

А. А. Макаренко, А. Н. Машенко, Е. И. Шевцов

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепропетровск

СОЗДАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ИНТЕГРАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С РАКЕТОЙ-НОСИТЕЛЕМ

О разработке в ГП «КБ «Южное» современных средств интеграции, а именно устройств крепления и отделения космических аппаратов от ракеты-носителя, которые удовлетворяют высоким требованиям современного рынка космических услуг и обеспечивают высоконадежное отделение КА с минимальными возмущениями.

Ключевые слова: средства интеграции, космический аппарат, устройства крепления и отделения, минимальные возмущения.

Комплекс пусковых услуг, предлагаемый предприятием на космическом рынке, не может быть полным без предложения средств интеграции космических аппаратов (КА) к ракете-носителю (РН). Устройства интеграции должны обеспечивать надежное крепление КА к элементам конструкции РН — адаптеру, диспенсеру, раме — и его отделение в завершающей стадии выведения КА на целевую орбиту с минимальными возмущениями.

Возможность компании разрабатывать и применять собственные устройства крепления и отделения КА является показателем ее высокого научно-технического уровня. Это объясняется высочайшими требованиями к качеству и надежности, предъявляемым к системам отделения КА. Весь самый сложный дорогостоящий комплекс работ по выведению КА в требуемую точку орбиты может окончиться неудачей из-за несрабатывания одного лишь устройства отделения. Неотделение КА может привести к огромным финансовым потерям, потере имиджа и контрактов компанией-поставщиком пусковых услуг.

Сложность создания таких устройств обуславливается необходимостью выполнения комплекса жестких, зачастую противоречивых технических требований:

- высочайшая надежность срабатывания устройств ($P = 0.9995$);
- обеспечение высокой степени чистоты околоспутникового пространства в течение полета РН и после отделения КА — класса 1000 000 (в объеме воздуха 1 дм³ должно быть не более 29 частиц размером 5 мкм);
- малый вес и габариты;
- стабильные механические свойства материалов при высокой удельной прочности;
- стойкость к внешним воздействующим факторам, таким как большие вибродинамические, статические нагрузки в процессе полета РН, условия космического полета, включающие воздействие перепадов высокой и низкой температур, вакуума, рентгеновского излучения;
- минимальный механический импульс, сообщаемый КА при отделении, позволяющий обеспечить минимальные возмущения;
- минимальное виброударное воздействие на КА и установленные на нем приборы;

- безопасность и удобство работ при интеграции КА с РН, возможность осуществить тройной контроль правильности сборочных операций;
- универсальность и возможность применения для разных по габаритам, массам и функциональному назначению КА.

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля» (КБЮ) занималось созданием средств крепления и отделения КА с момента разработки первых спутников. В качестве основного элемента устройств использовались пироболты, при срабатывании которых образовывалось большое количество механических частиц и копоти, и КА получал существенное возмущение. Тем не менее, по своим характеристикам они удовлетворяли требованиям условий применения, имели высокую надежность срабатывания и являлись образцами передовых технологий того времени.

Выход на международный рынок космических услуг показал, что в один ряд с работоспособностью устройств отделения стало требование обеспечения комфортных условий для космического аппарата, таких как малые возмущения при отделении, высокая степень чистоты околоспутникового пространства, низкие виброударные воздействия.

В соответствии с такими требованиями в КБЮ было разработано семейство современных устройств крепления космических аппаратов массой от 10 кг до 5 т.

При помощи этих устройств было выведено свыше 100 спутников различных иностранных заказчиков.

Работа по созданию устройств отделения проводилась с 1995 по 2014 гг. в три этапа.

I этап. Разработка семейства малогабаритных малоимпульсных герметичных пирозамков и пиромеханизмов с несущей способностью от 3 до 16 т (табл. 1). Основной объем работ выполнен с 1995 по 2009 гг. Совершенствование конструкции пирозамков продолжается по настоящее время.

II этап включал разработку базового варианта устройства крепления и отделения КА типа Clamp Band, которое де факто является стандартом крепления средне- и крупногабаритных

КА. В период с 2002 по 2006 гг. разработано три оригинальных варианта устройств — с цапговым запирающим узлом, крепление при помощи сегментов и при помощи бандажных полуколец (табл. 2).

