задача воздействия ударника СПУ на демпфер в зависимости от используемого материала М1. Здесь использовался более технологичный метод установки начального объема пороховой камеры, связанный с использованием полости пробки, которая за счет резьбового крепления со стволом может изменять начальное положение. На рисунке 27 показан вариант такой настройки.



1 – поршень СПУ, 2-ствол, 3- цилиндрическая полость в торце поршня (начальный объем V_0), 4- начальный объем камеры высокого давления (полость пробки), 5 – пробка, 6- патрон.

Рисунок 27 – схема начальной установки объема камеры

При заданном из тарировочной зависимости начальном объеме V пороховой камеры смещение L пробки определяется по формуле, аналогичной (2.13), в которой вместо R_c используется R_n – радиус цилиндрической полости пробки.

На рисунке 28 приведена экспериментальная зависимость глубины вмятины демпфера из электротехнической меди М1 от начального объема пороховой камеры под пробкой и с использованием патрона Д4.

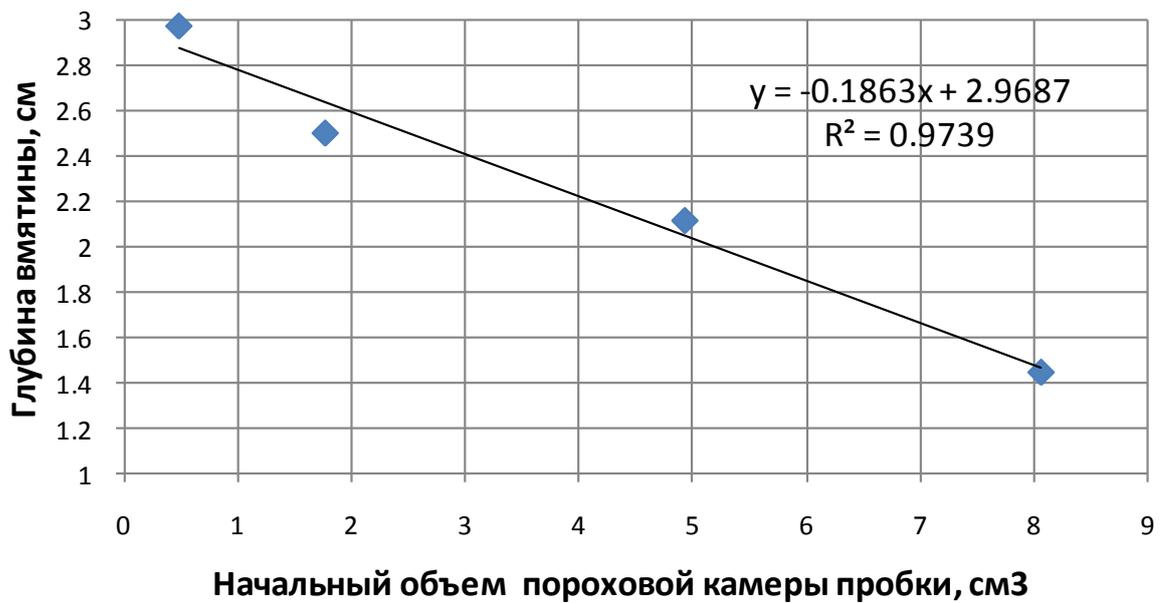


Рисунок 28 – Зависимость глубины вмятины демпфера из М1 от начального объема пороховой камеры с использованием патрона Д4

Экспериментальные точки на графике соответствуют средним значениям серии испытаний. Количественные данные и оценки погрешностей приведены в таблице 8.

Из таблицы 8 следует, что относительная погрешность при проведении однотипных испытаний находится в пределах 5-7%. Здесь же приведены величины доверительных интервалов ($P=0.95$).

Таблица 8 – Глубина вмятины для 4х объемов пороховой камеры

Объем пороховой камеры, см ³	№ опыта	Глубина вмятины, см	Среднее, см	Среднеквадратичное отклонение	Доверит. интервал	Относит. погрешность, %
0.472	1	2.95	2.97	0.044	0.189612	6.39
	2	3.05				
	3	2.9				
1.762	1	2.55	2.5	0.029	0.12413	4.96
	2	2.45				
	3	2.5				
4.932	1	2.1	2.12	0.017	0.072	3.38
	2	2.15				
	3	2.1				
8.072	1	1.5	1.45	0.017	0.072	4.94
	2	1.45				
	3	1.4				

В третьей серии экспериментальных исследований были определены тарировочные зависимости величины вмятины демпфера от мощности используемых строительных патронов типа Д2, Д3, Д4, Д5. Все результаты получены для ударника с плоским торцом. В этом случае вмятина имеет четкую цилиндрическую форму, что позволяет провести измерения с высокой точностью.

Была проведена серия испытаний и построены тарировочные зависимости средних значений для демпфера из АМГ6, представленные на рисунке 29.

Из анализа результатов можно сделать вывод, что величина мощности патронов существенно влияет на параметры удара, что подтверждается также результатами расчета.

Использование полученных результатов позволяет оперативно и с приемлемой точностью (5-7%) подбирать исходные параметры элементов СПУ для моделирования заданных испытательных режимов виброударных испытаний.

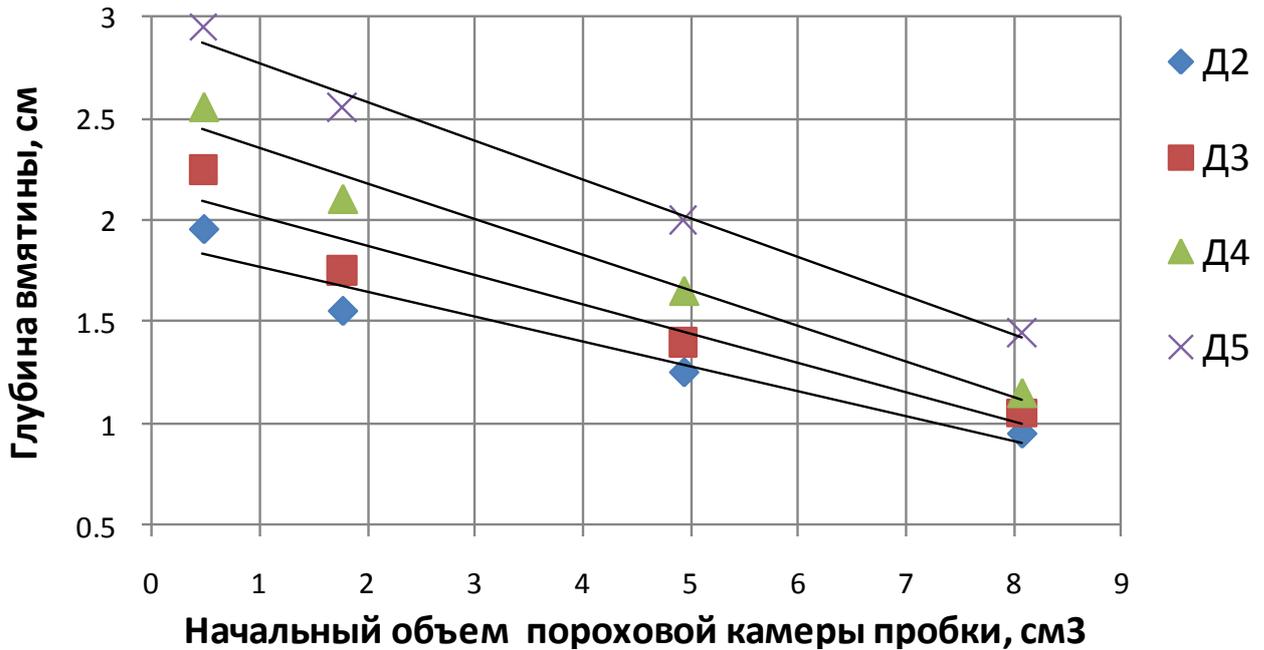


Рисунок 29 – Глубина вмятины демпфера в зависимости от типа патрона Д2, Д3, Д4, Д5 и начального объема пороховой камеры пробки

2.4 Аттестация стенда

Определение предельных возможностей стенда в создании ударных нагрузок является сложной задачей ввиду практически неограниченных возможностей комбинирования технологической оснастки и мест расположения ударников, поэтому в паспортные данные стенда внесены достигнутые на момент аттестации предельные значения создаваемых параметров при использовании основной платформы стенда, соответствующие поставленным в задаче работы требованиям – масса ОИ до 30 кг, уровень СУ на частоте 5000 Гц и выше – до 5000g. Результаты испытаний ОИ с массой 30 кг приведены в приложении В.

Аттестация стенда для испытаний БА проводилась в соответствии с ГОСТ 50779.22-2005 и включала в себя оценку повторяемости результатов по п.6.2 указанного ГОСТа, т.е. вычисление относительной погрешности при

воспроизведении ударных импульсов с одинаковыми заданными исходными параметрами системы «стенд с объектом испытаний/ударное устройство».

Для каждого из четырёх значений объема пороховой камеры пробки была проведена серия испытаний, в которой измерялась глубина вмятины. После обработки результатов рассчитана средняя глубина вмятины в каждой серии, среднеквадратичное отклонение, доверительный интервал ($P = 0.95$) и относительная погрешность.

По результатам серий испытаний, представленных в таблицах 7 и 8, видно, что относительная погрешность при проведении однотипных испытаний находится в пределах 5-7%, что характеризует высокую повторяемость при испытаниях на стенде.

2.5 Выводы

Разработано и аттестовано оборудование для моделирования удара от пиротехнических средств разделения – пиротехнический стенд с платформой, на которой закреплен ОИ, и устройствами для создания локального ударного нагружения. Показано, что стенд позволяет проводить автономные испытания БА массой до 30 кг на ударные нагрузки с уровнем СУ до 5000g на частотах свыше 5000 Гц.

Проведено экспериментально-теоретическое исследование характеристик системы «стенд с объектом испытаний/ударное устройство», влияющих на форму СУ и амплитуду виброудара, и получено, что:

- Относительная погрешность при проведении однотипных испытаний находится в пределах 5-7%, что характеризует высокую повторяемость при испытаниях на стенде.
- Для адаптации параметров системы к заданным частотным характеристикам СУ начальное значение параметров системы

оценивается из анализа предварительно полученного набора расчетных данных в форме тарировочных зависимостей, а далее значения уточняются результатами дополнительных расчетов и подтверждаются частотными испытаниями системы с весовым макетом прибора.

- Основная частота собственных колебаний системы «стенд с объектом испытаний/ударное устройство» уменьшается с увеличением веса испытываемого прибора.
- Факторами, оказывающими существенное влияние на амплитуду виброудара, являются мощность патрона, начальная скорость удара, физико-механические и геометрические характеристики демпфера.
- Дополнительное подключение одного или нескольких СПУ может быть использовано для корректировки режима испытаний, и должно проводиться на основе экспериментальных данных.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ТИПОВОЙ ПРОГРАММЫ И МЕТОДИКИ АВТОНОМНЫХ ИСПЫТАНИЙ БА НА УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЗДАННОГО СТЕНДА

Для проведения испытаний БА на стенде разработана типовая программа и методика автономных испытаний БА[58]. Схема типовой программы и методики испытаний БА приведена на рисунке 30.

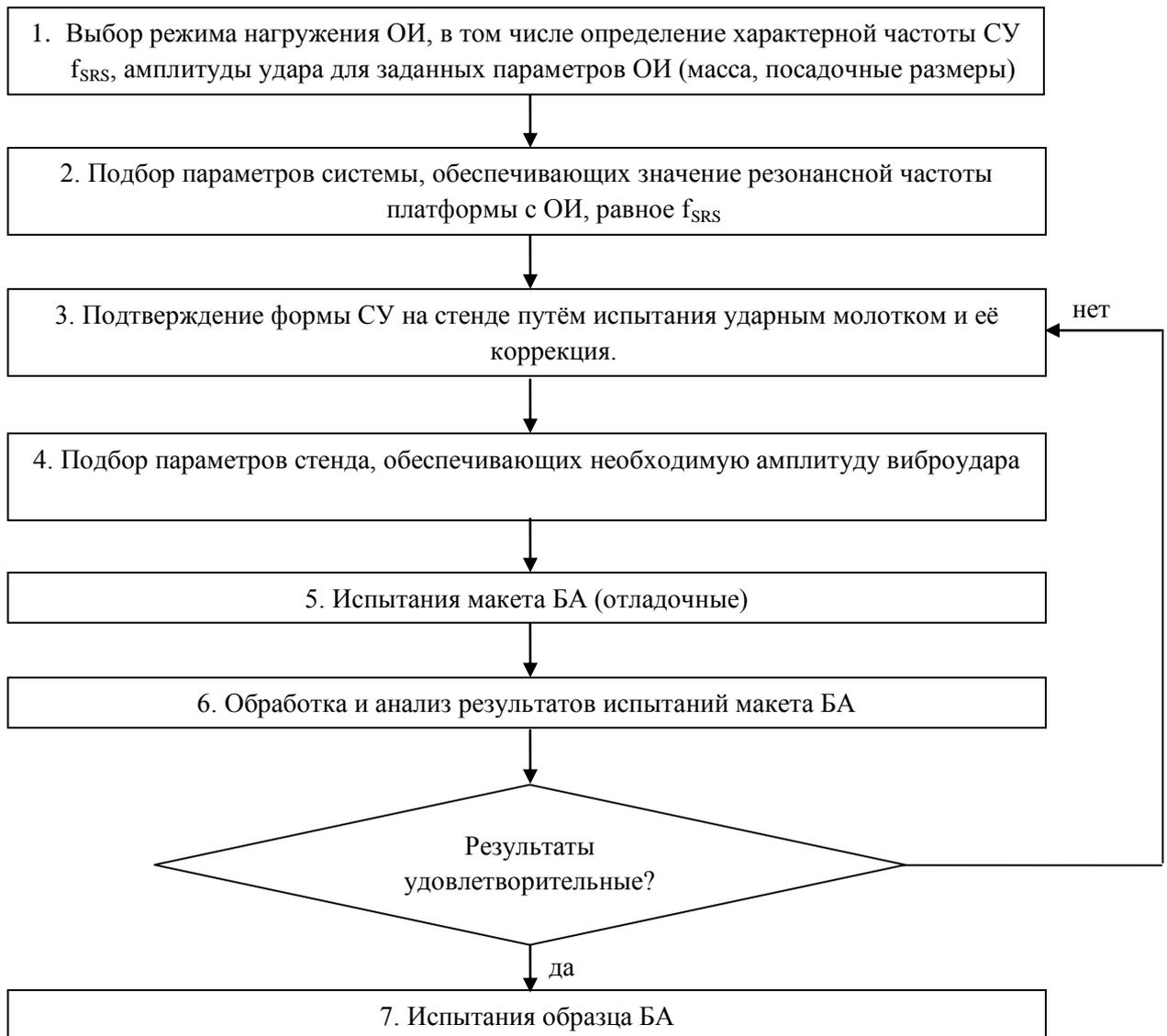


Рисунок 30 – Схема типовой программы и методики испытаний БА

Любая программа и методика испытаний должна содержать следующие разделы: объект испытаний, объем испытаний (количество и состав

испытываемых образцов), режимы и этапы испытаний, оценка результатов испытаний.

3.1 Объект испытаний и объем испытаний

Объектом испытаний является опытный либо лётный образец БА, в зависимости от принятой схемы отработки прочности КА и БА КА (см. таблицу 1).

Помимо ОИ, для отработки заданного режима испытаний на стенде требуется также наличие габаритно-массового аналога БА, далее называемого «макет БА», удовлетворяющего следующим условиям:

- Масса макета БА соответствует массе ОИ;
- Крепление макета БА к платформе стенда аналогично креплению ОИ к платформе стенда.

3.2 Режимы испытаний и поле допуска

Первым этапом типовой программы и методики автономных испытаний БА на ударные воздействия является выбор режима нагружения ОИ, в том числе определение характерной частоты СУ f_{SRS} , амплитуды удара для заданных параметров ОИ (масса, посадочные размеры).

Необходимо учитывать, также, что при воспроизведении заданных требуемых нагрузок на стендовом испытательном оборудовании неизбежно возникают погрешности, связанные с процессом моделирования удара.

Для оценки соответствия полученного СУ требуемому по техническому заданию или программе и методике испытаний должно быть обязательно установлено поле допуска для всего диапазона частот при испытаниях.

3.2.1 Определение режима испытаний ОИ

Нагрузки при испытаниях БА на стенде задаются в виде СУ. Требуемый СУ при испытаниях БА зависит от нагрузок, которые испытывает БА в полёте, и в общем случае должен определяться как уровень эксплуатационных нагрузок, увеличенный на коэффициент запаса (см. таблицу 1, п. 1.2.2, п. 1.2.3).

При отсутствии экспериментальных и расчетных данных о нагрузках на БА можно использовать максимальное обобщенное значение нагрузок от различных пиросредств в соответствии с рекомендациями отечественных стандартов второго блока, соответствующее режиму испытаний в средней зоне пироудара. Следует понимать, что применение такого режима для испытаний произвольной БА необоснованно, и может привести к неоправданному перенагружению БА, поэтому оценка эксплуатационного уровня нагрузок на БА является критически важной для подтверждения её стойкости.

Типичный СУ при испытаниях приведен в логарифмических шкалах координат на рисунке 4 (билинейная кривая), также может представлять собой полилинию с двумя точками перегиба, представленную на рисунке 31.

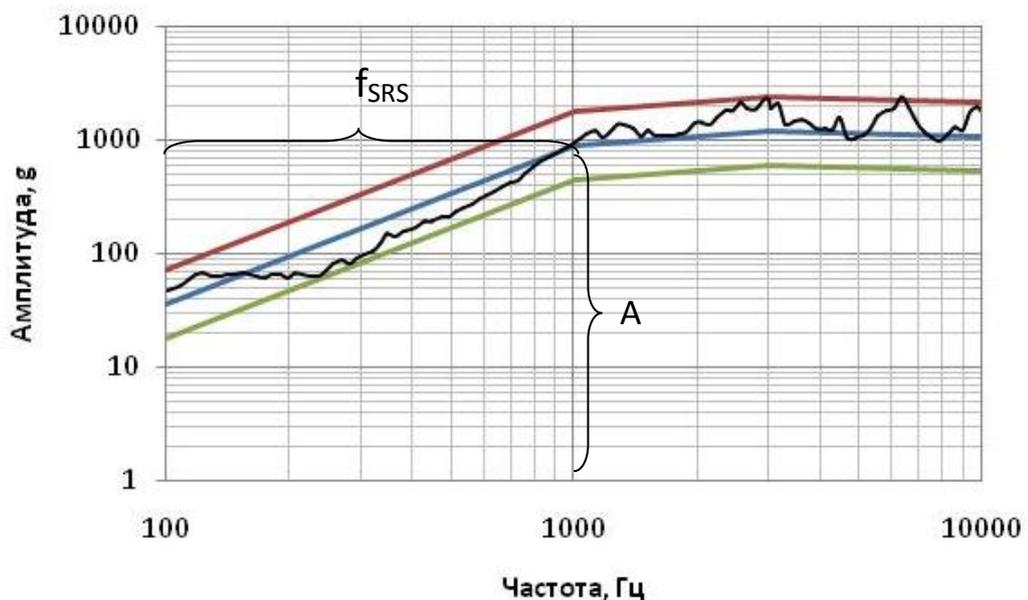


Рисунок 31 – СУ при испытаниях и его характерные параметры

Для требуемого СУ (на рисунке 31 или на рисунке 4) определим характерную частоту f_{SRS} точки перегиба билинейной кривой СУ и уровень СУ А в характерной точке.

Зададим вес Q_i и габариты мест крепления испытуемого прибора к платформе.

3.2.2 Поле допуска на воспроизводимый СУ

Поле допуска при воспроизведении СУ определяет, насколько точно при испытаниях БА было симитировано на стенде требуемое пиродарное нагружение.

Считается, что поле допуска зависит от параметров конкретного испытательного оборудования[5], а именно повторяемости полученных результатов при одних и тех же условиях. Это одна из составляющих поля рассеяния нагрузок, в данном стенде определяемая вариацией мощности используемых пиропатронов одного и того же типа, а также неизбежной нестабильностью работы элементов ударного механизма.

