

6. А.Ю. Вишняков, Н.В. Мелешкин, И.А. Юрина. Расчетная схема атмосферной ударной трубы для изучения процессов кумуляции энергии. // Сб. аннотаций конференции «Научная сессия МИФИ 2009» т.1 «Ядерная физика и энергетика» М., 2009., с. 160.
7. А.С.Барышев, А.Б.Георгиевская, Д.Н.Замыслов, Е.Е.Мешков, К.Н.Панов, П.В.Хуторной. Ударная труба с газодинамическим подогревом драйвера.// Сб.Трудов межд. конф. XVII Харитоновские Тематические Научные Чтения. Саров, 23-27 марта 2015 г. с.815- 818.
8. Rayleigh L. Phil.Mag. 34, 94, 1917
9. Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. //Изд. «Наука», Москва, 1966г
10. G.Guderley//Luftfahrtforschung, 19, 302, 1942
11. С.В.Бондаренко, А.Б.Георгиевская, Д.Н.Замыслов, И.С.Калинин, В.А.Клевцов, Г.Б. Красовский, Е.Е.Мешков, И.А.Новикова, Л.Л.Огородников, В.В. Руденко. Гидравлическая модель цилиндрической имплозии.//Физ. образование в ВУЗах, т.22, №2, 2016, сс.85-94.
12. Е.Е.Мешков. Рэлей, Гудерлей и Леон Огородников.// АТОМ, №65, с. 41-46, 2015.
13. Майер В. В. Кумулятивный эффект: учебные исследования. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 208 с.
14. М.Д.Камчибеков, Е.Е.Мешков, Е.М.Грязева, И.А.Новикова «Экспериментальное исследование гидродинамической модели цилиндрической имплозии» // Международная конференция «XIX Харитоновские тематические научные чтения», сборник тезисов докладов, Саров 17-21 апреля 2017 г. с.215.
15. Е.И.Забабахин. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск, 1997г., с.200
16. Е.И.Забабахин. Письма в ЖЭТФ, т.30, вып.2, с.97-99, 1979
17. А.Б.Георгиевская, Е. М. Грязева, А. Г. Иоилев, М. Д. Камчибеков, Е. Е. Мешков, Р.В.Мокрецов, А. В. Немцева, А. С. Репин, И.Р.Смагин, А.Д.Шамшин. Неустойчивость кумуляции цилиндрической имплозии. //Физ. образование в ВУЗах, т.24, №3, с.124-132, 2018
18. В.М.Бельский, Е.Е.Мешков, А.А.Точилина. Модель ударной волны// Сб. аннотаций Научной Сессии НИЯУ МИФИ 2012. Т.3, с.105.
19. Georgievskaya A.B., Krasovsky G.B., Meshkov E.E., Ogorodnikov L.L., Tochilina A.A. Hydrodynamic Models of Plane and Converging Cylindrical Shock Waves. // Book of Abstracts, IUTAM symposium 12-3 "Waves In Fluids:Effects Of Non-Linearity, Rotation, Stratification And Dissipation". Moscow, June 18-22, 2012, p. 81.
20. С.В.Богомолв и др. Математическое моделирование.Т.14. №3. С.103, 2003.

КМОП ФОТОПРИЕМНИК ФОРМАТА 256×128 ЯЧЕЕК ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ИЗ 16 КАДРОВ С ИНТЕРВАЛОМ ДО 50 нс

Д.В. Бородин, Ю.В. Осипов, Ю.А. Барсуков

ООО "РТК ИНПЕКС", Мытищи, Россия

Значительный прогресс в многокадровых системах регистрации быстропротекающих слабоконтрастных процессов возможен при создании специализированной компонентной базы, в частности матричного многокадрового быстродействующего КМОП фотоприемника, позволяющего регистрировать десятки и более быстрых кадров.

Ранее нами был создан прототип КМОП фотоприемника с 8 быстрыми кадрами "F-8" формата 128×64 ячеек размером 40×40 мкм [1], а на его основе - макет камеры [2]. Использование

макета в ИПФ РАН (Нижний Новгород), ИФВ РЯЦ-ВНИИЭФ (Саров), ООО Видеоскан (Москва) не только подтвердило заявленные временные параметры, но позволило получить новые физические результаты по динамике плазмы, локальным электрическим пробоям в ударно-нагруженных диэлектриках и др. [3-4].