Проведенный комплекс работ, включающий наземную отработку устройств, анализ возможностей изготовления на имеющейся производственной базе ГП ПО ЮМЗ и технологичности работ при сборке и установке КА, весовой анализ, сравнение надежности функционирования и живучести устройств позволил выбрать один, базовый вариант устройства — устройство крепления бандажного типа.

III этап заключался в разработке устройств крепления стандартизованных типоразмеров 937 и 1184 мм на основе выбранного на II этапе работ базового варианта для решения задач выведения конкретных КА — выведения макета полезного груза РН «Циклон-4» и для выполнения контрактов по теме «Днепр». Разработаны и успешно применены при пусках бандажные устройства крепления и отделения КА «Компсат-3А» и ASNARO по заказам южнокорейского института KARI и японской корпорации NEC (табл. 3).

В процессе создания устройств крепления и отделения был проведен большой комплекс расчетных, проектно-конструкторских работ, наземной экспериментальной отработки, комплекс работ по адаптации устройств к требованиям конкретного заказчика и отработки технологии сборки и стыковки КА.

Комплекс расчетных работ. Разработана инженерная методология проектирования пиромеханических, бандажных устройств крепления, включающая аналитические и численные методы. Созданы методики и программы расчета динамики отделения упругих полуколец, внутренней баллистики и динамики срабатывания пиромеханизмов, оценки энергетических запасов и определения уровня надежности устройств.

Комплекс проектно-конструкторских работ. На основе требований заказчиков пусковых услуг, требований к конструкции и результатов расчетов разработаны трехмерные модели устройств, проведена их увязка с адаптерами и другими

Таблица 1. Пиромеханизмы крепления космических аппаратов

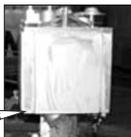
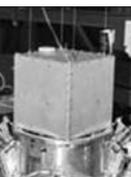
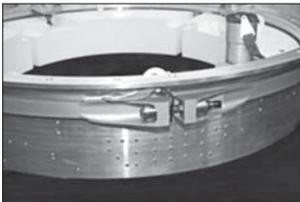
<p>Устройство крепления КА УС2001 — 00.2601.2001.0000.05.0 с допустимым осевым усилием до 12 кН, рассчитанное на воздействие как осевых, так и перерезывающих нагрузок, масса выводимого КА от 100 до 700 кг, механический импульс 3.5 Н·с.</p> <p>Успешно использовалось для отделения КА «Глобалстар», «Бауманец», «UniSat», EDUSAT, «BugSat», «SaudiSat»</p>	  <p>Крепление макета КА EDUSAT</p>
<p>Пирозамок П0005 - 00.2617.0006.0000. 02.0, допустимое осевое усилие до 160 кН, масса выводимого КА от 1000 до 5000 кг. Механический импульс 9 Н·с.</p> <p>Успешно использовался для крепления и отделения КА TRX, TEOS, платформ космической головной части «Днепр», головного обтекателя РН «Зенит-2»</p>	  <p>Крепление макета КА TEOS</p>
<p>Пирозамок П11 — 94.7955.0005.0000.53.0, масса выводимого КА от 1000 до 5000 кг. Механический импульс 9 Н·с.</p> <p>Применен для крепления специального макета КА в первом демонстрационном пуске РН «Циклон-4», для крепления обтекателя РН «Циклон-4».</p> <p>Успешно применялся для выведения КА «CryoSat-2», для разделения платформ космической головной части РН «Днепр»</p>	  <p>Крепление макета КА «CryoSat-2»</p>
<p>Пирозамок П5 — 00.5436.0008.0000.19.0, масса выводимого КА от 500 до 2000 кг. Механический импульс 3.5 Н·с.</p> <p>Успешно применялся для выведения КА «Picard», «Prisma», «NigeriaSat-2», STSAT, «DubaiSat-2», «Deimos», предусмотрен для крепления КА IRIDIUM-NEXT</p>	  <p>Крепление макета КА STSAT</p>
<p>Пирозамок П3 — 00.5436.0005.0000.06.0, масса выводимого КА от 100 до 500 кг. Механический импульс 2.2 Н·с.</p> <p>Успешно применялся для выведения КА «RapidEye», RASAT, «Сич-2», «SkySat-1», MRES, «Hodooyoshi», для крепления газодинамического экрана космической головной части РН «Днепр»</p>	  <p>Крепление макета КА «Сич-2»</p>
<p>Пирозамок-толкатель — 94.7300.0007.0000.00.0, предназначен для отделения КА с созданием необходимой осевой скорости, для стягивания и разбрасывания бандажных устройств стыковки, допустимое осевое усилие до 40 кН.</p> <p>Успешно применялся для выведения на РН «Днепр» КА ASNARO, «Компсат-3А»</p>	 
<p>Пиромеханизм крепления малых КА массой от 10 до 50 кг, усилие поджатия КА до 2 кН.</p> <p>Успешно применялся для выведения КА семейства «ApriseSat» (10 видов), «TabletSat-Aurora»</p>	  <p>Крепление макета КА «ApriseSat»</p>