Проведенные эксперименты показали, что наблюдается повторяемость как по СУ, так и по амплитудно-временным характеристикам возбуждающего импульса – его размахам.

На рисунке 32 в качестве примера представлены результаты 3х испытаний макета одной БА КА, выполненные в одних и тех же условиях. Можно видеть, что повторяемость СУ при этом достаточно высока и не превышает ± 3 дБ.

Таким образом, можно обоснованно заключить, что повторяемость испытаний в аналогичных условиях составляет не более ± 3 дБ от среднего значения, и при испытаниях БА СУ испытательный импульс будет иметь разброс амплитуды в пределах этих значений.

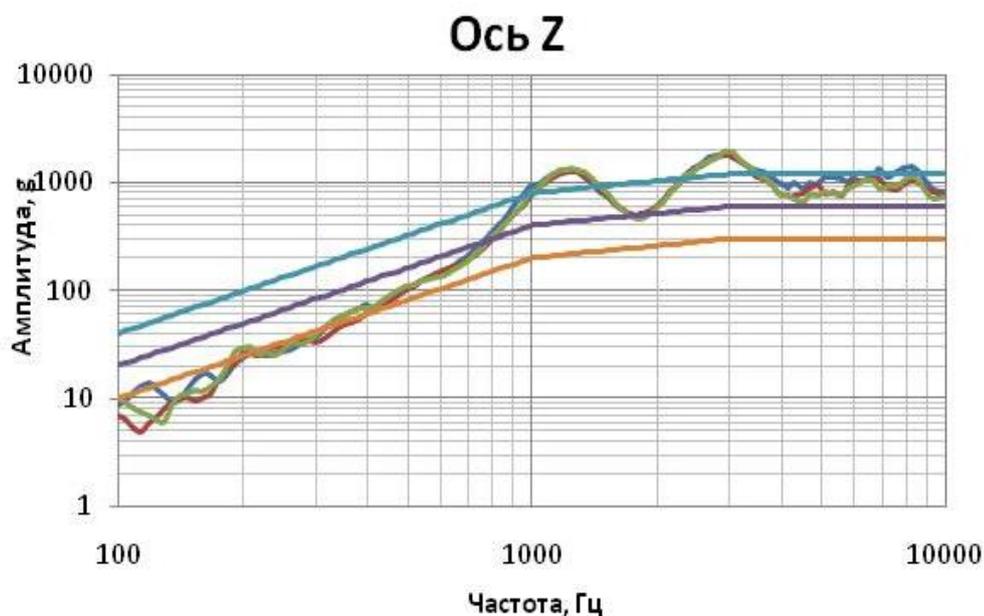


Рисунок 32 – Пример определения погрешности воспроизведения СУ при одинаковых заданных исходных параметрах

Однако, необходимо учитывать, что влияние на СУ оказывает также погрешности методики расчета СУ и параметры измерительной системы.

Погрешность методики расчета СУ заключается в том, что низкочастотная часть СУ может в ряде случаев не иметь в определенном диапазоне частот возбуждающихся резонансных частот, а проследиваться вследствие наличия низкочастотных помех измерительного сигнала и принятой при расчете СУ величины декремента затухания.

На рисунке 33 представлен результат моделирования СУ с помощью затухающей синусоиды с периодом 1 мс. Из этого примера можно видеть наличие составляющих СУ на частотах ниже 1000 Гц, которые не имеют в этом диапазоне частот возбуждений. Если при расчете СУ взять декремент выше 10, то значения в низкочастотной области могут существенно уменьшиться. Вследствие этого целесообразно увеличить поле допуска вниз на 3 дБ в области низких частот – до 1000 Гц.

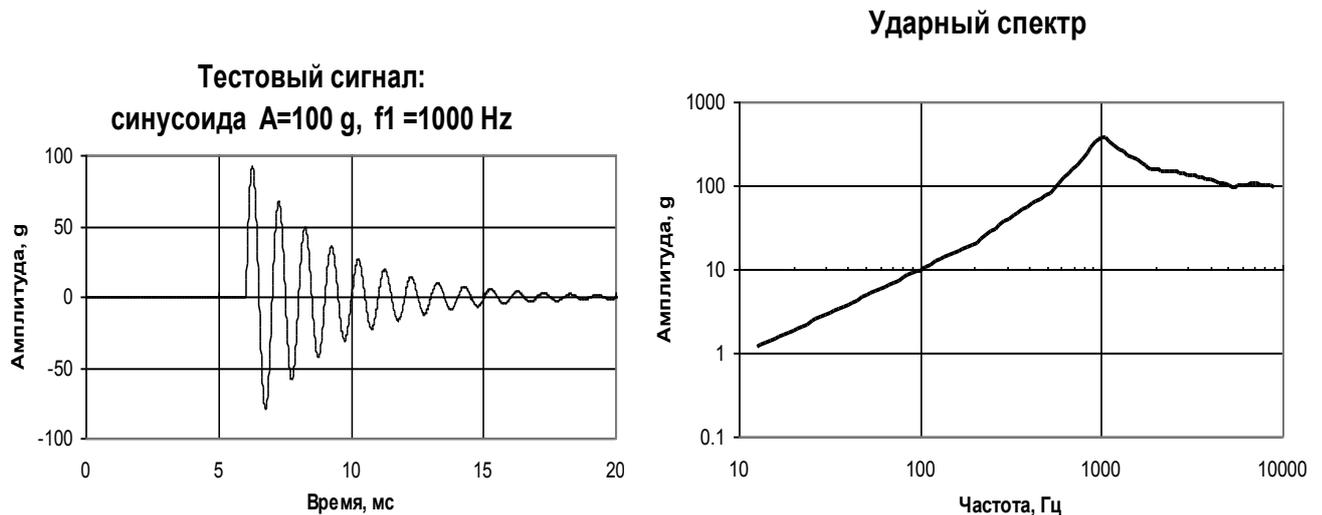


Рисунок 33 – моделирование СУ с помощью синусоиды с периодом 1мс

Параметры измерительной системы, накладывающие дополнительный отклик на СУ вследствие собственных резонансных частот, более подробно изложены в п.2.2.4.

Таким образом, при испытаниях на стенде используется следующее поле допуска на воспроизводимый СУ:

- на частотах до 1000 Гц величина допуска составляет (-6,+3) дБ;
- на частотах от 1000 до 7000 Гц величина допуска составляет ± 3 дБ;
- на частотах свыше 7000 Гц величина допуска составляет (-3, +6 дБ).

Допуска при испытаниях, рекомендуемые к применению зарубежными стандартами, составляют:

1. MIL STD 1540C: ± 6 дБ на частотах ≤ 3000 Гц, -6/+9дБ на частотах свыше 3000 Гц.
2. ECSS-E-ST-10-03C: -3дБ/+6дБ.

Стандарт NASA-STD-7003A, посвященный методологии испытаний на пиродудар, устанавливает, что при испытаниях с подрывом пиротехнических средств обычно не предъявляется определенных требований по полю допуска, хотя наиболее распространенным при испытаниях является приведенное выше в пункте 1 списка поле допуска. При этом считается обязательным, что как

минимум 50% уровня СУ во всем частотном диапазоне должно превышать требуемый уровень.

ГОСТ Р 53190-2008 допускает, что в некоторой области или областях частот, в сумме не превышающих 20% от диапазона частот испытаний, кривая ударного спектра может выходить за пределы указанного допуска, при этом не превышая уровень 3 дБ, если только эта область не включает в себя критические частоты объекта испытаний.

С учетом анализа требований и рекомендаций приведенных нормативных документов по пиротехническим испытаниям, поле допуска, определенное для созданного стенда, может быть сформулировано таким образом:

- на частотах до 1000 Гц поле допуска составляет (–6,+3) дБ;
- на частотах от 1000 до 7000 Гц поле допуска составляет ± 3 дБ;
- на частотах свыше 7000 Гц поле допуска составляет (–3, +6 дБ);
- во всем частотном диапазоне допускается отклонение от указанного поля допуска, но не более, чем на 6дБ, и не более, чем суммарно в 20% от частотного диапазона 100-10000 Гц.

Поле допуска на воспроизводимый СУ показано на рисунке 34.

При наличии отклонений, выходящих за пределы указанного поля допуска, проведение испытаний с предлагаемым уровнем СУ должно быть согласовано с заказчиком испытаний.

3.3 Подбор параметров стенда, обеспечивающих форму СУ

При исследовании варьируемых характеристик стенда были определены параметры системы «стенд с объектом испытаний/ударное устройство», влияющие на форму получаемого СУ (2.3.1).

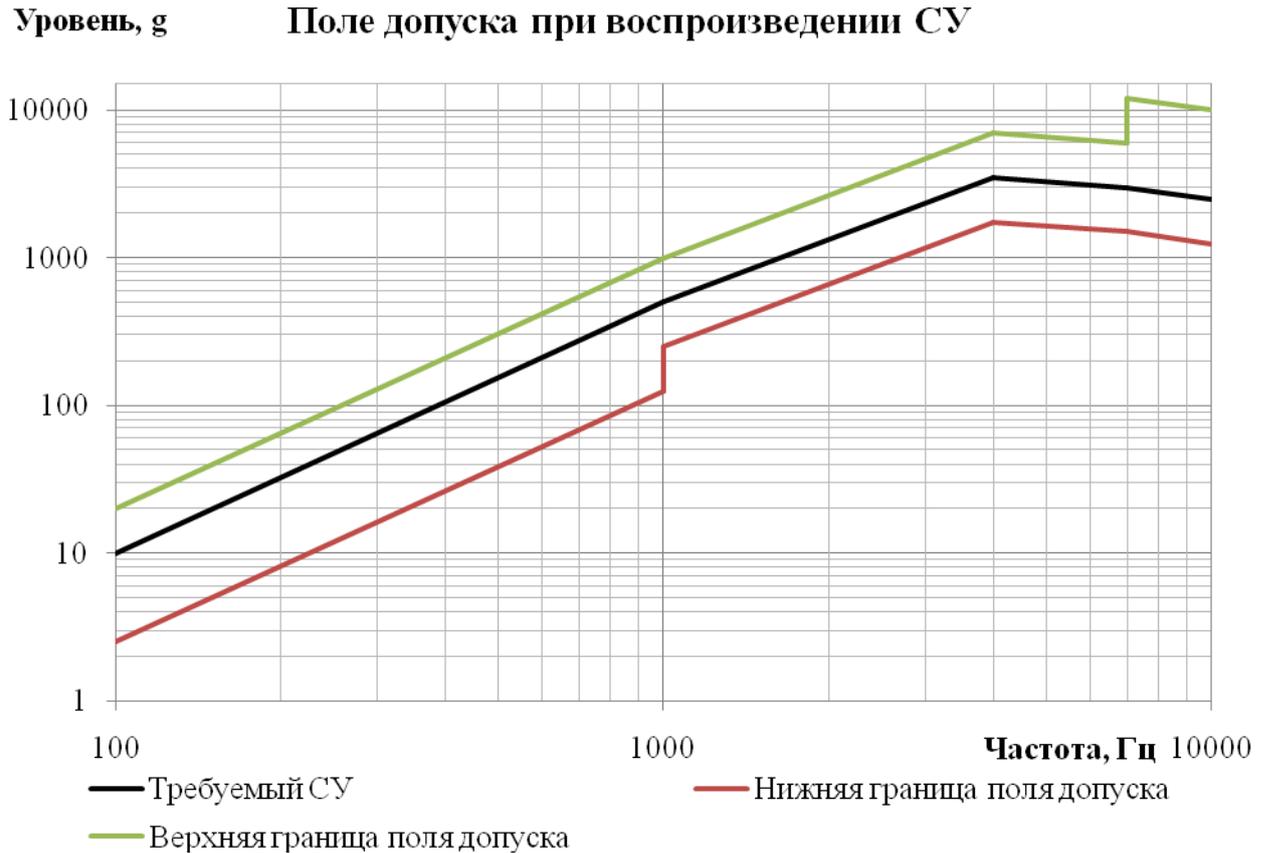


Рисунок 34 – Поле допуска при воспроизведении СУ на стенде

Вторым этапом испытаний является подбор параметров системы, обеспечивающих значение резонансной частоты платформы с ОИ, равное f_{SRS} .

Для получения характерной точки перегиба СУ на частоте f_{SRS} при испытаниях необходимо, чтобы первая собственная (резонансная) частота платформы стенда с ОИ совпадала с f_{SRS} .

В случае созданного стенда, варьируемые параметрами системы (2.3.1) являются:

- размеры a, b, h платформы стенда;
- материал платформы стенда;
- вид закрепления платформы (граничные условия);
- вес ОИ (совпадающий с весом макета БА).

Подбор указанных параметров проводится по созданной программе, или уже существующим тарировочным зависимостям.

Отметим, что если существующей платформы стенда недостаточно для создания необходимого ударного воздействия, то с помощью разработанной программы возможно рассчитать технические характеристики требуемой пластины и подготовить ТЗ на ее изготовление.

3.4 Подтверждение формы СУ частотным молотком и ее коррекция

Третьим этапом является подтверждение формы СУ на стенде путём испытания ударным молотком и её коррекция.

После того, как были определены требуемые параметры стенда, необходимо подтвердить форму СУ с помощью испытаний ударным молотком.

Ударный молоток возбуждает достаточно короткие импульсы, спектры которых обычно не превышают (4÷5) кГц. Таким ударным молотком, например, является молоток 8201 фирмы Брюль и Къер со сферическим стальным наконечником.

Поскольку колебательная система, состоящая из платформы и оснастки с макетом изделия, предполагается линейной, то и форма СУ от пиропатрона и ударного молотка будут отличаться, в основном, по уровням частотных составляющих.

Коррекция формы СУ

Если изделие установлено вместе с оснасткой на платформе, то возможна коррекция формы СУ путем установки дополнительной технологической плиты под оснастку. Дополнительная плита может устанавливаться на различного рода, втулки, шайбы, а также на мягкие прокладки. Одним из приемов коррекции

формы СУ является несимметричная установка опорных элементов дополнительной плиты для возбуждения изгибных форм колебаний.

Другим вариантом, дополнительно расширяющим возможности подбора необходимой формы СУ, является мягкая установка платформы на раме с помощью амортизаторов или резиновых прокладок.

Для коррекции формы СУ также может применяться одновременное возбуждение ударных нагрузок двумя или более СПУ (п.2.3.3).

Контроль коррекции формы СУ можно проводить, наблюдая плотность собственных частот в том или ином диапазоне, возбуждая их ударным молотком.

Приведенные способы коррекции формы оказывают существенное влияние на воспроизведение СУ с заданной точностью, т.е. соответствие полученного СУ требуемого с учётом поля допуска. В настоящей работе методы коррекции СУ подробно не рассматриваются.

3.5 Подбор параметров стенда, обеспечивающих амплитуду удара

Четвертым этапом является подбор параметров стенда, обеспечивающих необходимую амплитуду виброудара

Формирование заданных параметров импульса перегрузки осуществляется при помощи СПУ.

Амплитуда виброудара определяется взаимодействием «металл-металл» и зависит как от параметров пироударника – скорости и формы наконечника, так и от характеристик прокладки.

Скорость удара механического ударника пиротехнического устройства регулируется с использованием тарировочных зависимостей, полученных для патронов различной мощности и величины пути разгона ударника в стволе.

Далее проводится выбор материала и характеристик упруго-пластического демпфера по результатам расчета.

Для апробации правильности выбранных параметров проводятся испытания макета БА.

3.6 Испытания макета БА

Пятым этапом являются испытания макета БА

Предварительные испытания проводятся на макете БА, совпадающим по массе и расположению точек крепления с ОИ.

Идеальным вариантом макета БА является модернизированный лабораторный или доводочный образец БА, имеющий идентичное крепление, на который дополнительно навешивается масса для соответствия массы макета БА массе ОИ.

Макет устанавливается на платформе стенда, параметры системы «стенд с объектом испытаний/ударное устройство» устанавливаются в соответствии со значениями, полученными на втором–четвертом этапах согласно п.п. 3.3–3.5.

Во время испытаний проводится запись данных с акселерометров.

3.7 Обработка и анализ результатов испытаний макета БА

Шестым этапом является обработка и анализ результатов испытаний макета БА

После проведения испытаний макета БА необходимо провести обработку и анализ полученных данных: обработать акселерограмму с датчиков и проанализировать результаты.

При записи данных имеют место помехи сигнала, обусловленные наличием электрических сигналов, акустических шумов и др. Для нейтрализации

помех обычно используются методы фильтрации полученного сигнала. Наиболее часто применяются следующие виды фильтров:

- Коррекция нулевого уровня. Производится для того, чтобы обеспечить симметрию сигнала относительно нуля.
- Цифровые фильтры для выделения из исходного сигнала сигнал в заданном для обработки диапазоне частот.

Как правило, указанные методы интегрированы в программное обеспечение и применяются автоматически, что и используется в созданном стенде.

По измеренному отфильтрованному сигналу строится СУ с добротностью $Q=10$ и сравнивается с требуемым, с учётом установленного поля допуска (3.2.2). В отдельных частотных диапазонах, в соответствии с п. 3.2.2, возможен выход за пределы установленного поля допуска, при согласовании такого режима Заказчиком.

Если полученный СУ не удовлетворяет требованиям, проводится его повторная коррекция согласно п.3.4 до тех пор, пока полученный СУ не будет соответствовать предъявленным требованиям.

3.8 Испытания БА и анализ результатов испытаний

Заключительным, седьмым этапом является испытания БА и анализ результатов испытаний

Вместо макета БА монтируется опытный образец БА, т.е. ОИ, и по установленным параметрам системы «стенд с объектом испытаний/ударное устройство», отработанным на макете, проводятся испытания ОИ.

При строгом выполнении требований соответствия параметров макета БА параметрам ОИ, результаты испытаний ОИ и макета БА не должны сильно отличаться ввиду хорошей повторяемости испытаний.

В том случае, если полученные при испытаниях БА результаты не соответствуют предъявляемым требованиям, проводится анализ причин расхождения результатов, при необходимости проводится дополнительная коррекция СУ согласно п. 3.4 и проводятся дополнительные испытания.

3.9 Применение СПУ для испытаний опытныхборок КА и иных конструкций

Разработанные и входящие в состав стенда СПУ могут применяться также вне стенда, для создания виброударной перегрузки на опытнойборок КА или любой другойборок.

В этом случае при испытаниях ОИ на ударную стойкость к срабатыванию пиротехнических средств в качестве оснастки используется натурная конструкция КА (её опытнаяборок), или же иной ОИ, состоящий из некоторой опытной конструкции, на которую смонтированы элементы, испытываемые на ударные нагрузки.

Для определения режимов испытаний требуется априорная информация о виброударных нагрузках на КА при срабатывании штатных пиротехнических средств разделения. Эти данные можно получить при проведении функциональных испытаний систем разделения, или же использовать нормы прочности по ударным нагрузкам.

В отличие от стендовых испытаний, где требуется предварительная настройка частотных характеристик системы стенд/объект испытаний, при испытанияхборок (отдельных частей) конструкции КА предполагается, что за счет использования штатной силовой конструкции характерные частоты СУ будут близки к реальным. Таким образом, основной задачей методики испытаний является воспроизведение требуемой амплитуды удара в контрольных точках плоскости разделения.

Поэтому при испытаниях опытной сборки КА или иной сборки с использованием СПУ основной задачей при моделировании режима нагружения в форме СУ является создание расчетных амплитуд СУ для основных собственных частот сборки. В качестве основной характерной частоты спектра выступает точка, соответствующая экстремальному значению СУ, которую можно определить по СУ измеренного процесса при действии эксплуатационных нагрузок.

Такой подход к испытаниям используется за рубежом при испытаниях подсистем, систем и сборок КА.

Например, одним из способов имитирования реально действующих нагрузок при испытаниях сборок является замена реальных пироболтов на ударник, который производит контролируемое воздействие в той же точке [40]. При этом амплитуда виброудара регулируется массой и скоростью ударника. Данный метод является достаточно дорогим ввиду того, что стоимость испытываемой конструкции высока, а для подбора режима используется метод последовательного приближения (проб и ошибок).