Разработанная КМОП фотоматрица "FR-16" позволяет регистрировать 16 кадров формата 256×128 пикселей с межкадровым интервалом до 50 нс и минимальной экспозицией каждого кадра до 10 - 20 нс. Увеличение числа кадров и формат изображения, уменьшение размера ячейки до 29×29 мкм удалось достичь в том числе и благодаря переходу на отечественную КМОП технологию с 6 слоями металлизации и нормами проектирования 180 нм.

Каждая ячейка фотоматрицы содержит входной узел накопления фотозаряда и 16 узлов выборки и хранения сигнала. Конструкция фотодиода в ячейках оптимизирована для регистрации излучения с длиной волны 0,4 - 0,45 мкм с квантовой эффективностью до ~80%. Филл-фактор 33%. Появление технологии микролинз позволит модернизировать фотоприемник, увеличив филл-фактор на 20 - 30 %. Поскольку размеры фоточувствительной области в ячейках больше, чем глубины расположения фоточувствительной структуры, проблемы применения микролинз, связанные с ограничением угла падения излучения, минимальны.

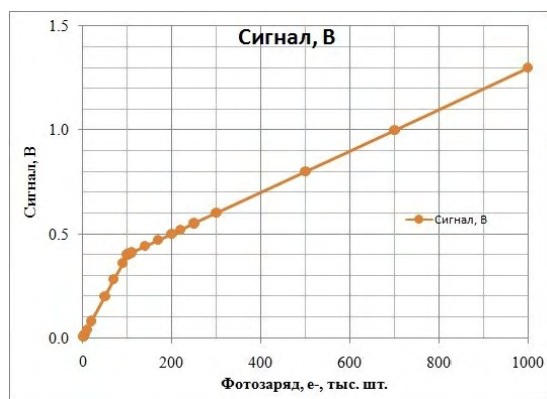


Рисунок 1а. Пример светосигнальной характеристики с "перегибом" при фотозаряде 100 тыс.е-. Отношение чувствительностей на линейных участках 4:1

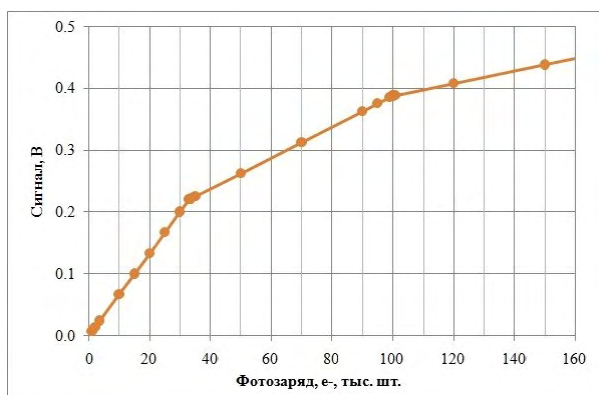


Рисунок 1б. Начальный участок характеристики с двумя "перегибами"

Максимальная зарядовая емкость в ячейке достигает 1200 тыс. электронов, что позволяет регистрировать слабоконтрастные объекты при сигналах близких к максимальному с шумом, определяемым флуктуациями самого излучения. При этом в оптически плотных областях изображения, где сигнал мал, из-за большой емкости накопления доминирующим оказался бы (кТС) шум микросхемы с шумовым зарядом $Q_{кТС} = e \times N_{кТС} = (kTC)^{1/2}$, где e -заряд электрона, $N_{кТС}$ -количество шумовых электронов, k -постоянная Больцмана, T -абсолютная температура, C -емкость накопления. Необходимое уменьшение вклада (кТС) шума для малых сигналов и одновременное сохранение большой максимальной зарядовой емкости позволяет светосигнальная характеристика "с перегибом"(рис.1), причем реализованная не путем уменьшения времени накопления в ячейках с большим сигналом, как в [5, 6], а за счет разделения емкости накопления на две емкости $C1$ и $C2$ и накопления фотозаряда сначала на меньшей емкости $C1$, а по ее заполнению - на обеих емкостях ($C1+C2$), аналогично [7, 8]. Увеличение динамического диапазона происходит не в сторону больших экспозиций, а за счет минимальных экспозиций.