Таблица 2. Варианты устройства крепления и отделения КА типа «Clamp Band»

<p><i>Первый вариант.</i> Устройство с крепления с использованием цангового запирающего узла и стальной стягивающей ленты. Имеет наибольший из всех рассмотренных вариантов вес, малую жесткость, чувствителен к температурным воздействиям</p>	
<p><i>Второй вариант.</i> Устройство крепления при помощи сегментов («сухарей»), которые обжаты стальной лентой. Имеет вес в 1.5 больший, чем в базовом варианте, меньшую жесткость, чувствителен к температурным воздействиям</p>	
<p><i>Третий вариант.</i> Устройство крепления при помощи бандажных полуколец, стянутых пирозамками-толкателями. Имеет минимальный вес, максимальную жесткость, нечувствителен к температурным воздействиям. По результатам наземной экспериментальной отработки вариант принят за базовый для дальнейшей разработки</p>	

Таблица 3. Бандажные устройства крепления КА разработки ГП КБ «Южное»

<p>Бандажное устройство крепления составного макета КА РН «Циклон-4» размера 1194 мм: масса системы 6.5 кг, максимальная масса КА — 2500 кг, максимальный габарит КА — 3 м, получило полную наземную квалификацию в 2014 г.</p>	
<p>Бандажное устройство крепления размера 937 мм КА ASNARO, разработано по заказу японской компании NEC: масса системы 5 кг, максимальная масса КА — 1500 кг, максимальный габарит КА — 2.5 м, получило полную наземную квалификацию в 2013 г., успешный пуск осуществлен в декабре 2014 г. на РН «Днепр»</p>	
<p>Бандажное устройство крепления размера 1194 мм для КА «Компсат-3А», разработано по заказу южнокорейской компании KARI: масса системы 6.5 кг, максимальная масса КА — 2500 кг, максимальный габарит КА — 3 м, получило полную наземную квалификацию в 2014 г., успешный пуск осуществлен в марте 2015 г. на РН «Днепр»</p>	

конструктивными элементами интерфейса. На базе созданных 3D-моделей выпущена конструкторская документация для производства в виде чертежей на бумаге, что позволило ускорить процесс создания непосредственно чертежей узлов и деталей, исключить ошибки несогласованности деталей и узлов сборочных единиц.

Комплекс наземной экспериментальной отработки. При разработке устройств отделения КА была разработана специальная методология наземных испытаний и проведена квалификация устройств и систем отделения космических аппаратов, позволяющая в наземных условиях с высокой гарантией подтвердить их работоспособность в условиях полета.

Комплекс наземной экспериментальной отработки включает в себя этапы:

- разработки программ и методик испытаний, в том числе с определением режимов и объема испытаний, необходимого количества измеряемых параметров;
- создание специальных стендов и рабочих мест;
- непосредственное проведение испытаний с измерением требуемого комплекса параметров;
- анализ полученных экспериментальных данных;
- корректировка конструкторской документации с учетом результатов наземной экспериментальной отработки.

Комплекс работ по адаптации разработанных устройств отделения к требованиям конкретного заказчика пусковых услуг. На этом этапе происходила разработка конкретных элементов конструкции, позволяющих осуществить непосредственно крепление КА к РН при помощи устройств, адаптеров, диспенсеров, рам, специальных кронштейнов. Сложность и трудоемкость этого этапа определяется степенью взаимодействия между разработчиками системы отделения и космического аппарата. Процесс адаптации устройств отделения был ускорен за счет применения совместимых международных систем разработки таких, как CATIA и INVENTOR.