Модификацией указанного выше метода является такой, где пиротехнический источник воздействия и часть прилегающей конструкции заменяются на резонансную плиту, спроектированную таким образом, что её низшая собственная частота соответствует главной резонансной частоте, производимой используемым пиротехническим устройством и связанной с ним конструкцией. Далее ударник и резонансная плита присоединяется к испытываемой конструкции, при этом **схема крепления соответствует механической связи ОИ с реальным пиротехническим устройством**. Схема установки ОИ при испытаниях показана на рисунке 35.

Когда такая плита подвергается воздействию механического удара, ее отклик обеспечит желаемое возбуждение конструкции ОИ.

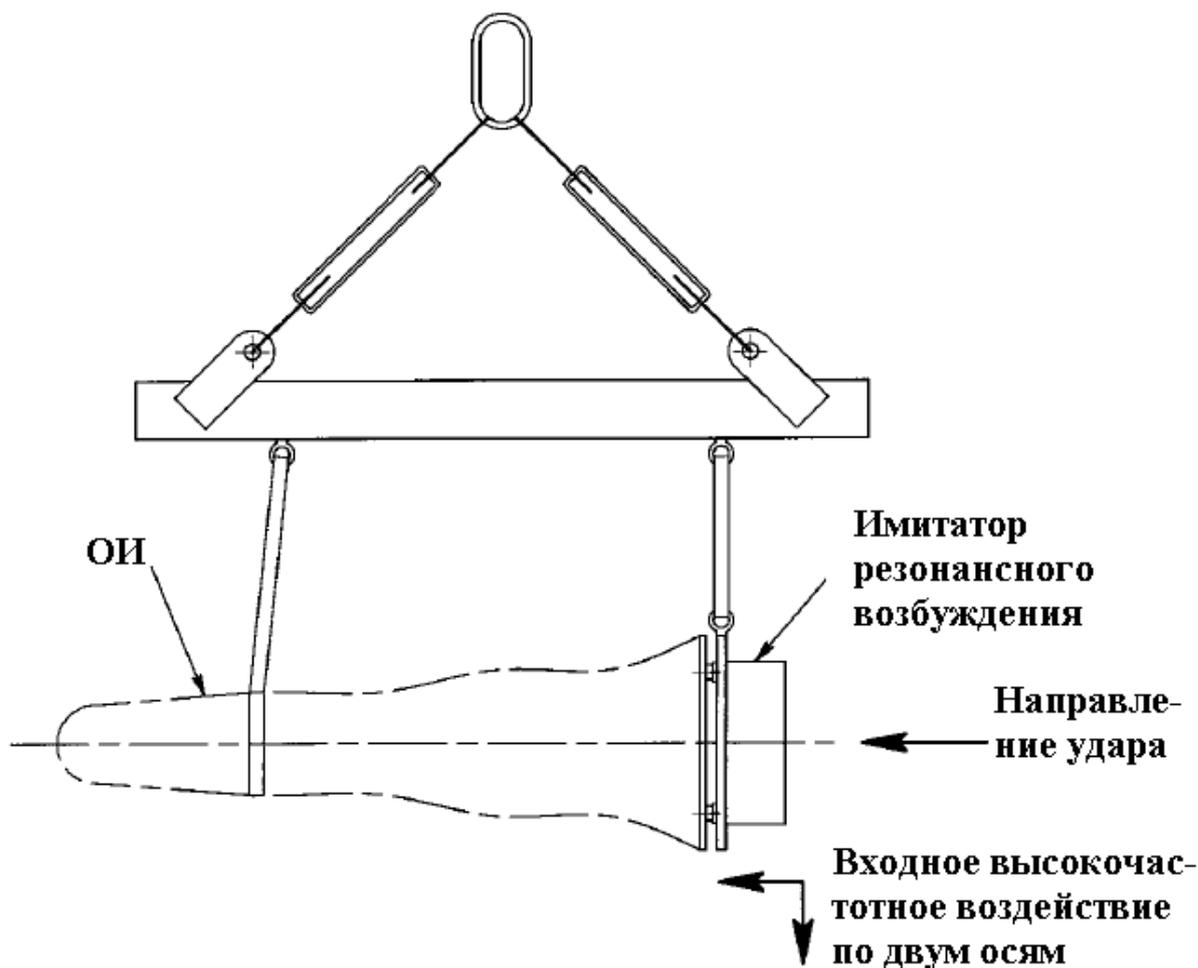


Рисунок 35 – Схема испытаний опытной сборки КА с использованием СПУ [40]

Как правило, объект испытаний должен быть полностью или частично обезвешен, так как граничные условия опирания ОИ влияют на собственные частоты и формы колебаний.

Приведенная на рисунке 35 схема является одним из примеров применения СПУ.

Необходимо отметить, что имитирование источников возбуждения точечной природы следует проводить таким образом, чтобы колебания возбуждались в тех же точках, что и на натурной конструкции. Это является существенным ограничением применения СПУ, однако при применении специальных приспособлений, как на рисунке 35, задача может быть успешно решена.

СПУ может использоваться также и для испытаний БА, имеющей сложное многоточечное крепление к конструкции КА, которую сложно закрепить на стенде. Для испытаний такой БА в качестве оснастки используется образец КА или часть конструкции КА – опытная сборка. В этом случае также считается, что форма СУ обеспечивается конструкцией КА, а испытания проводятся с моделированием требуемой амплитуды виброудара.

Методика испытаний опытных сборок КА на стойкость к срабатыванию пиросредств в целом аналогична приведенной в разделе методике типовых испытаний БА, однако при адаптации последней проявляются два приведенных выше различия:

- При испытаниях сборок нет необходимости подбора требуемой формы СУ, что влечет за собой отсутствие этапов 2 и 3;
- В некоторых случаях, для имитирования необходимо задавать нагрузки одновременно в нескольких точках, для чего должны использоваться несколько одновременно иницируемых СПУ и/или специальные приспособления.

3.10 Выводы

Разработана типовая программа и методика испытаний бортовой аппаратуры КА на стойкость к ударному воздействию от срабатывания пиросредств. Типовая методика состоит из следующих 7 этапов:

1. Выбор режима нагружения ОИ, в том числе определение характерной частоты СУ f_{SRS} , амплитуды удара для заданных параметров ОИ (масса, посадочные размеры).

2. Подбор параметров системы, обеспечивающих значение резонансной частоты стенда, равное f_{SRS} .
3. Подтверждение формы СУ на стенде путём частотных испытаний ударным молотком и её коррекция.
4. Подбор параметров стенда, обеспечивающих необходимую амплитуду виброудара.
5. Испытания макета БА.
6. Обработка и анализ результатов испытаний макета БА.
7. Испытания БА и анализ результатов испытаний.

Разработанные СПУ, функционирующие в составе стенда, могут быть применены для испытаний опытных сборок КА по адаптированной методике. Методика испытания сборок отличается от приведенной выше отсутствием этапов 2 и 3, а также тем, что в некоторых случаях для имитирования пиродара необходимо задавать нагрузки одновременно в нескольких точках, для чего должны использоваться несколько одновременно иницируемых СПУ и/или специальные приспособления.

ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ ПРОГРАММЫ И МЕТОДИКИ ДЛЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

Созданное испытательное оборудование и типовая программа и методика испытаний были успешно применены в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» как для решения задач подтверждения стойкости БА к определенному заданному уровню ударных нагрузок, так и для оценки предельного уровня ударостойкости отдельных элементов БА.

С использованием типовой программы и методики были проведены испытания на воздействие ударных нагрузок бортовой вычислительной машины КА «Метеор-М» №2, аккумуляторной батареи для микро КА «Звезда».

Для блока герконов КА «Ионосфера» была проведена серия испытаний с установлением предельной ударной стойкости узла герконов.

Входящие в состав стенда СПУ также были применены для создания виброударной нагрузки на динамическое изделие КА «Канопус-В», для обеспечения проведения зачетных испытаний доработанного антенно-фидерного устройства КА, по программе и методике испытаний, адаптированной к испытаниям сборки в соответствии с п. 3.9.

Обработка и анализ результатов испытаний проводились с использованием системы LMS SCADAS, обеспечивающей запись сигнала с частотой дискретизации 50 кГц, число доступных каналов – 32.

4.1 Испытания бортовой вычислительной машины КА «Метеор-М» №2

Одной из задач при разработке в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» собственной бортовой вычислительной машины (БВМ) стало подтверждение стойкости БВМ к воздействию механических нагрузок, в том числе ударных.

Испытания проводились в соответствии с разработанной типовой программой и методикой испытаний БА.

1. В качестве режима нагружения по результатам измерения нагрузок на аналоге – динамическом изделии КА «Метеор-М» №1, – был выбран режим, представленный в таблице 9.

Таблица 9 – Режим испытаний БВМ на ударные нагрузки

Частота, Гц	100	1000	3500	10000
Спектр удара, g	36	900	1200	1080

Поле допуска при испытаниях соответствовало п. 3.2.2.

Характерная точка перегиба СУ составляет 1000 Гц. Габариты крепления БВМ приняты в соответствии с конструкторской документацией, масса ОИ ~ 6 кг.

2. Были подобраны параметры стенда, обеспечивающие заданную точку перегиба СУ. По расчетам наиболее подходящей оказалась пластина 440x440x10.
3. Для подтверждения формы были проведены испытания частотным молотком. Поскольку существовали значительные отличия от требуемой формы СУ, были приняты меры коррекции СУ, в том числе установка дополнительной плиты стенда на специальные проставки. Таким образом была определена оптимальная конфигурация стенда с ОИ,

представленная на рисунке 36. При этом измерения проводились двумя акселерометрами, ориентированными по оси Z и расположенными у лицевой и задней панелей БВМ.

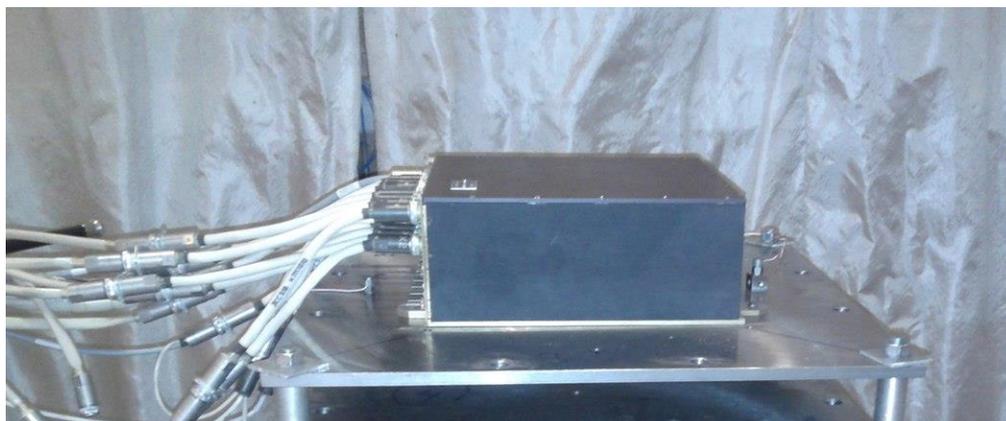


Рисунок 36 – Схема крепления БВМ

4. Для подбора амплитуды виброудара был проведен расчет скорости ударника, выбран тип патрона – ДЗ, определены параметры прокладки – из АМг6, толщиной 20мм, определены параметры камеры и требуемая форма наконечника ударника – сферическая. Схема БВМ при испытаниях приведена на рисунке 37.



1 – БВМ-01; 2 – Пиродударник; 3 – Стенд виброударный; 4 – Ударный акселерометр №1 (у лицевой панели); 5 – Ударный акселерометр №2 (у задней панели)

Рисунок 37 – Расположение БВМ-01 на ударном стенде

5. Были проведены испытания макета БВМ. Акселерограмма испытаний с обоих датчиков, направленных по оси Z, приведена на рисунке 38.

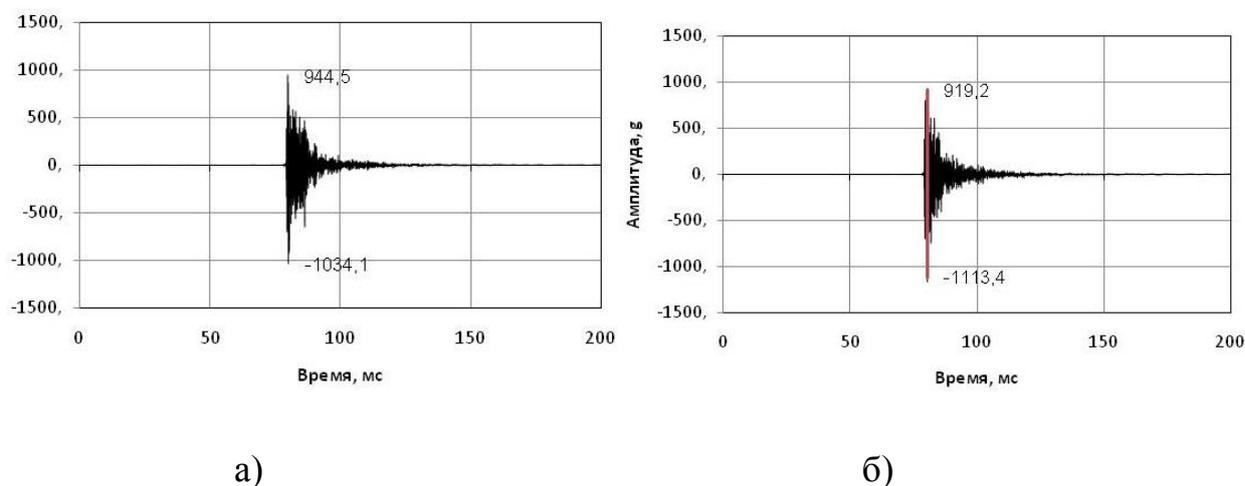


Рисунок 38 – Акселерограмма измерений датчиков 1 (а) и 2(б)

6. Полученный при испытаниях СУ в целом удовлетворял предъявляемым требованиям и был утвержден.
7. Были проведены испытания БВМ. СУ при испытаниях и его соответствие предъявляемым требованиям представлены на рисунке 39.

Как видно из рисунка 39, полученный СУ полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям. СУ незначительно выходит за границы поля допуска, при этом соблюдаются условия – не более чем в 20% от всего частотного диапазона, и не более, чем на 6 дБ от границ поля допуска.

При испытаниях не было обнаружено механических повреждений. Сбоев при проведении проверки функционирования не зафиксировано.

Таким образом, на созданном стенде была успешно проведены испытания БВМ на стойкость к пироударным нагрузкам.

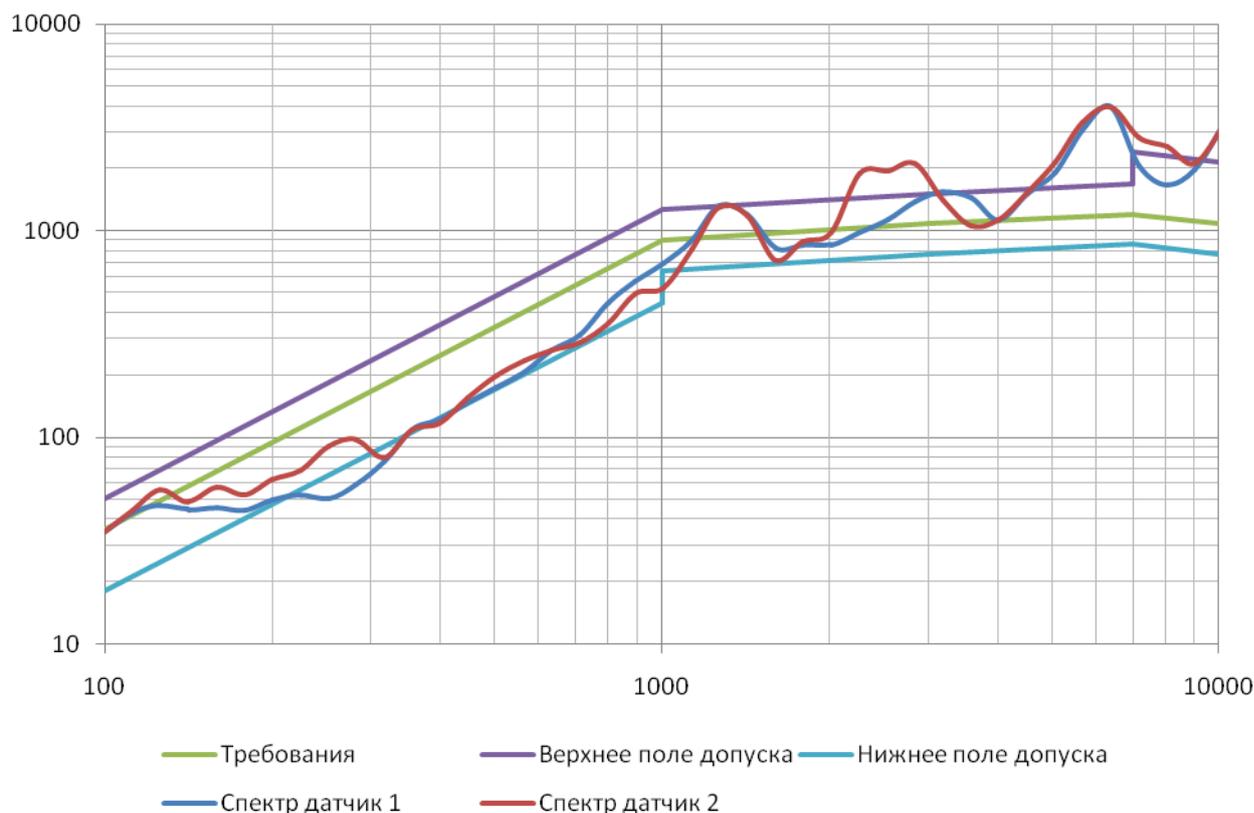


Рисунок 39 – Спектр удара при испытаниях БВМ

4.2 Испытания аккумуляторной батареи для микро КА «Звезда»

В рамках разработки микро КА «Звезда» была поставлена задача отработки стойкости аккумуляторной батареи к воздействию ударных нагрузок от срабатывания пиросредств.

Батарея микро КА состоит из типовых блоков – литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ), являющихся наименьшей неделимой структурной единицей, связанных между собой и управляемых с помощью контроллера заряда и управления.

Для испытаний были выбраны 4 ЛИАБ типа NCR18650В из единой серии, сгруппированные попарно.

Испытания проводились в соответствии с разработанной типовой программой и методикой испытаний БА.

1. В качестве режима нагружения был выбран режим, представленный в таблице 10.

Выбор режима нагружения осуществлялся в соответствии с Приложением Б. В качестве прототипа КА был принят КА «Ионосфера», точки измерения – внешняя поверхность КА. При этом были установлены коэффициент масштабирования по мощности – 1, коэффициент масштабирования по расстоянию – 1, дополнительно введен коэффициент 1.3, учитывающий неопределенность конструктивного исполнения КА (на момент начала испытаний конструкция микро КА не была окончательно утверждена).