Если, например, "перегиб" характеристики установлен на величине фотозаряда в 100 тыс. е- (отношение $C1/(C1+C2) \sim 1:10$), то (кТС) шум микросхемы при малых сигналах (до 100 тыс.е-) составит ~90е- и не превысит шума потока 8 тыс. фотоэлектронов, то есть за счет большего коэффициента преобразования заряда в напряжение для малых сигналов на емкости $C1$,

суммарный поток фотозарядов, при котором их шум сравнивается с (кТС) шумом микросхемы (8 тыс. е-) в три раза меньше аналогичного потока для схемы без "перегиба" (рис.2). Еще большее ослабление влияния собственного шума возможно в схемах с двумя и более "перегибами" (рис.3).

Тем самым, если ячейка фотоприемника оказалась в области изображения с малым сигналом, то у нее "работает" емкость С1, обеспечивая прием сигнала до 100 тыс. фотоэлектронов, но с большей чувствительностью. Если в области с большим сигналом, то автоматически "работают" обе емкости С1 и С2, обеспечивая прием ~ 1 Ме-. Динамический диапазон превысит 80 дБ.

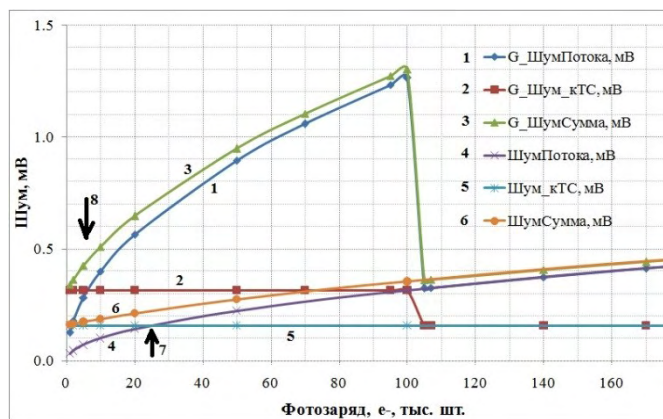


Рисунок 2. Шумовое напряжение определяемое: флуктуацией фотопотока; (кТС) шумом; их сумма - для схемы "с перегибом" (кривые 1, 2, 3 соответственно) и обычной схемы (кривые 4, 5 и 6 соответственно). Стрелки 7 и 8 соответствуют накопленному фотозаряду в 25 тыс. е- и 8 тыс. е-, при котором сравниваются шум (кТС) и шум потока для двух вариантов схемы

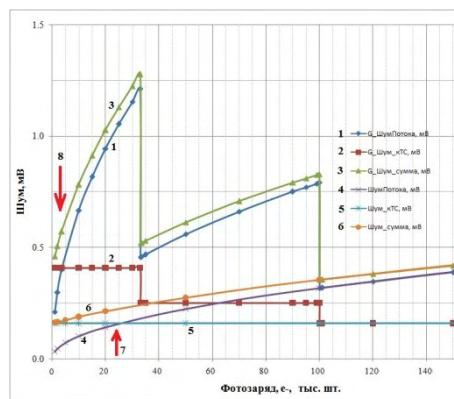


Рисунок 3. Аналогичные рис. 2 зависимости, но для схемы с двумя "перегибами". Стрелки 7 и 8 соответствуют накопленному фотозаряду в 25 и 4 тыс. е-, при котором сравниваются шумы (кТС) и потока

В схеме предусмотрена возможность внешнего управления процессом записи кадров (управление экспозицией и межкадровым интервалом индивидуально для каждого кадра). Если часть выборок использовать для хранения "темновых" кадров, то возможна реализация ДКВ во внешних устройствах. Фотоматрица позволяет постоянно вести запись кадров, циклически перезаписывая новый кадр взамен самого старого, с остановкой процесса по внешнему синхросигналу.