Комплекс работ по отработке технологии сборки устройства стыковки с КА. Разработана специальная технология монтажа бандажного уст-

ройства стыковки, обеспечивающая равномерное распределение запирающих стык усилий и удобство работы в условиях как цеховой сборки, так и сборки в условиях монтажно-испытательного комплекса на космодроме. Для точной и эффективной сборки спроектировано и изготовлено специальное устройство обжатия, особенностью которого является обеспечение при помощи простых винтовых механизмов максимально равномерного распределения усилия обжатия интерфейсных узлов КА и РН. Технология обжатия была отработана при помощи специально разработанных методик.

Результаты работ. Весь этот комплекс работ позволил создать и предложить на рынке пусковых услуг семейство устройств крепления и отделения КА, состоящее из пяти видов пиромеханизмов и двух видов бандажных устройств крепления, что позволяет охватить более 90 % рынка малых КА, выводимых групповыми пусками на низкие околоземные орбиты, и успешно бороться за заказы выведения КА массой до 5 т.

Научно-технический уровень устройств соответствует, а по многим параметрам, таким как простота, технологичность и надежность, превышает лучшие иностранные аналоги. Их новизна защищена тремя авторскими свидетельствами и четырьмя патентами Украины.

Устройства внедрены на РН «Зенит-2», «Протон», «Циклон-3», «Циклон-4», «Днепр». С их использованием на РН «Днепр» выведено на околоземную орбиту более 100 космических аппаратов широкого класса — весом от 10 до 2000 кгс различных иностранных заказчиков: английских («UniSat», «RapidEye», «Deimos»), итальянских («NanoSat», «PicPot», «EduSat»), французских (THEOS, «Picard»), испанских («Deimos»), американских («Genesis», «ApriseSat», «P-Pod»), немецких («TerraSAR-X», «CryoSat»), российских («Коронас-Фотон», «TabletSat-Aurora»), Казахстана («KazEOSat»), турецких (RASAT), Арабских Эмиратов («DubaiSat», «SaudiSat»), нигерийских («NigeriaSat»), Швеции («Prisma»), корейских («KormpSat»), японских («Hodoyoshi»), голландских («Cubsat», «BugSat»), канадских («XPOD WNISat», «Brite-PL», GOMX). При этом за один пуск выводились от одного КА («TerraSAR-X»,

«CryoSat», «Genesis») до группы из нескольких КА. Пуск 2014 г. был рекордным, одной ракетой было выведено 33 космических аппарата 17 иностранных заказчиков.

Использование созданных устройств крепления и отделения запланировано в новых разработках на ракетах-носителях «Днепр», «Циклон-4», «Зенит», «Маяк».

Стаття надійшла до редакції 09.09.15

А. О. Макаренко, О. М. Мащенко, Є. І. Шевцов

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

РОЗРОБКА СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ІНТЕГРАЦІЇ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ З РАКЕТОЮ-НОСІЄМ

Про розробку в ДП «КБ «Південне» сучасних засобів інтеграції, а саме пристроїв закріплення та відділення космічних апаратів, які відповідають високим вимо-

гам сучасного ринку пускових послуг та забезпечують високонадійне відокремлення КА з мінімальними збуреннями.

Ключові слова: засоби інтеграції, космічний апарат, пристрої закріплення та відділення, мінімальні збурення.

А. А. Makarenko, А. N. Mashchenko, E. I. Shevtsov
Yuzhnoye State Design Office, Dnipropetrovsk

THE DEVELOPMENT OF MODERN MEANS OF SPACECRAFT INTEGRATION WITH A LAUNCH VEHICLE

The article overviews experience of the SDO “Yuzhnoye” in the development of modern means of spacecraft integration with a launch vehicle, namely the spacecraft attachment-detachment devices that meet the requirements of present-day launch services market and provide a high-reliability spacecraft separation with minimal disturbances.

Key words: means of spacecraft integration, spacecraft, attachment-detachment devices, minimal disturbances.