Таблица 10 – Режим испытаний ЛИАБ на ударные нагрузки

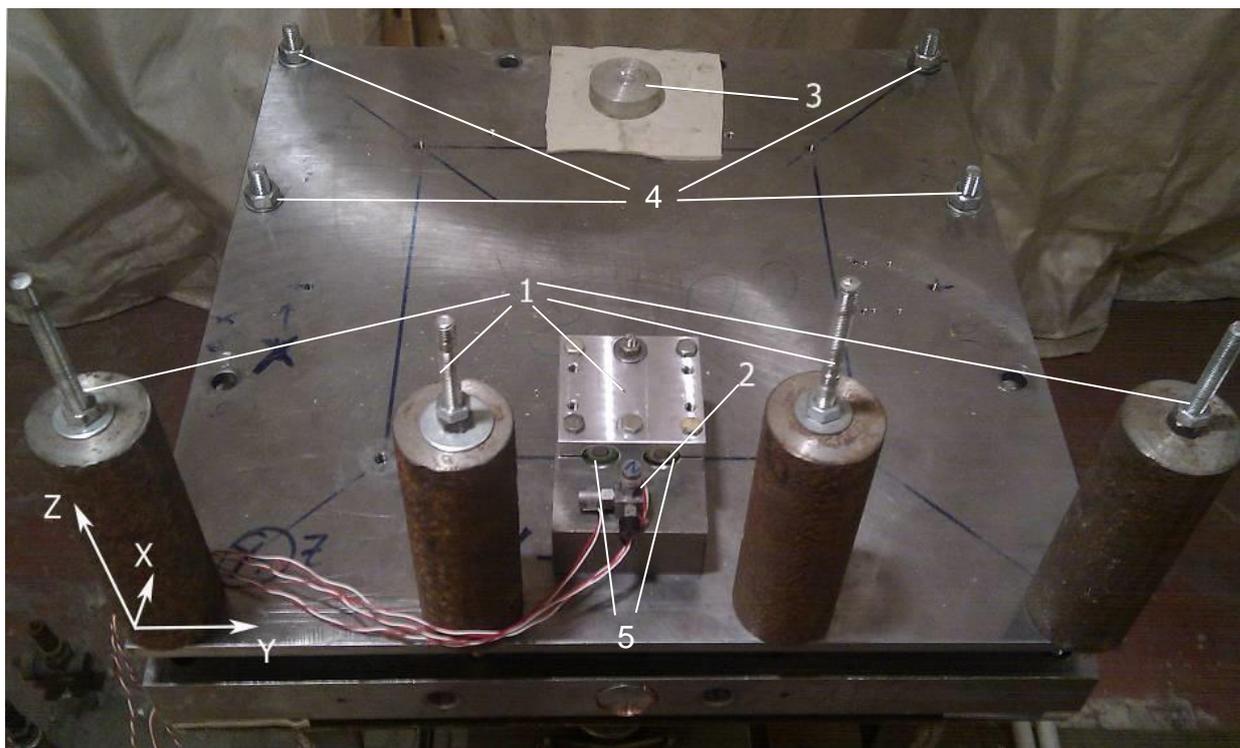
Частота, Гц	100	3000	10000
Спектр удара, g	40	1300	1300

Поле допуска при испытаниях соответствовало п. 3.2.2.

Характерная точка перегиба СУ составляет 3000 Гц. Габариты крепления ЛИАБ приняты в соответствии с конструкторской документацией, масса двух ОИ составляет ~ 50 г, т.е. практически не оказывает влияния на создаваемое воздействие.

2. Были подобраны параметры стенда, обеспечивающие заданную точку перегиба СУ. По расчетам наиболее подходящей оказалась пластина 440x440x10.
3. Для подтверждения формы были проведены испытания частотным молотком. Поскольку существовали значительные отличия от требуемой формы СУ, были приняты меры коррекции СУ, в том числе консольная установка дополнительной плиты стенда на специальные проставки. Таким образом была определена оптимальная конфигурация стенда с ОИ, представленная на рисунке 40.

Измерения проводились розеткой акселерометров, установленной вблизи места крепления ОИ.

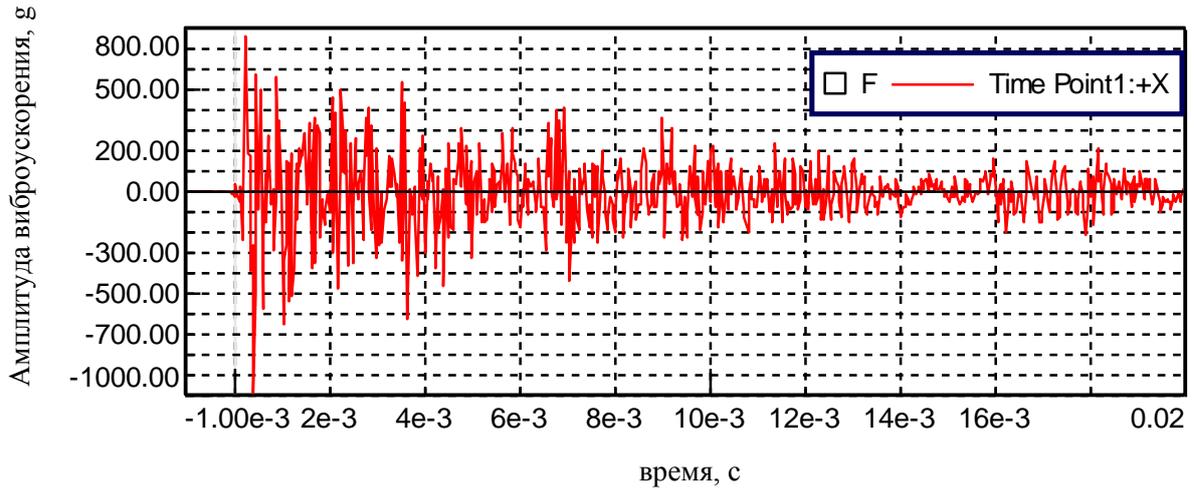


1 – технологическая обойма; 2 – розетка ударных акселерометров; 3 – резинометаллическая прокладка; 4 – болтовое соединение дополнительной платформы стенда с основной; 5 - ОИ

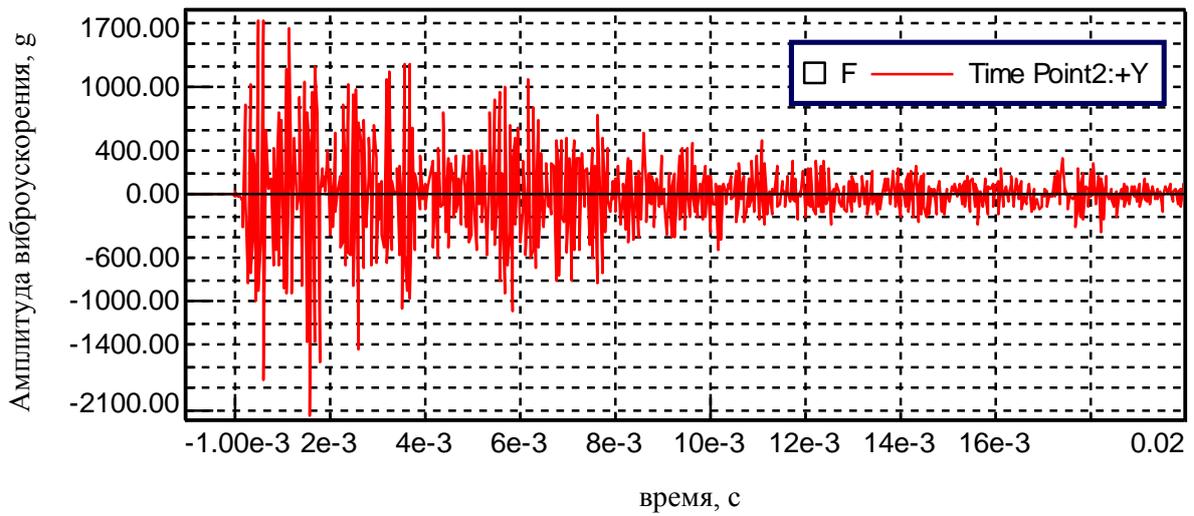
Рисунок 40 – Схема крепления ЛИАБ при испытаниях

4. Для подбора амплитуды виброудара был проведен расчет скорости ударника, выбран тип патрона – Д4, определены параметры прокладки – из АМг6, толщиной 20мм, определены параметры камеры и требуемая форма наконечника ударника – сферическая.
5. Были проведены испытания оснастки без ОИ, т.к. имитирование макета БА столь малой массы не нужно ввиду пренебрежимо малого влияния ОИ.

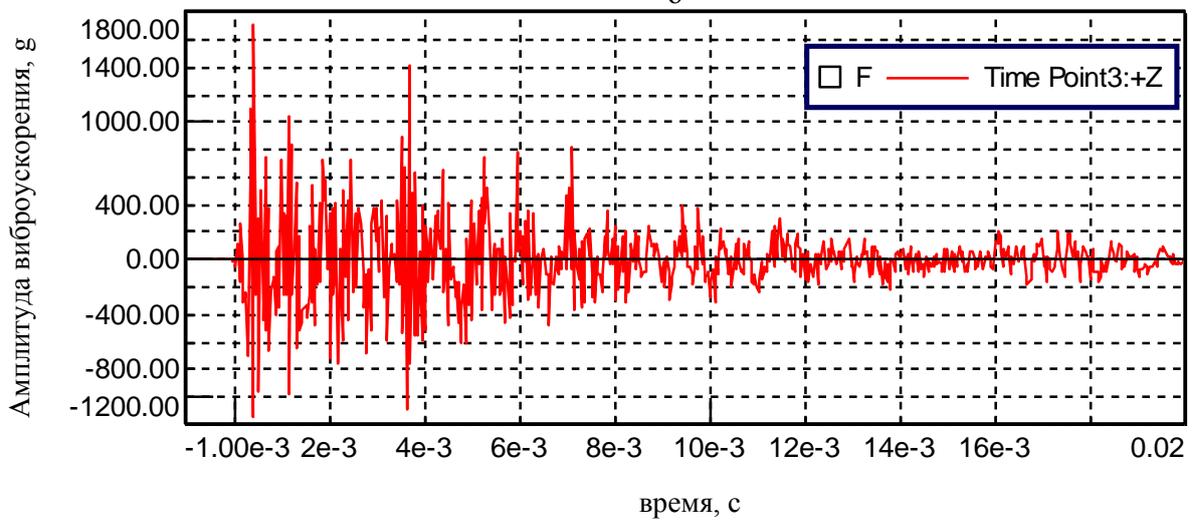
Акселерограмма испытаний с датчиков по всем осям приведена на рисунке 41 – для первой группы ОИ, на рисунке 42 – для второй группы ОИ.



а



б



в

Рисунок 41 – Акселерограмма измерений датчиков первой группы ОИ по осям X(а), Y(б), Z (в)

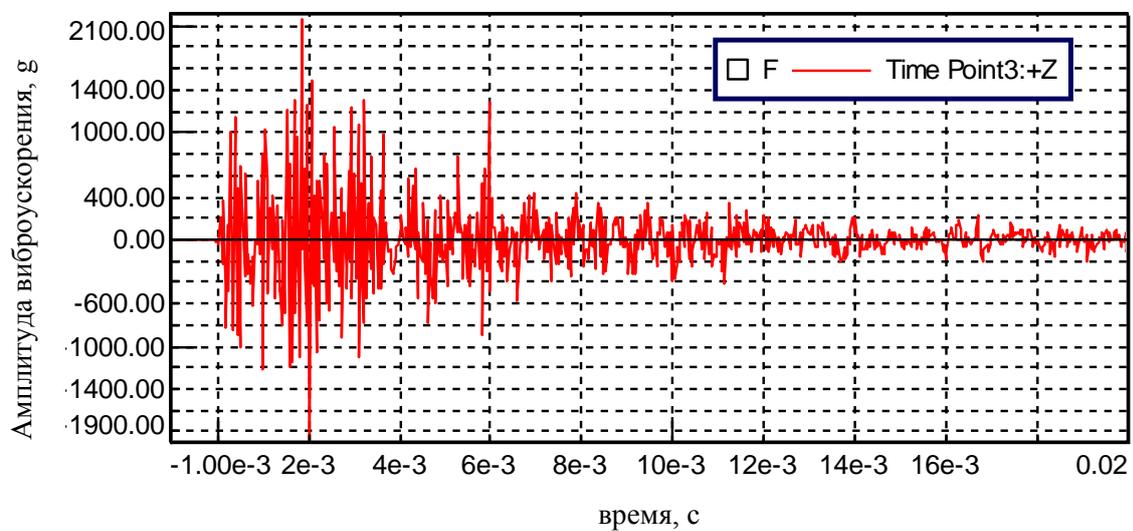
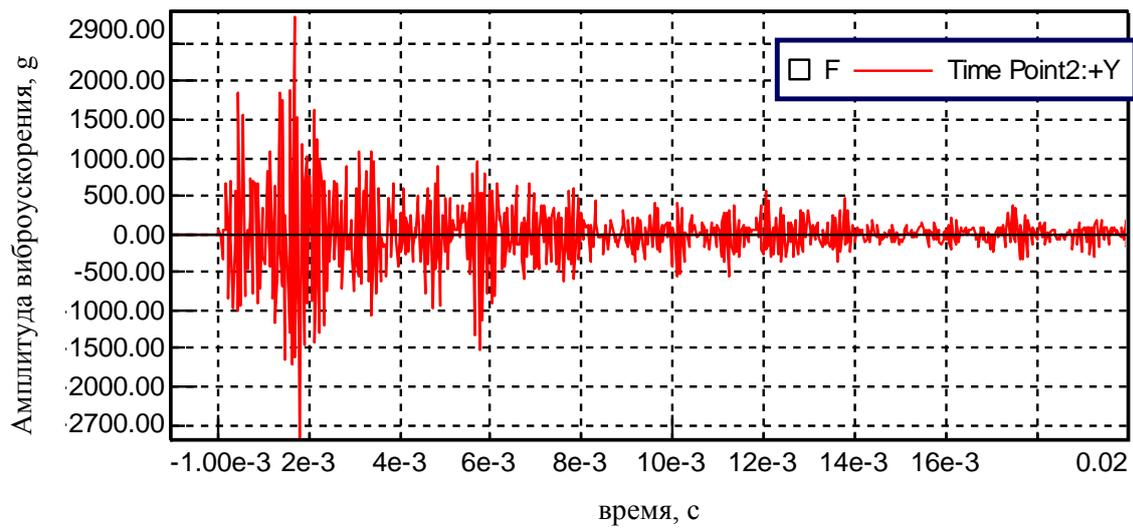
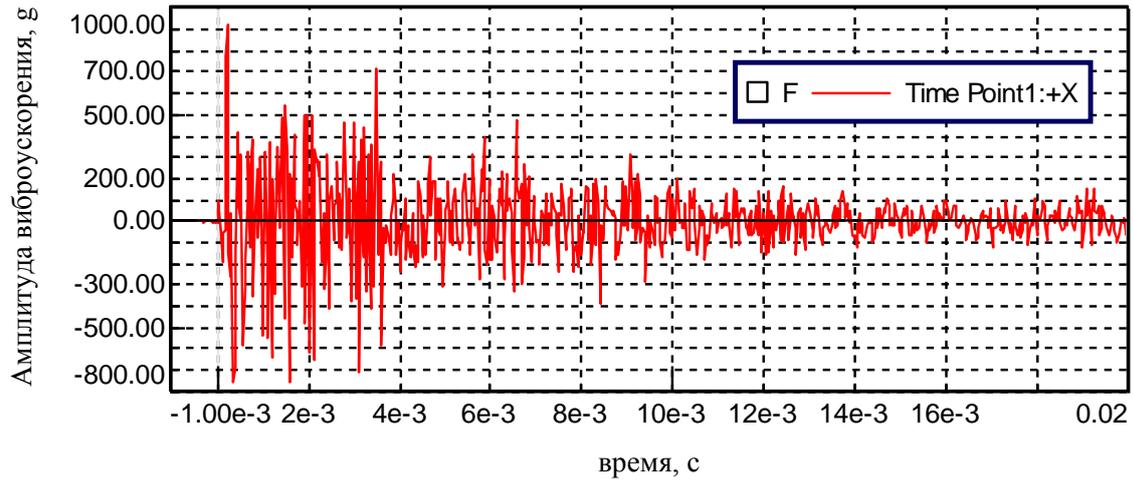


Рисунок 42 – Акселерограмма измерений датчиков второй группы ОИ по осям X(а), Y(б), Z (в)

6. Полученный при испытаниях СУ по всем осям в целом удовлетворял предъявляемым требованиям и был одобрен.
7. Были проведены испытания БВМ. СУ при испытаниях и его соответствие предъявляемым требованиям представлены на рисунках 43 и 44. Пунктирной линией показаны отклонения ± 6 дБ.

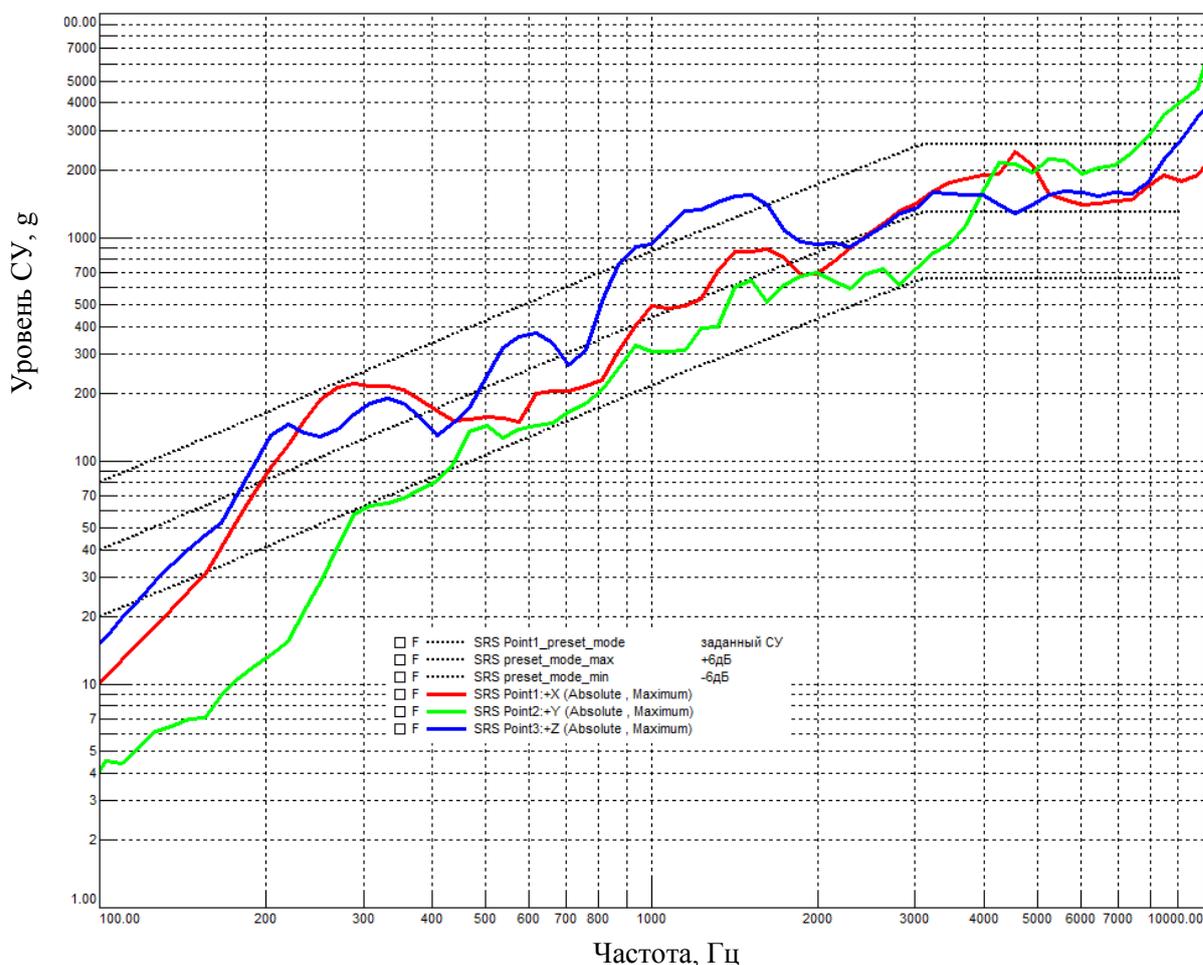


Рисунок 43 – Спектр удара при испытаниях первой группы ЛИАБ

Как видно из рисунков 43 и 44, полученный СУ полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям по осям X и Z. СУ незначительно выходит за границы поля допуска, при этом соблюдаются условия – не более чем в 20% от всего частотного диапазона, и не более, чем на 6 дБ от границ поля допуска. По оси Y наблюдается отклонение от требуемого СУ, что может быть исправлено проведением дополнительных испытаний с переориентацией ОИ, или же текущий режим испытаний может быть согласован заказчиком и зачтён.

При испытаниях не было обнаружено механических повреждений. Сбоев при проведении проверки функционирования не зафиксировано.

Таким образом, на созданном стенде были успешно проведены испытания ЛИАБ на стойкость к пироударным нагрузкам.

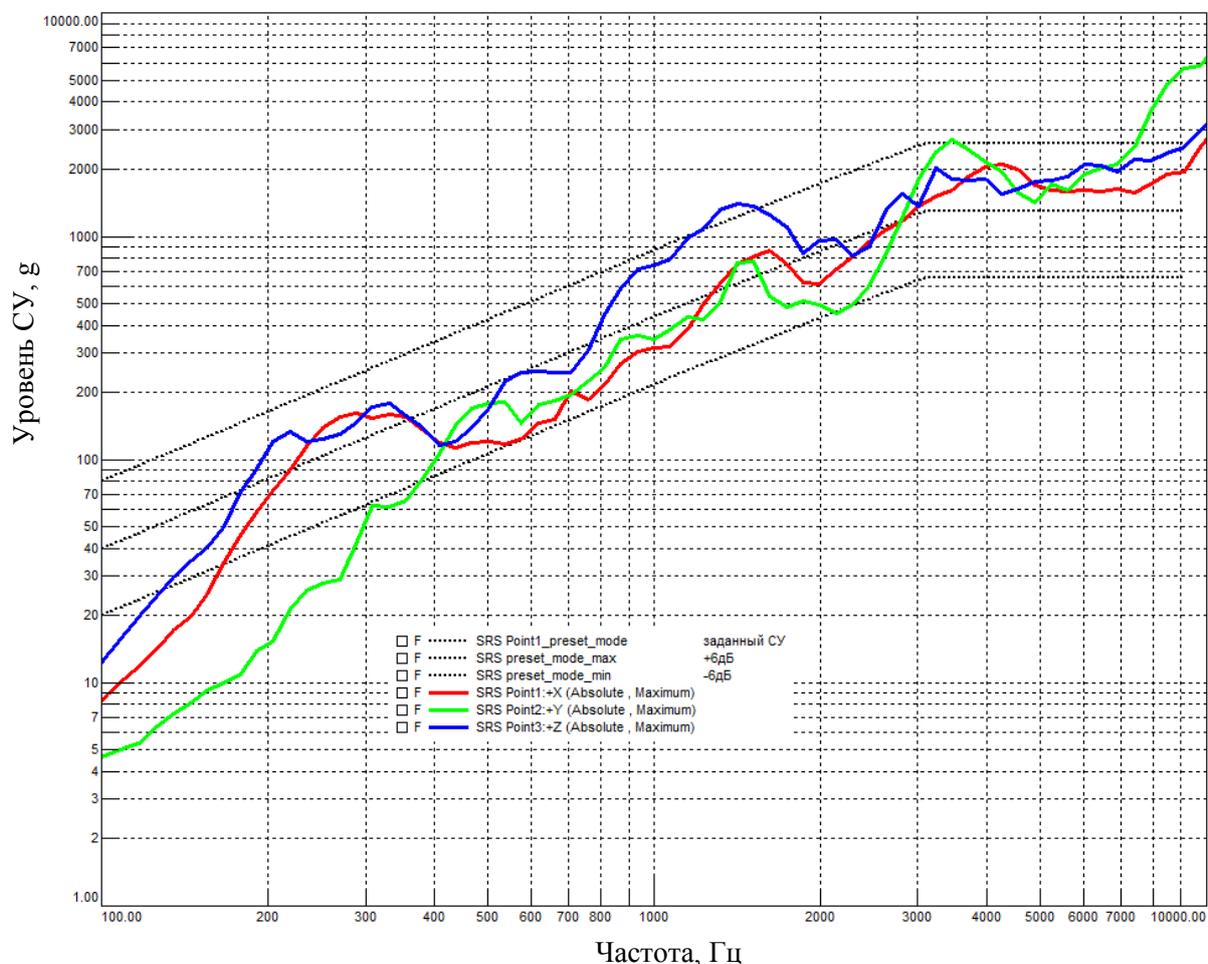


Рисунок 44 – Спектр удара при испытаниях второй группы ЛИАБ

4.3 Исследование предельной ударной стойкости герконов КА «Ионосфера»

В процессе наземной экспериментальной отработки КА «Ионосфера» было обнаружено, что после проведения функциональных испытаний по раскрытию штанги КА имел место выход из строя одного из двух герконов. Ввиду того, что функционирование герконов проверялось штатным магнитом непосредственно

до испытаний, был сделан вывод, что имел место выход из строя геркона вследствие воздействия ударной нагрузки от срабатывания пиросредства зачековки штанги.

При этом на штанге вблизи места крепления узла герконов были измерены уровни воздействия, приведенные на рисунке 45.

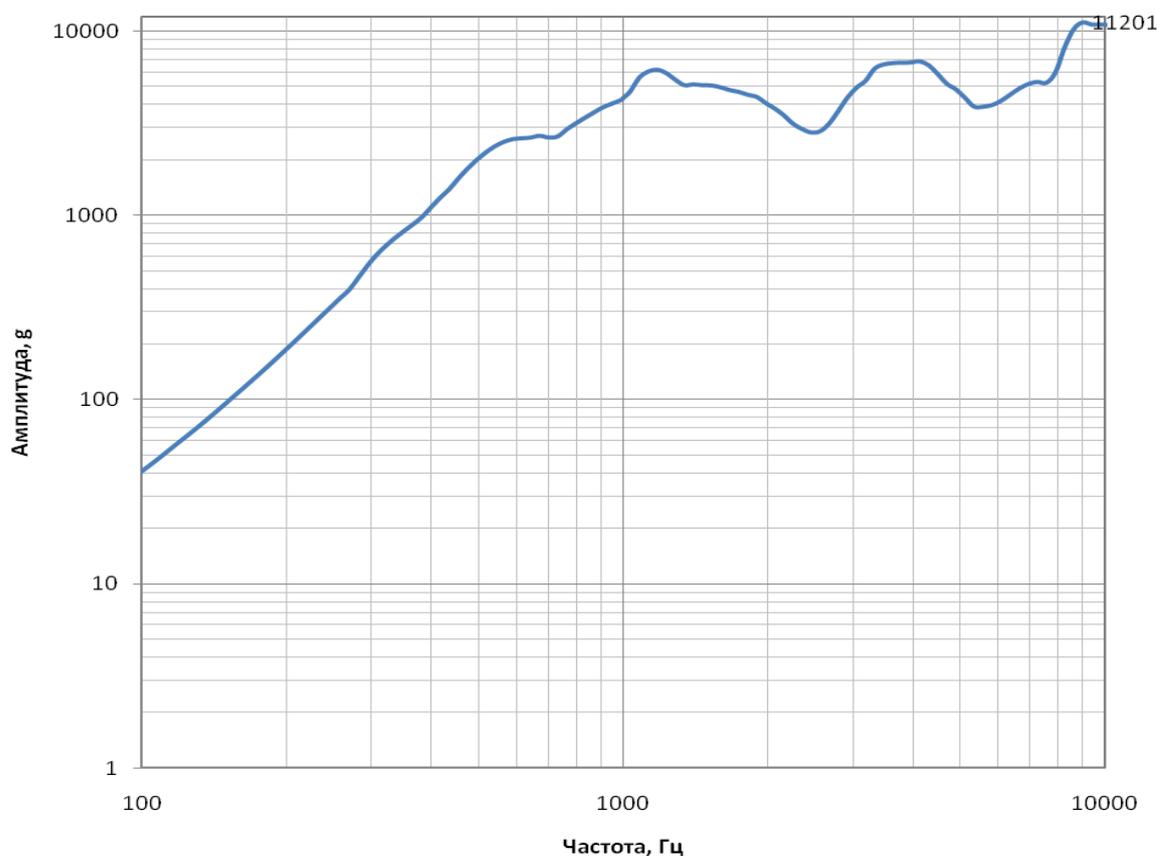


Рисунок 45 – Спектр удара по результатам измерений вблизи зачековки

Параметры СУ представлены также в таблице 11.

Таблица 11 – Параметры СУ вблизи зачековки штанги

Максимальный импульс, +/- g	Максимальные пиковые уровни СУ				
	Гц/g				
4503/-2725	100/40	1200/6000	2500/2800	4000/7000	9000/11200

Была поставлена задача: изучить влияние несоблюдения технологического процесса и различной ориентации контактов геркона на его стойкость к воздействию ударных нагрузок от пиросредств.

Для решения задачи было изготовлено 2 группы герконов типа КЭМ-2, и проведена серия испытаний на созданном стенде.

В группу А входило 5 изделий, которые в процессе монтажа были собраны с возможными нарушениями теплового режима при распайке. Группа Б из 5-ти таких же герконов была распаяна без нарушений технологии с соблюдением всех необходимых требований. Общий вид группы А представлен на рисунке 46.

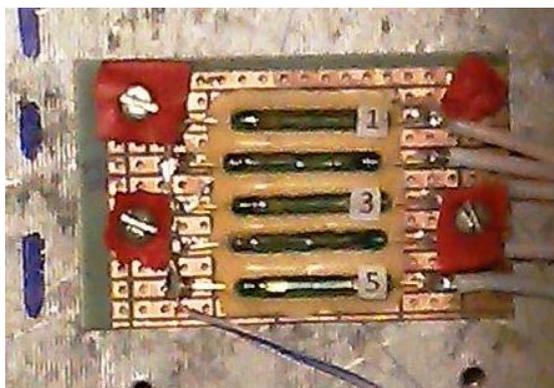


Рисунок 46 – Общий вид герконов группы А

Для герконов с №№ 1, 3, 5 в обеих группах А и Б рабочее направление движения контактов по оси Z (ориентация осей совпадает с представленной на рисунке 15), по этому же направлению и производилось возбуждение. Герконы с №№ 2, 4 обеих групп А и Б имели рабочее направление движения контактов по оси, перпендикулярной направлению воздействия (Y).

Испытания проводились с использованием разработанной типовой программы и методики испытаний:

1. Были определены несколько режимов испытаний с последовательно нарастающим уровнем СУ (относительная доля 50–75–100% от СУ таблицы 11), исходя из того, что режим испытаний по таблице 11 приведет к выходу геркона из строя. Режимы приведены в таблице 12.

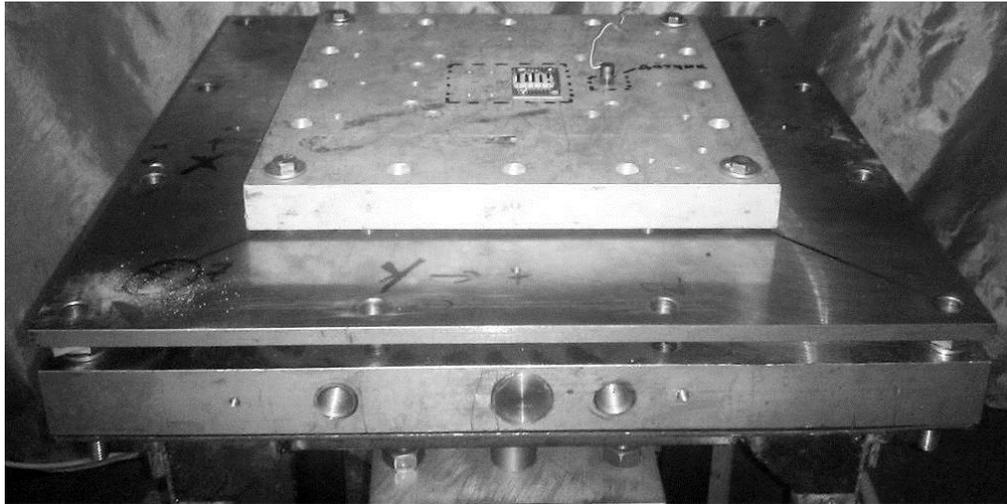
Таблица 12 – Испытательные режимы СУ

Частота, Гц	100	1200	10000
	Спектр удара, g		
Первый режим	20	3000	3500
Второй режим	30	4500	5250
Третий режим	40	6000	7000

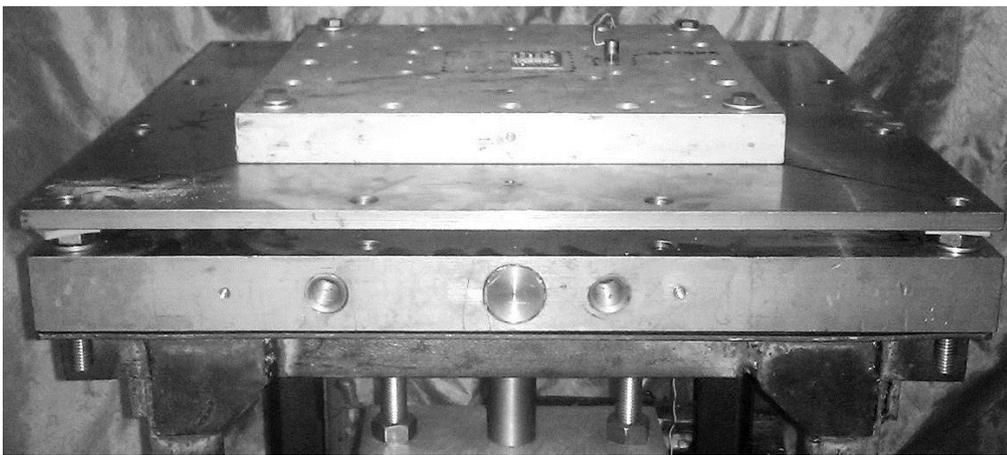
Поле допуска, установленное при испытаниях, во всем диапазоне составило ± 6 дБ. Измерения в каждом случае проводились розеткой акселерометров, установленной вблизи места крепления ОИ. Измеренный СУ имеет точку перегиба на частоте ~ 1200 Гц. Масса ОИ незначительна и ей можно пренебречь.

2. Были подобраны параметры стенда, обеспечивающие заданную точку перегиба СУ. По расчетам наиболее подходящей оказалась пластина 440x440x10.
3. Для подтверждения формы были проведены испытания частотным молотком. Поскольку существовали значительные отличия от требуемой формы СУ, были приняты меры коррекции СУ, в том числе установка дополнительной плиты стенда на специальные проставки.

Таким образом, для каждого режима нагружения была определена оптимальная конфигурация стенда с ОИ, представленная на рисунке 47. Конфигурация стенда с ОИ при втором режиме испытаний (рисунок 47, б) отличается от конфигурации первого режима (рисунок 47, а) отсутствием прокладок под верхней плитой, что позволяет уменьшить демпфирование и увеличить амплитуду удара (уровень СУ). Конфигурация режима нагружения 3 отличается от режима нагружения 2 тем, что на основной плите с помощью болтов и втулок длиной 30 мм устанавливалась плита № 1, на которой закреплялся ОИ.



а



б



в

Рисунок 47 – Схема крепления узла герконов при первом (а), втором(б) и третьем (в) режимах нагружения

4. Для подбора амплитуды виброудара был проведен расчет скорости ударника, выбраны типы патрона для каждого режима – Д4 для первого и второго, Д1 для третьего, определены параметры прокладки – из АМГб, толщиной 20мм, определены параметры камеры и требуемая форма наконечника ударника – сферическая.
5. Для каждого режима испытаний были проведены испытания оснастки без ОИ, т.к. имитирование столь малой массы не нужно ввиду пренебрежимо малого влияния ОИ.

СУ, осциллограмма с датчика по оси Z, автоспектр для каждого из режимов нагружения приведены на рисунках 48-50.

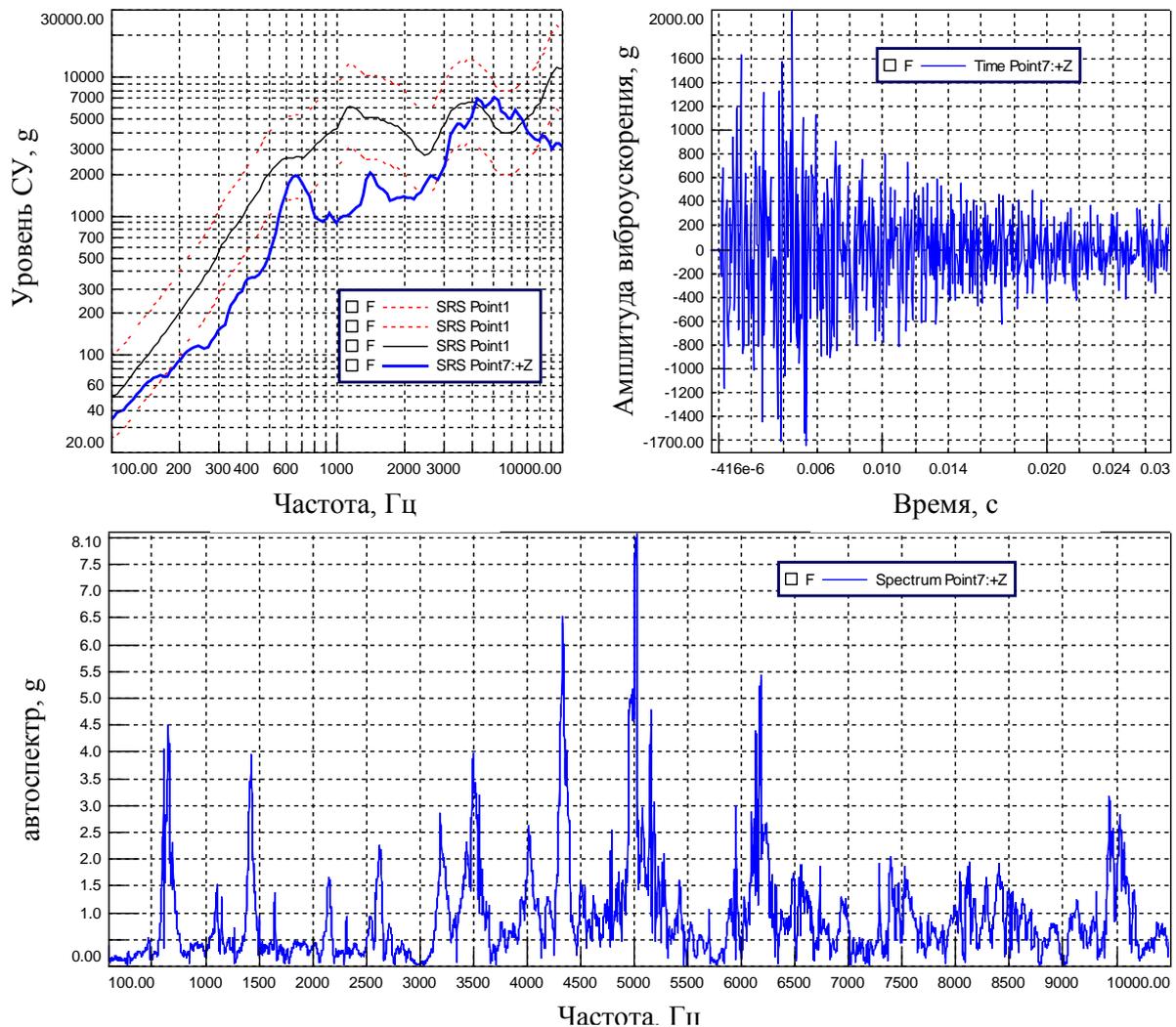


Рисунок 48 – СУ, осциллограмма, автоспектр с датчика по оси Z, для первого режима нагружения герконов группы А

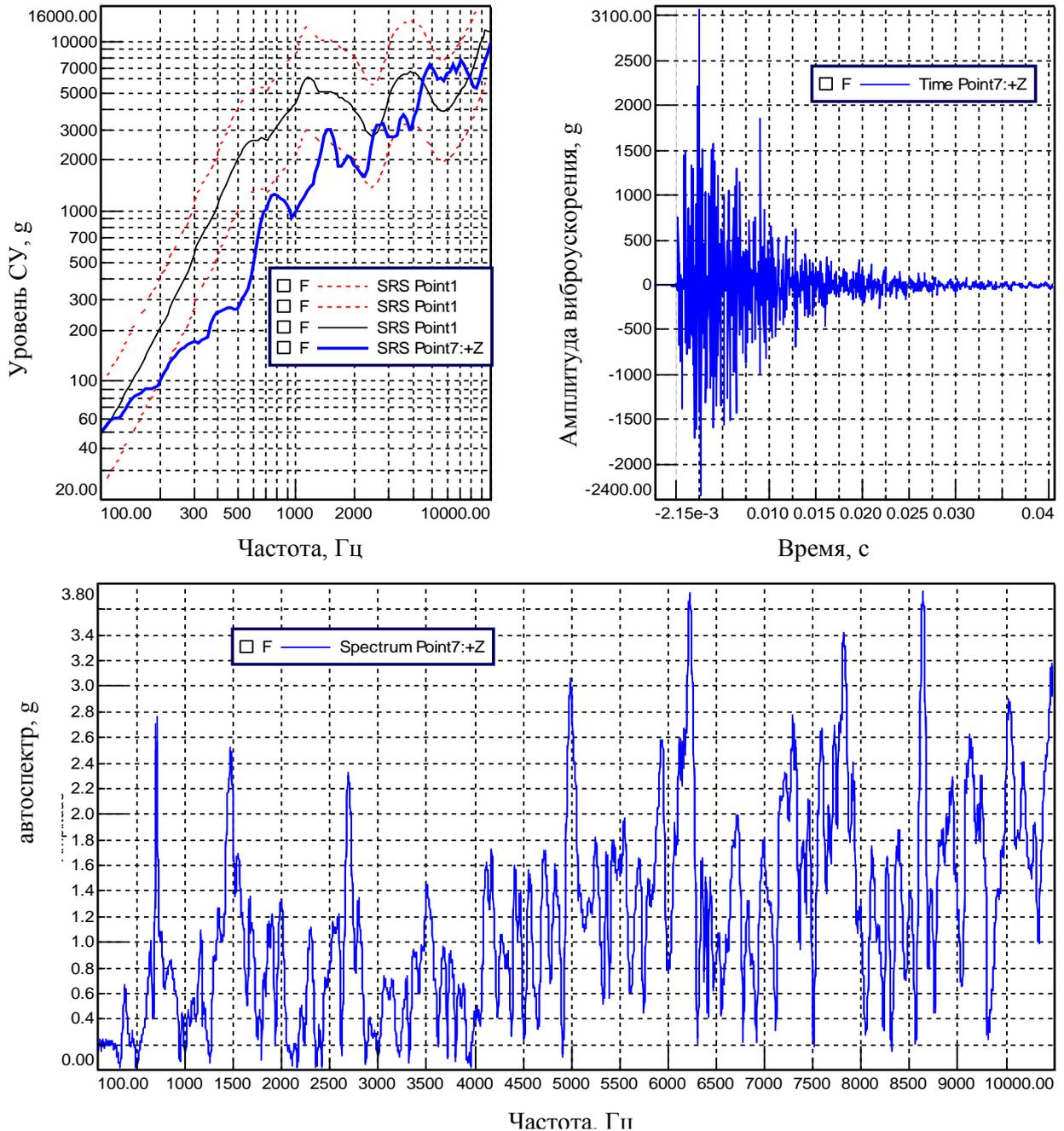


Рисунок 49 – СУ, осциллограмма, автоспектр с датчика по оси Z, для второго режима нагружения герконов группы А

б. Полученный при испытаниях СУ по всем осям в целом удовлетворял предъявляемым требованиям и был одобрен.

В отдельных частотных диапазонах полученный СУ вышел за пределы установленного поля допуска, и допустимого отклонения от него. Однако ввиду

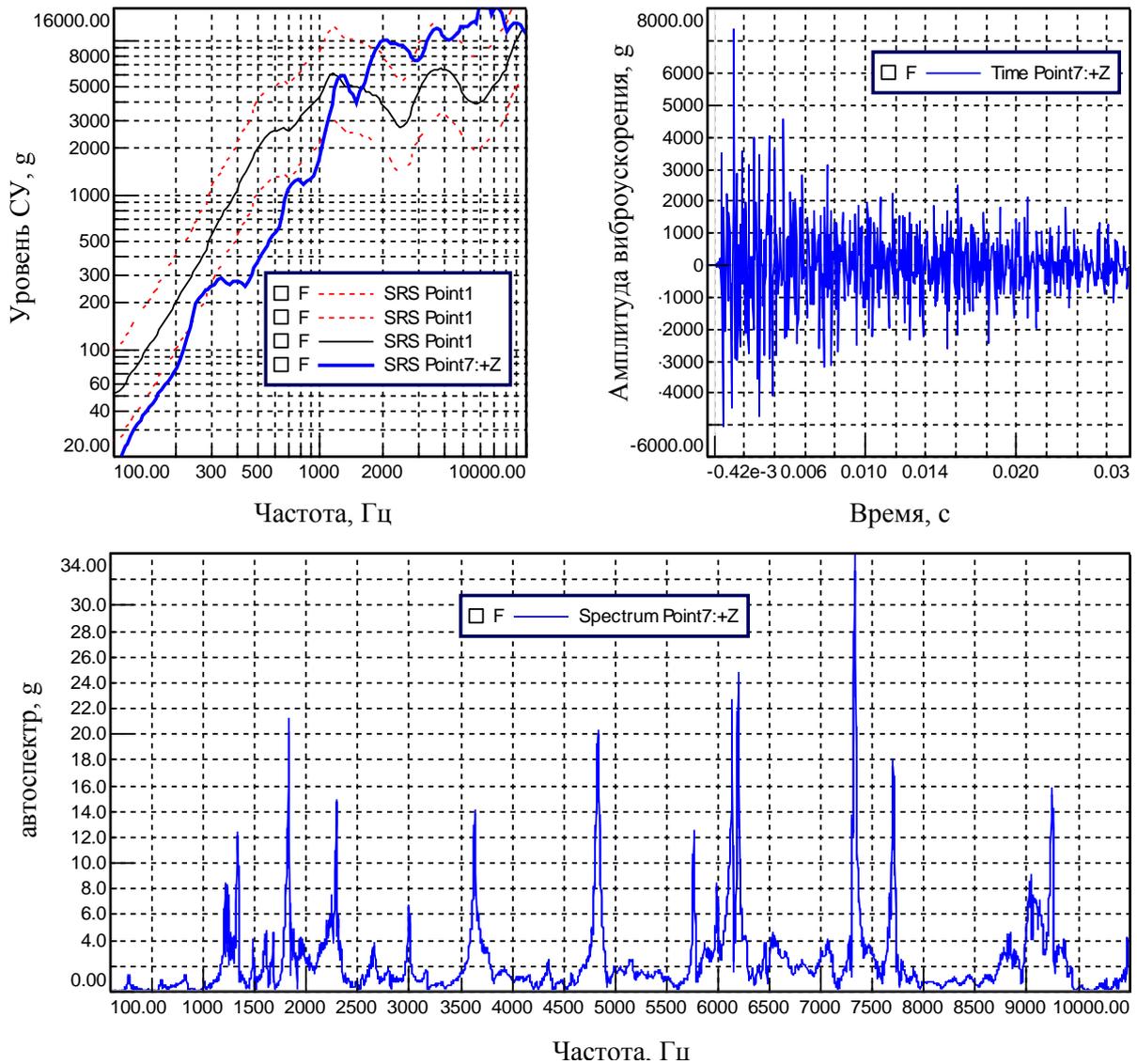


Рисунок 50 – СУ, осциллограмма, автоспектр с датчика по оси Z, для третьего режима нагружения герконов группы А

того, что данные испытания являются исследовательскими, данные режимы были утверждены и использованы для оценки ударостойкости узла герконов.

7. Были проведены испытания герконов. СУ при испытаниях и его соответствие предъявляемым требованиям представлены на рисунках выше. Пунктирной линией показаны отклонения ± 6 дБ.

После испытаний на третий режим нагружения была проведена проверка функционирования герконов: обнаружена потеря функционирования герконов №№ 3, 5. Осциллограммы их проверки приведены на рисунке 51.

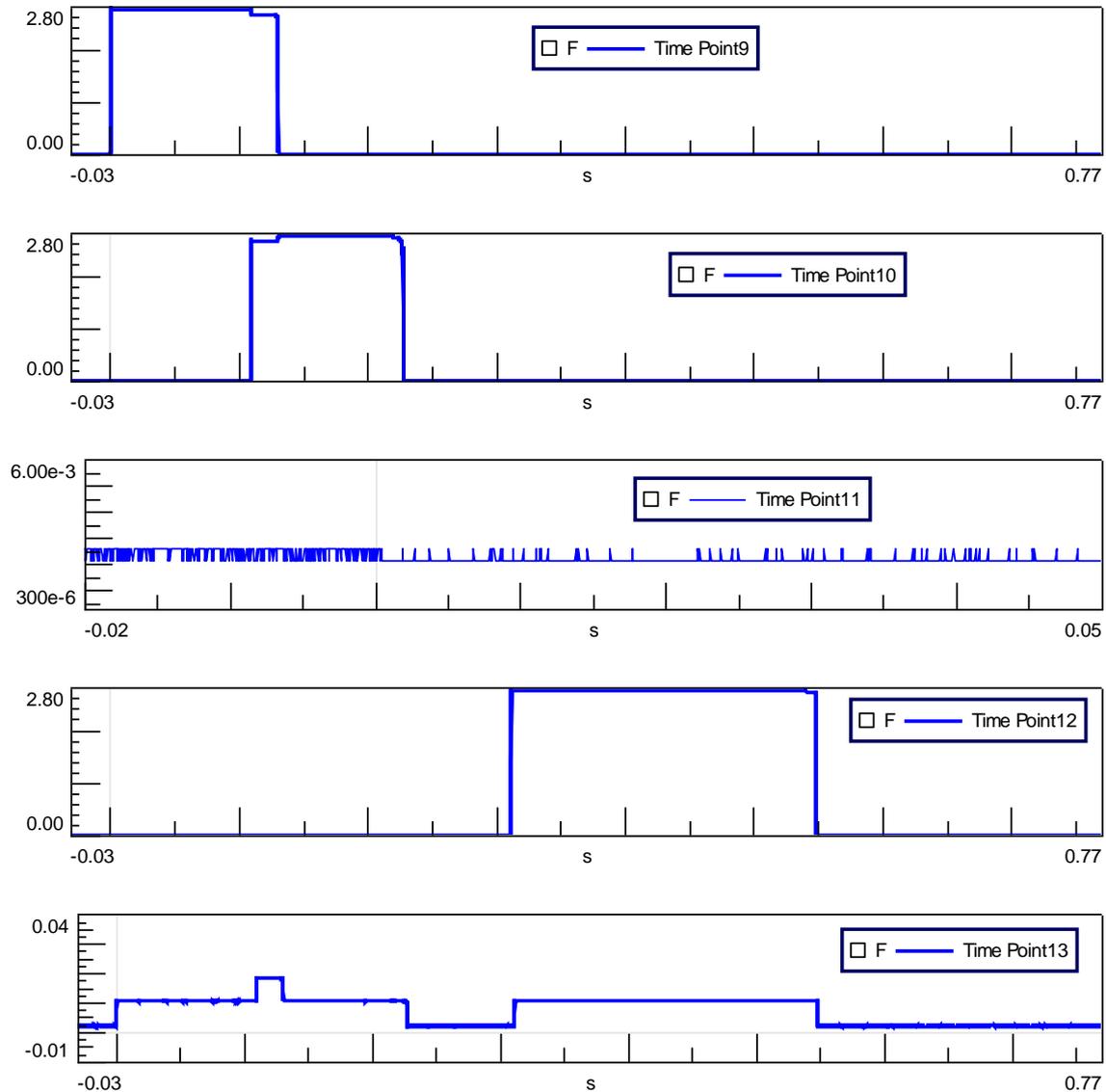


Рисунок 51 – Осциллограммы срабатывания герконов 1-5 группы А при поднесении проверочного магнита после третьего режима испытаний

Рабочее направление движения контактов вышедших из строя герконов 3,5 – по оси Z, т.е. вдоль направления, по которому производилось нагружение.

После этого в соответствии с принятой программой и методикой испытаний герконы группы А были демонтированы, и последующие испытания проводились на герконах группы Б.

Испытания на третий режим герконы группы Б прошли успешно, после испытаний все герконы функционировали штатным образом. Тогда было принято решение увеличить режим нагружения путём установки более мощного патрона Д4. Результаты испытаний герконов группы Б при режиме нагружения №4 представлены на рисунке 52.

После испытаний на четвертый режим нагружения была проведена проверка функционирования герконов: обнаружена потеря функционирования герконов №№ 1, 3, 5. Осциллограммы их проверки приведены на рисунке 53.

Рабочее направление движения контактов герконов 1, 3, 5 – по оси Z, т.е. вдоль направления, по которому производилось нагружение.

По результатам испытаний были сделаны следующие выводы:

- уровень СУ, при котором была зарегистрирована потеря функционирования герконов, близок к измеренному при проведении функциональных испытаний в составе КА;
- частотный диапазон ударной нагрузки, оказывающий наибольшее влияние на функционирование герконов, составляет от 5 до 10 кГц;
- ударостойкость герконов определяется не только их конструкцией, но и рабочим направлением движения контактов относительно направления действия ударной нагрузки. Герконы, рабочее направление движения контактов которых совпадает с направлением воздействия ударной нагрузки, обладают меньшей ударостойкостью. Герконы, направление движения контактов которых перпендикулярно направлению воздействия ударной нагрузки, испытания выдержали;
- влияние перегрева при пайке на ударостойкость герконов не обнаружено.

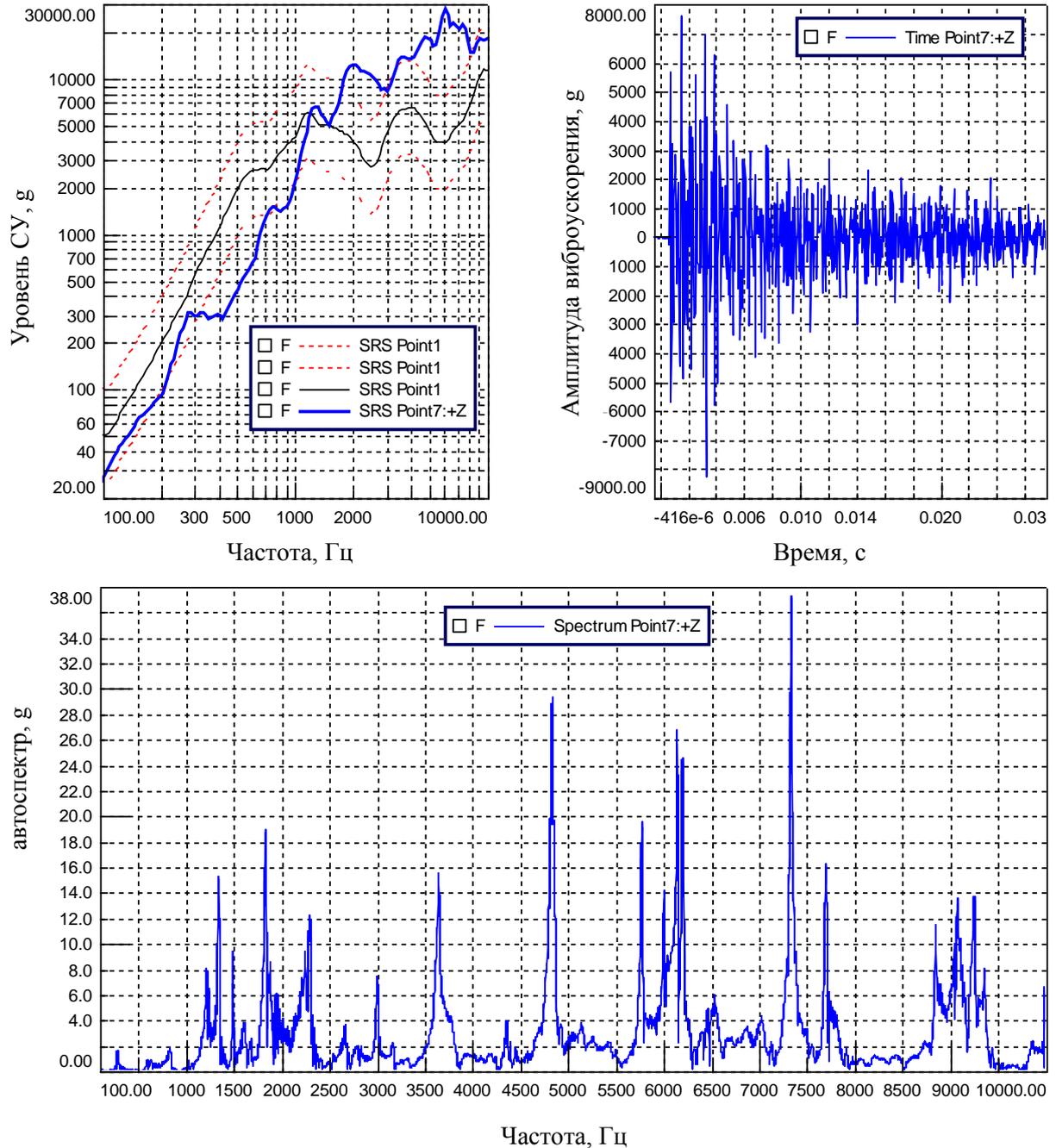


Рисунок 52 – СУ, осциллограмма, автоспектр с датчика по оси Z, для третьего режима нагружения, герконы группы Б

По результатам испытаний были разработаны рекомендации по модернизации конструкции зачеховки, с тем чтобы снизить нагрузки на узел герконов, а также рекомендации по изменению конструкции узла герконов для обеспечения его стойкости к ударным нагрузкам от срабатывания пиросредств зачеховок КА.

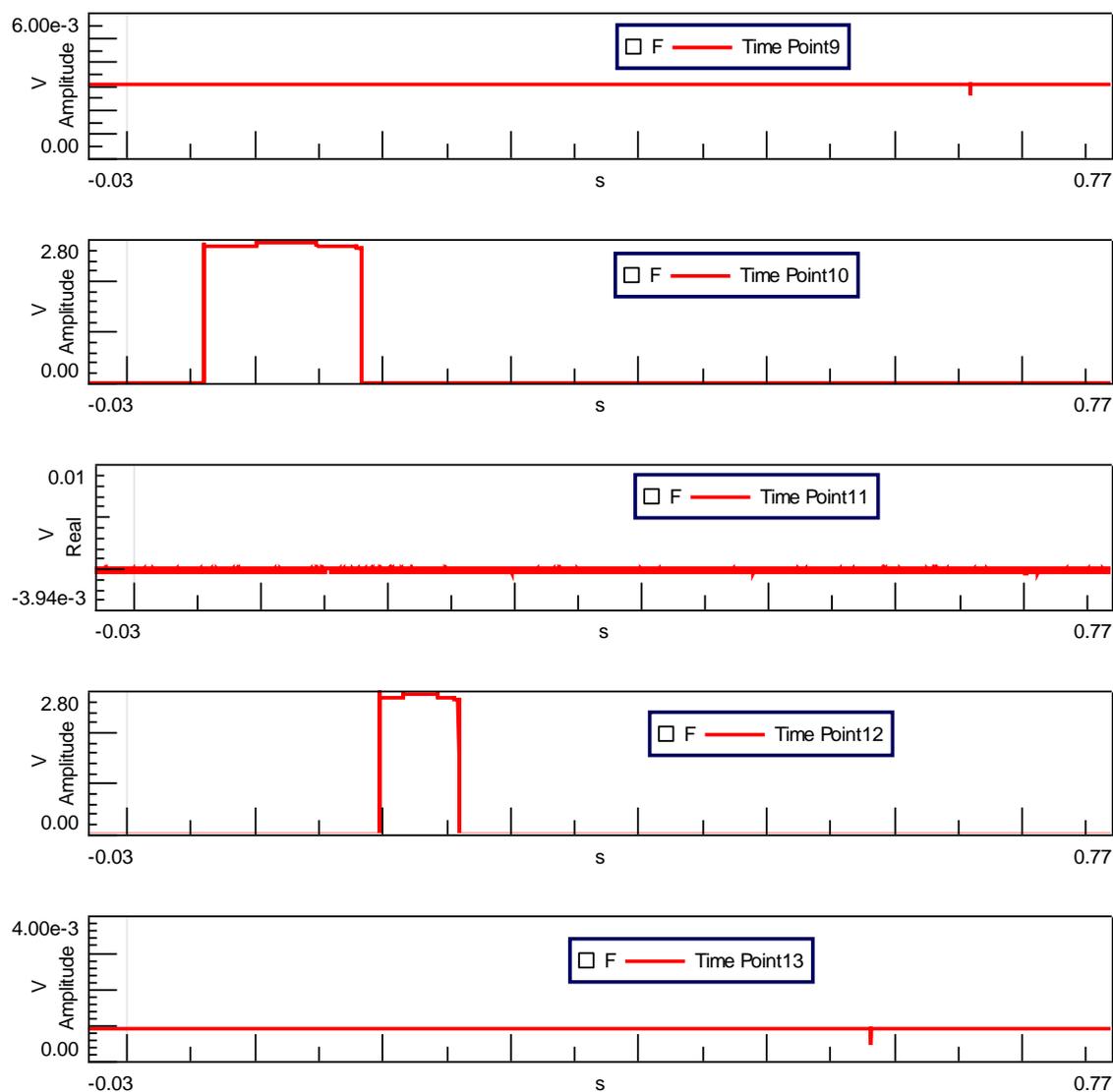


Рисунок 53 – Осциллограммы срабатывания герконов 1-5 группы Б при поднесении проверочного магнита после четвертого режима испытаний

Таким образом, на данном стенде с использованием созданной типовой программы и методики испытаний были успешно проведены исследования стойкости герконов к пиродарным нагрузкам.

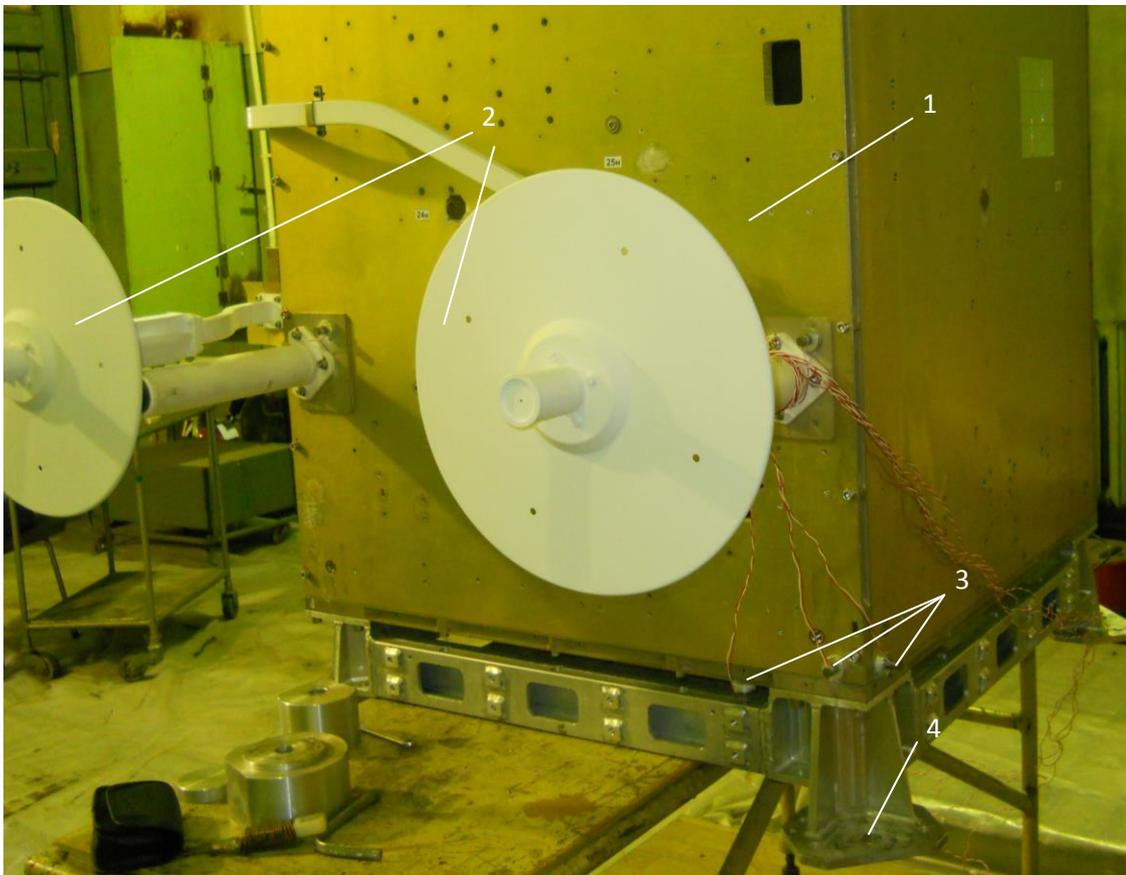
4.4 Испытания АФУ РЛЦИ КА «Канопус-В»

С использованием разработанных и применяемых в составе стенда СПУ были проведены испытания АФУ РЛЦИ КА «Канопус-В».

При испытаниях с применением опытных сборок, как было отмечено в п.3.9, считается, что форма СУ будет обеспечена использованием в качестве оснастки натурной конструкции КА, поэтому основной задачей при испытаниях является обеспечение требуемой амплитуды удара.

Сборка динамического изделия КА с испытываемой АФУ при испытаниях устанавливалась на четырех штатных фланцах на стол, и далее на силовой пол лабораторного зала. Ударные воздействия создавались на опорных элементах сборки. Контроль режима нагружения осуществлялся при помощи датчиков ускорения, установленных на силовом корпусе в непосредственной близости от точки удара.

Схема испытаний показана на рисунке 54.



1 – ДИ КА «Канопус-В», 2 – АФУ РЛЦИ, 3- ударные акселерометры, 4- место ударного воздействия

Рисунок 54 – Общий вид АФУ РЛЦИ с оснасткой (динамическим изделием КА «Канопус-В») при автономных испытаниях на стойкость к пироударным нагрузкам

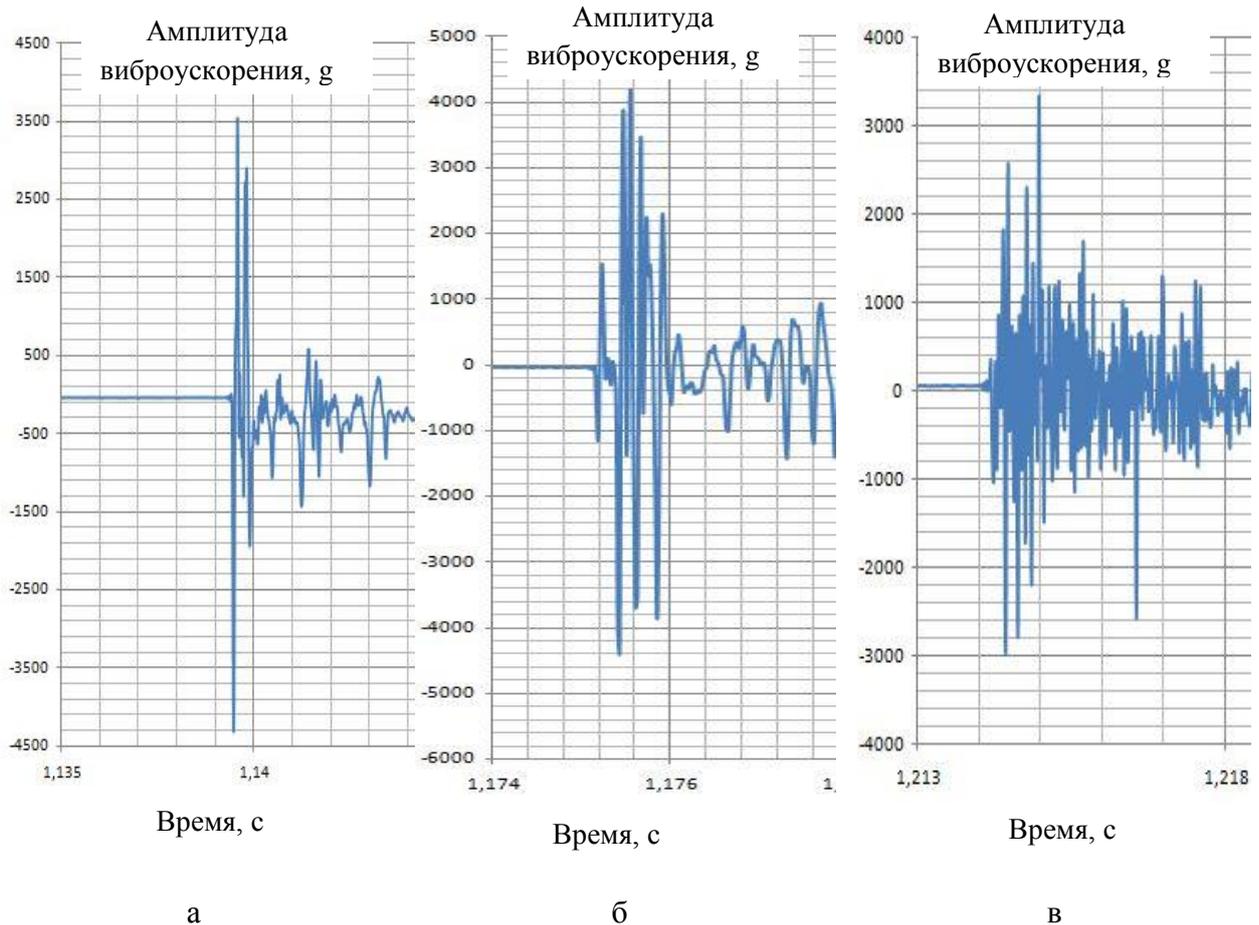
При проведении испытаний использовался мобильный ручной пироударник МПУ (рисунок 16,а).

При испытаниях использовалась адаптированная к испытаниям сборки программа и методика испытаний:

1. Испытательный режим был выбран в соответствии с рекомендациями отечественного стандарта второго блока, в качестве эквивалентной по СУ характеристики были приняты параметры одиночного импульса перегрузки – пиковое значение 3500g.
2. При использовании мобильного пироударника, созданного на базе строительного пистолета ПЦ-84, энергия удара регулируется при помощи использования промышленных патронов различной мощности (типа Д1-Д5) и подбора характеристик упруго-пластического демпфера.

Перед началом испытаний были проведены расчеты и определены оптимальная форма наконечника – сферическая, тип патрона – Д3 и параметры демпфера: материал АМгЗ, толщина 8мм. По этим параметрам проводилась настройка пироударника.

3. Были проведены отладочные испытания макета КА без АФУ. Полученная осциллограмма датчиков по осям X, Y, Z при испытаниях вдоль соответствующих осей представлена на рисунке 55.
4. Результаты отладочных испытаний положительные, было принято решение о проведении испытаний АФУ РЛЦИ КА «Канопус-В».
5. Проведены испытания АФУ РЛЦИ. Полученный режим ударных испытаний АФУ РЛЦИ КА «Канопус-В» соответствовал заданным требованиям, и по результатам испытаний ударостойкость АФУ РЛЦИ КА «Канопус-В» была успешно подтверждена.



а – датчик по оси X, б – датчик по оси Y, в – датчик по оси Z

Рисунок 55 – Осциллограмма с датчиков X, Y, Z при испытаниях вдоль соответствующих осей

Положительные результаты испытаний свидетельствуют об успешном применении входящих в состав стенда пироударников для решения задач по отработке стойкости БА с использованием опытных сборок КА. Также в этом случае применяется созданная типовая программа и методика испытаний, адаптированная к испытаниям сборок.

4.5 Выводы

Разработанное испытательное оборудование и созданная типовая программа и методика испытаний БА были успешно апробированы при решении практических задач.

Достоверность созданной программы и методики испытаний была подтверждена, с ее помощью проведены следующие типы испытаний:

- Отработочные испытания бортовой аппаратуры КА на стойкость к ударным нагрузкам;
- Исследовательские испытания ударостойкости герконов;

Входящие в состав стенда пироударники были применены для решения задач по отработке стойкости БА с использованием опытных сборок КА, в частности, при испытаниях АФУ РЛЦИ КА «Канопус-В». В этом случае была применена созданная типовая программа и методика испытаний, адаптированная к испытаниям сборок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены существующие отечественные и зарубежные нормативные документы, регламентирующие задание требований и отработку стойкости БА КА, относящейся к бортовым электротехническим комплексам или системам целевого и служебного назначения, к воздействию ударных нагрузок от срабатывания пиросредств. Рассмотрены и классифицированы все существующие способы отработки БА КА на стойкость к ударному воздействию, определен оптимальный тип стенда для автономных испытаний БА КА.
2. С участием автора разработано, аттестовано и внедрено испытательное оборудование для автономных испытаний БА КА массой до 30 кг на ударные пиротехнические нагрузки с уровнем СУ до 5000g на частоте свыше 5000 Гц – стенд с пороховым источником энергии. Проведено экспериментально-теоретическое исследование характеристик системы «стенд с объектом испытаний/ударное устройство» для обеспечения испытаний БА.
3. Разработана и апробирована типовая программа и методика испытаний БА на созданном стенде, которая позволяет проводить испытания БА КА на СУ, соответствующий нагрузкам от срабатывания пиросредств во всех принятых зонах.
4. Достоверность типовой программы и методики испытаний БА КА подтверждена при испытаниях ЛИАБ МКА «Звезда», БВМ КА «Метеор-М» №2, при исследовании ударной стойкости герконов.
5. Разработанные в составе стенда СПУ применены для испытаний БА с использованием опытных сборок КА, в частности, при испытаниях АФУ РЛЦИ КА «Канопус-В». При этом применялась созданная типовая программа и методика испытаний, адаптированная к испытаниямборок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vniiem.ru/ru> (дата обращения 11.01.2015)
2. NASA STD-7003 Pyroshock testing criteria// NASA.– 2011.
3. MIL STD 1540C. MILITARY STANDARD. TEST REQUIREMENTS FOR LAUNCH, UPPER STAGE, AND SPACE VEHICLES//Space and Missile Systems Center, SMC/SPDF, LA AFB, CA 90245-4683.– 1994.
4. ECSS-E-ST-10-03C. Space engineering. Testing//ESA Publications Division. ESTEC, P.O. Box 299, 2200 AG Noordwijk, The Netherlands. – ISSN 1028-396X.
5. ИСО 15864:2004. Системы космические. Общие методы испытаний для космического корабля, подсистем и блоков.
6. ГОСТ Р 53190-2008 = МЭК 60068-2-81:2003. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на удар с воспроизведением ударного спектра.
7. Valentekovich, V. M.: Proc. 64th Shock and Vibration Symposium, 1993, p. 92.
8. Moening, C. J.: Proc. 8th Aerospace Testing Seminar, 1984, p. 95.
9. Himelblau, H., A.G. Piersol, J. H. Wise, and M. R. Grundvig: “Handbook for Dynamic Data Acquisition and Analysis, IEST Recommended Practice 012.1, Institute of Environmental Sciences and Technology, Mount Prospect, Ill.
10. Smallwood, D.O.: Shock and Vibration J., 1(6):507 (1994).
11. Васа, Т. J.: Proc. 60th Shock and Vibration Symposium, 1989, p. 113.

12. Shinozuka, M.: J. of the Engineering of the Engineering Mechanics Division, Proc. of the American Society of Civil Engineers, 1970, p. 727.
13. Smallwood, D.O.: Shock and Vibration Bulletin, 43:151 (1973).
14. Mark, W.D.: J. of Sound and Vibration, 22(3):249 (1972).
15. Bendat, J. S., and A. G. Piersol: "Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis," John Wiley & Sons, 2d ed., 1993, p. 325.
16. Bateman, V. I., R. G. Bell III, and N.T. Davie: Proc. 60th Shock and Vibration Symposium, 1:273 (1989).
17. Bateman, V. I., R. G. Bell III, F. A. Brown, N.T. Davie, and M. A. Nusser: Proc. 61st Shock and Vibration Symposium, IV:161 (1990).
18. Valentekovich, V. M., M. Navid, and A. C. Goding: Proc. 60th Shock and Vibration Symposium, 1:259 (1989).
19. Valentekovich, V. M., and A.C. Goding: Proc. 61st Shock and Vibration Symposium, 2 (1990).
20. Czajkowski, J., P. Lieberman, and J. Rehard: J. of the Institute of Environmental Sciences, 35(6):25 (1992).
21. Anon.: "Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests," MIL-STD- 810, Method 517, "Pyroshock," Department of Defense, 1989.
22. Resor, B.: "Equipment and Techniques to Perform High Amplitude and High Frequency Shaker Shock Testing," Proc. 77th Shock and Vibration Symposium, 2006.

23. Bateman, V. I.: "Pyroshock Testing Techniques Recommended Practice," IEST-RP-DTE-032.1, Institute of Environmental Sciences and Technology, Arlington Heights, Ill., 2003.
24. Luhrs, H. N.: Proc. Institute of Environmental Sciences Annual Technical Meeting, 1981, p. 17.
25. Powers, D. R.: Shock and Vibration Bulletin, 56(3):133 (1986).
26. Bateman, V. I., and F.A. Brown: J. of the Institute of Environmental Sciences, 37(5):40 (1994).
27. Bateman, V. I., F. A. Brown, J. S. Cap, and M. A. Nusser: Proceedings of the 70th Shock and Vibration Symposium, I (1999).
28. Dwyer, T. J., and D. S. Moul: 15th Space Simulation Conference, Goddard Space Flight Center, NASA-CP-3015, 1988, p. 125.
29. Raichel, D. R.: Jet Propulsion Lab, California Institute of Technology, Pasadena, 1991.
30. Bai, M., and W. Thatcher: Shock and Vibration Bulletin, 49(1):97 (1979).
31. Davie, N.T.: Shock and Vibration Bulletin, 56(3):109 (1986).
32. Davie, N. T., Proc. Institute of Environmental Sciences Annual Technical Meeting, 1985, p. 344.
33. Shannon, K. L., and T. L. Gentry: "Shock Testing Apparatus," U. S. Patent No. 5,003,810, 1991.
34. Davie, N.T., and V. I. Bateman: Proc. Institute of Environmental Sciences Annual Technical Meeting, 1994, p. 504.

35. Bateman, V. I., L.W. Carlson, and M.A. Nussor: “A Near Field Mechanical Pyroshock Simulation,” Proc. 75th Shock and Vibration Symposium, 2004.
36. Bateman, V. I., L. W. Carlson, and M. A. Nussor: “A Unique Resonant Fixture for a Mechanical Shock Simulation,” Proc. ESTECH, 2004.
37. Jung-Ryul Leea, Chen Ciang Chiaa, Churl-Won Kong. Review of pyroshock wave measurement and simulation for space systems// Measurement, Volume 45, Issue 4 (May 2012).– P. 631-818.
38. Yongjian Mao, Yulong Li, Hanjun Huang, Junping Wang. Fast Simulation of Pyroshock Responses of a Conical Structure Using Rotation-Superposition Method// Applied Mathematics & Information Sciences – #5 (2) (2011).– P.187-193.
39. Patric L. Walter. Pyroshock explained [Электронный ресурс]. URL: http://www.pcb.com/techsupport/docs/vib/VIB_TN_23_0406.pdf (дата обращения 11.01.2015)
40. Harris’ Shock and Vibration Handbook, edited by Harris and Piersol, McGraw Hill, 5th Edition, 2002 – 1199 с.
41. Карпушин В.Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре. М.: Советское радио, 1971, - 344с.
42. Абрамович С.Ф., Крючков Ю.С. Динамическая прочность судового оборудования. Изд-во «Судостроение», Санкт-Петербург, 1967г.
43. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Теория удара в строительстве и машиностроении. Изд-во АСВ, 2006г – 336с.
44. Круглов Ю.А. ,Туманов Ю.А. Ударовиброзащита машин, оборудования и аппаратуры. Л.:Машиностроение, 1986, – с.148-149.

45. Токарев М.Ф., Талицкий Е.Н., Фролов В.А. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1984.
46. Орлов С.А., Копытов В.И. Нормирование и отработка бортовой аппаратуры космических аппаратов на механические воздействия// Вестник СИБГАУ. – 2013, №1(47).– с.125-129.
47. А. А. Хвалько, В. Г. Бутов, С. Б. Сунцов, А. А. Ящук. Комплекс механического анализа и проблема адекватности расчетных моделей бортовой радиоэлектронной аппаратуры //Материалы XIV международной конференции «Решетневские чтения» в двух частях, часть 2 – с.437.
48. Способ испытаний на ударные воздействия космического аппарата: пат. 2354950 Рос. Федерация: МПК G01M 7/08, G01N 3/313 / Орлов А.С, Орлов С.А.; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПО прикладной механики им. М.Ф. Решетнева». – №2007136333/28; заявл. 01.10.2007; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13.
49. Способ испытаний аппаратуры на механические воздействия: пат. 2377524 Рос. Федерация: МПК G01M 7/08/ Орлов А.С, Орлов С.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «Информационные спутниковые системы им. академика М.Ф. Решетнева». – №2008121794/28; заявл. 30.05.2008; опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36.
50. Способ испытаний аппаратуры на механические воздействия: пат. 2399032 Рос. Федерация: МПК G01M 7/00/ Усанов А.Ю., Орлов С.А., Орлов А.С; заявитель и патентообладатель ФГУП ФКА «ОКБ «Факел».– №2009122586/28; заявл. 11.06.2009; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 25.
51. Способ испытаний космического аппарата на ударные воздействия: пат. 2372598 Рос. Федерация: МПК G01M 7/02 / Орлов А.С, Орлов С.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «Информационные спутниковые

системы им. академика М.Ф. Решетнева». – №2008118965/28; заявл. 13.05.2008; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 31.

52. Способ испытаний космического аппарата на механические воздействия: пат. 2383000 Рос. Федерация: МПК G01M 7/02 / Орлов А.С, Орлов С.А.; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПО прикладной механики им. М.Ф. Решетнева». – №2008110756/28; заявл. 20.03.2008; опубл. 27.02.2010, Бюл. № 6.
53. Способ испытаний на ударные воздействия: пат. 2386939 Рос. Федерация: МПК G01M 7/08/ Орлов А.С, Орлов С.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «Информационные спутниковые системы им. академика М.Ф. Решетнева». – №2008133110/28; заявл. 11.08.2008; опубл. 20.04.2010, Бюл. № 11.
54. Введенский Н.Ю., Пустобаев М.В. Анализ отработки космической техники на механические воздействия в США, ЕС и РФ. // Тр. ВНИИЭМ. - 2012, №130(5). – С. 19-26.
55. Красова Н.А., Пустобаев М.В., Тютнев А.П. Отработка бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов на ударные воздействия. // Тр. ВНИИЭМ. - 2013, №132(1). – С. 27-34.
56. Грабилин А.О., Зубренков Б.И., Пустобаев М.В., Судомоев А.Д., Шматков А.В. Моделирование режимов ударного нагружения на аппаратуру КА при срабатывании пиротехнических средств разделения // Тр. ВНИИЭМ. -2014, №138(1). – С.35-42.
57. Пустобаев М.В. Экспериментально-теоретическое исследование характеристик системы «Стенд с объектом испытаний/ударное устройство» для испытаний бортовой аппаратуры // Тр. ВНИИЭМ. -2014, №141(4). – С.55-60.

58. Канунникова Е.А., Пустобаев М.В., Судомоев А.Д., Тютнев А.П. Разработка типовых методик испытаний опытных сборок КА и БА на стойкость к пиротехническим ударам// Тр. ВНИИЭМ. -2014, №140(3) С.35-40.
59. ISO 18431-4:2007. Механическая вибрация и удар. Обработка сигналов. Часть 4. Расчет спектра удара.
60. Характеристики системы отделения RUAG AG. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ruag.com/fileadmin/ruag/Divisions/Space/Products/Launcher_Structures___Separation_Systems/Adapters___Separation_Systems/PDF/PLE-Brochure-Payload-Adapter-and-Separation-Systems.pdf (дата обращения 11.01.2015)
61. ГОСТ 16504-81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
62. НПО Машиностроения. Испытательное оборудование. [Электронный ресурс] URL: <http://www.npomash.ru/press/ru/tribuna461210.htm?l=0> (дата обращения 11.01.2015)
63. PCB 350C02 Specification. [Электронный ресурс] URL: http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/products/Manuals/350C02.pdf
64. Г.С. Батуев и др. Инженерные методы исследования ударных процессов. М.: Машиностроение, 1977.
65. И.М. Бабаков. Теория колебаний. М.: Наука, 1966 г.
66. Прочность, Устойчивость, Колебания, Справочник, т.3, «Машиностроение», М-1968

67. Яблонский А.А., Никифорова В.М.. Курс Теоретической механики М. 1984г-368с

68. Steinberg D.S. Vibrations analysis for electronic equipment. N.Y. 1973

Приложение Б. Методы оценки уровней нагрузок на БА при наличии результатов испытаний прототипов или аналогов КА

В рамках реализации космических программ как в РФ, так и за рубежом был накоплен достаточно большой объем опытных данных по измерению ударных нагрузок при выведении КА на орбиту и раскрытию трансформируемых элементов КА. Несмотря на многообразие типов конструкций и видов применяемых средств разделения, подобная информация может использоваться для оценки воздействующих на БА конкретного КА ударных нагрузок. Точность оценки при этом будет тем выше, чем больше сходство конструкции заданного КА с прототипом, а также чем больше сходство применяемых пиросредств.

Данные могут быть получены как в лабораторных условиях при наземной отработке, так и измерены непосредственно при выведении КА. В последнем случае нагрузки (в т.ч. ударные), испытываемые КА при выведении на орбиту и развертывании штатных систем, должны входить в состав передаваемой с КА телеметрической информации. Отметим, что в РФ возможность получения информации ограничена и сопровождается значительными трудностями, поскольку подобная информация является собственностью предприятий-разработчиков КА и, как правило, не находится в открытом доступе.

Ввиду указанных сложностей отечественная отраслевая база данных по распределению ударных нагрузок по конструкциям КА различных типов фактически не существует, поэтому предприятия-разработчики КА руководствуются в основном лишь собственными данными, и данными разработчиков пиросредств, если таковые у них имеются.

Для оценки нагрузок, действующих на заданный КА, требуется экстраполировать данные по результатам испытаний прототипа.

Стандартные применяемые процедуры экстраполяции пироудара следующие[2]:

1. Масштабирование по общей энергии пироудара.
2. Масштабирование по расстоянию и конфигурации конструкции между источником пиротехнической энергии и интересующей точкой отклика.

Масштабирование по общей энергии пироудара

Пусть $E_{\text{п}}$ и $E_{\text{н}}$ – суммарная энергия, высвобождаемая при срабатывании пиросредства на прототипе и новом КА, соответственно. Тогда уровень СУ на всех частотах масштабируется от прототипа к новому КА по следующей формуле:

$$A_{\text{н}}(D_1) = A_{\text{п}}(D_1) \sqrt{\frac{E_{\text{н}}}{E_{\text{п}}}} \quad (\text{Б.1})$$

Где $A_{\text{н}}$ и $A_{\text{п}}$ – уровень СУ на новом аппарате и прототипе, соответственно, на том же расстоянии D_1 от пиротехнического устройства.

Формулу (Б.1) нужно применять с осторожностью. Во многих случаях увеличение энергии источника удара выше уровня, требуемого для осуществления разделения конструкции, не будет сопровождаться увеличением транслируемого удара, вместо этого ударная или взрывная волна будет генерироваться и передаваться в атмосферу или окружающий вакуум. Эта избыточная энергия может не вызвать ожидаемого увеличения отклика конструкции. Таким образом, при $E_{\text{н}} > E_{\text{п}}$, использование формулы (Б.1) может привести к прогнозированию избыточной нагрузки, при $E_{\text{н}} < E_{\text{п}}$ к недостаточной.

Масштабирование по расстоянию от источника до точки отклика

За рубежом для разных типов конструкций был получен ряд эмпирических данных, характеризующих зависимость уровня СУ от расстояния по конструкции КА между источником воздействия и точкой отклика. В результате были получены типичные кривые масштабирования, представленные на рисунке Б.1.

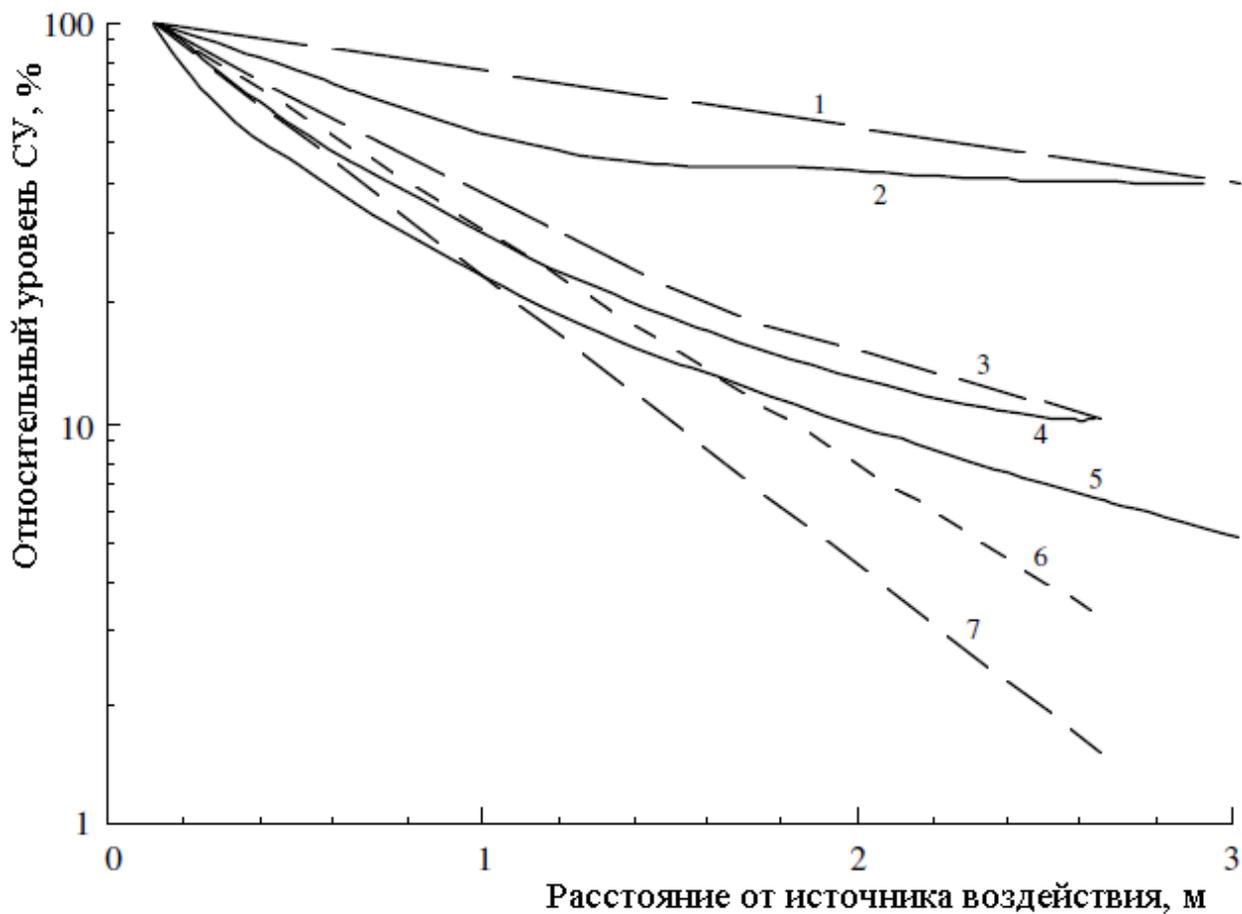


Рисунок Б.1 – Зависимость пикового уровня СУ от расстояния до источника воздействия[2]

Кривые, приведенные на рисунке Б.1, соответствуют следующим типам конструкций: 1 – сотая конструкция, 2 – лонжерон или стрингер, 3– являющиеся частью основной фермы КА, 4 – цилиндрическая оболочка,

5 – кольцевая рама, 6 – сложная конструкция крепления БА, 7 – сложный каркас КА.

Данные кривые могут применяться для оценки действующих на БА нагрузок. Для расчета существует также следующая формула:

$$A(D_2) = A(D_1) \exp \left\{ \left[-8 \cdot 10^{-4} f_n^{(2.4 f_n^{-0.105})} \right] [D_2 - D_1] \right\} \quad (\text{Б.2})$$

где D_1 и D_2 – расстояния в метрах по конструкции от источника пиротехнического удара до точки с известным уровнем СУ и оцениваемой точкой, соответственно. $A(D_1)$ и $A(D_2)$ – уровни СУ в указанных точках, соответственно. Для различных значений $\delta D = D_2 - D_1$ на рисунке Б.2 представлена зависимость отношения $A(D_1)/A(D_2)$ на частотах СУ от 100 до 10000 Гц.

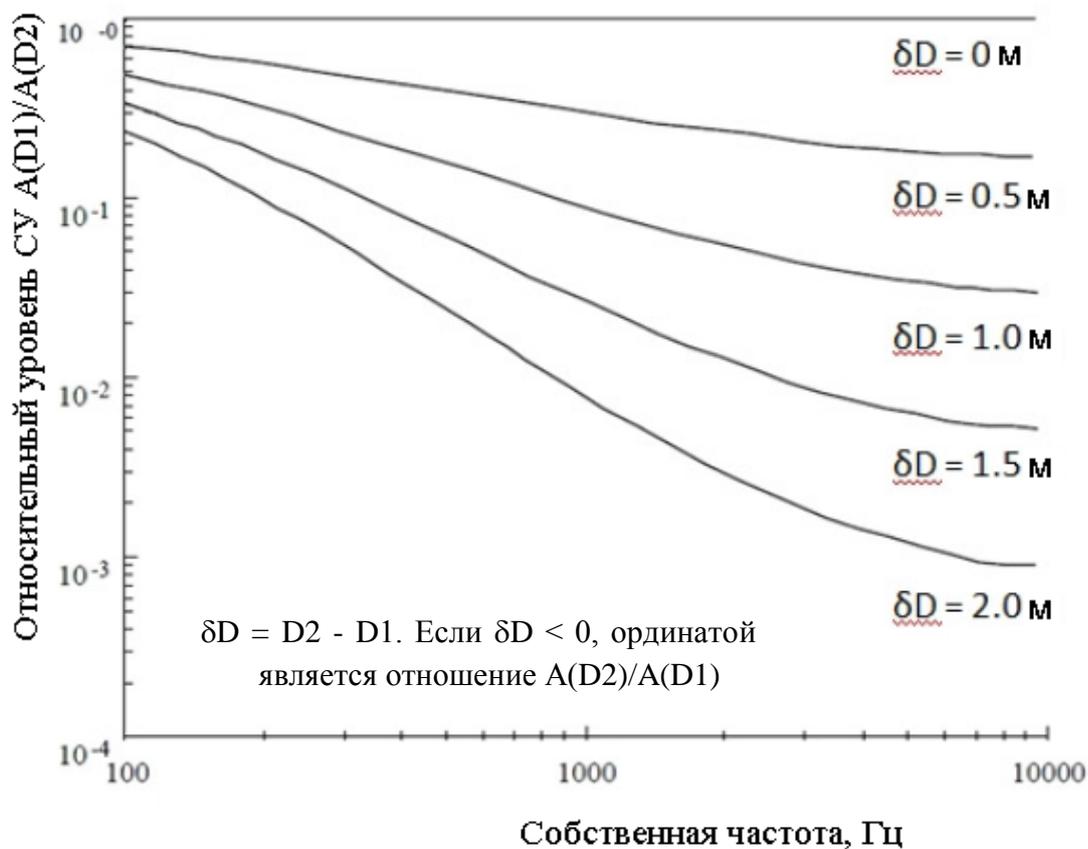


Рисунок Б.2 – Коррекция СУ в зависимости от расстояния до источника воздействия

Необходимо отметить, что формула (Б.2) получена для источника точечной формы, воздействующего на сложную конструкцию, при оценке нагрузок на уровне моря, и может быть не применима в других случаях. Из других данных можно построить аналогичные зависимости для иных типов конструкций, представленных на рисунке Б.1, более схожих с реальной конструкцией КА, ударные нагрузки на котором требуется оценить.

Дополнительно необходимо учитывать, что при прохождении стыков конструкции может наблюдаться существенное (от 20 до 75%) уменьшение СУ, что требует дополнительной экспериментальной оценки[2].

Приложение В. Результаты испытаний для подтверждения возможностей стенда

В соответствии с поставленной задачей, был выбран объект испытаний массой 30 кг, собранный из различных наборных грузов, и проведены испытания с патроном Д5. Осциллограмма и СУ при испытаниях приведены на рисунке В.1. Как видно из рисунка В.1, уровень СУ превышает 5000g на частотах свыше 5000 Гц, таким образом, стенд удовлетворяет требованиям, поставленным в постановке задачи.

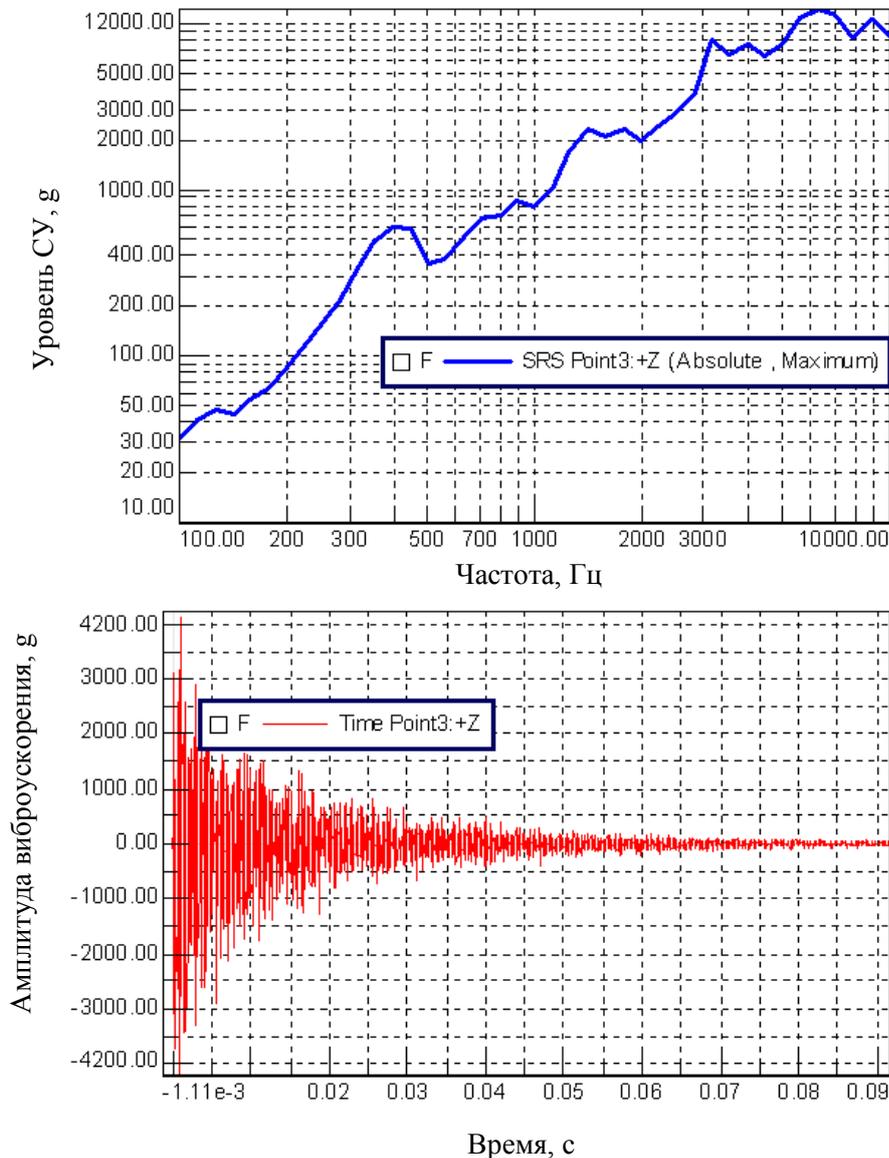


Рисунок В.1 – Спектр удара и осциллограмма при испытаниях ОИ массой 30 кг