Микросхема должна найти применение в системах регистрации быстропротекающих процессов и ударных взаимодействий, рентгеновской радиографии, в частности послужить прототипом приемника для полноформатного регистратора быстропротекающих гидродинамических процессов методом импульсной протонной радиографии [9]. Действительно, в многокадровых системах регистрации протонографических изображений в настоящее время используют двухкадровые модули с электроно-оптическим затвором и ПЗС регистраторами, которых для регистрации последовательности из, например, 32 кадров потребуется 16 штук, сфокусированных на один объект наблюдения. Громоздкость такого комплекса отягощается проблематичностью его совершенствования, прежде всего увеличения разрешения или размера изображения из-за небольшого (18 - 25 мм) диаметра ЭОП и ограниченности его квантовой эффективности ($\eta \sim 20\%$). ООО "РТК Инпекс" и ООО "Видеоскан" разработали проект комплекса, который всего двумя-четырьмя модулями обеспечивает все текущие требования к комплексу регистрации и имеет хорошие перспективы по усовершенствованию без существенных технологических ограничений. Принципиальным в проекте является использование специализированных КМОП фотоматриц, аналогичных разработанной "FR-16", каждая ячейка которых способна регистрировать элементы изображения в последовательности из необходимого

количества быстрых кадров (например, 32 кадров). Для этого размеры ячейки должны составлять ~ 30 - 50 мкм, что позволяет, во-первых, разместить необходимую схему, и, во-вторых, увеличить филл-фактор FF. В итоге, с учетом оптимизации спектра поглощения фотоприемника в ячейке под спектр излучения объекта наблюдения, произведение $\eta \times FF$ достигает 30 - 40%, а использование микролинз дополнительно увеличит филл-фактор на 20 - 30 %.

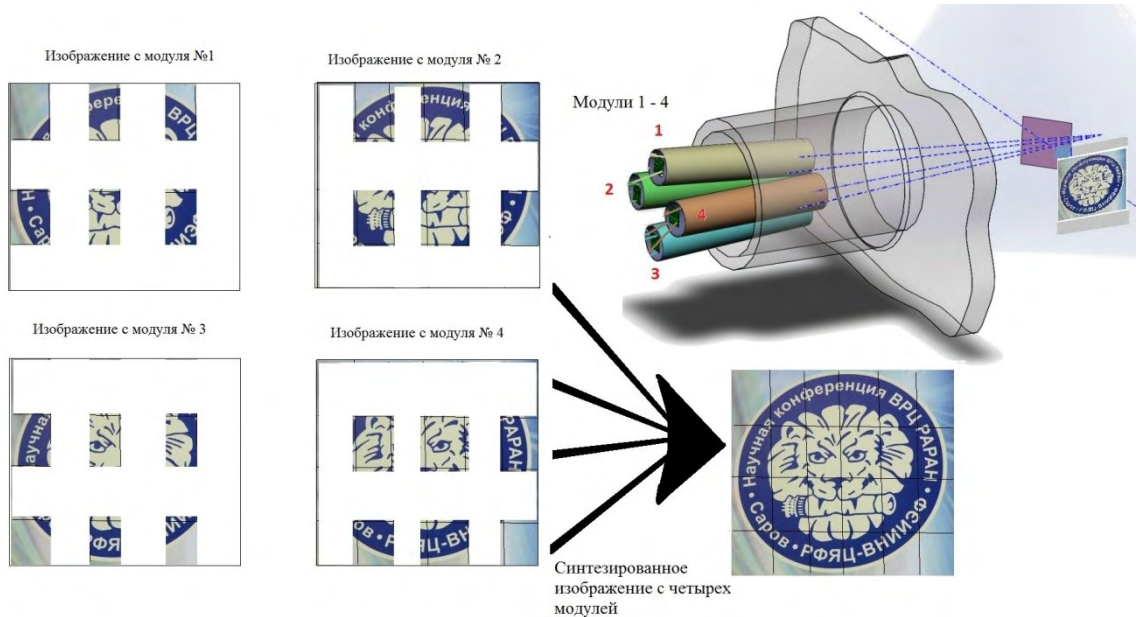


Рисунок 4. Четырех модульный протонографический комплекс

Увеличенный размер ячейки позволяет использовать более длиннофокусные объективы, расположив их ближе к источнику или, увеличив диаметр линз, сохранить светосилу, что увеличит сбор излучения от источника. Увеличение диаметра и размера фокальной плоскости объектива мы не считаем принципиальным ограничением с точки зрения оптики, особенно с учетом монохромности источника излучения.

Определенные сложности возникают при изготовлении фотоприемной фокальной плоскости большого размера. При ячейке фотоматрицы ~ 50 мкм и формате изображения 2000 × 2000 пикселей размеры фокальной плоскости достигают 100 × 100 мм. Известны два способа ее заполнения фотоэлементами:

А) путем топологической сшивки отдельных модулей фотоматрицы при ее изготовлении фактически в одну большую микросхему. Помимо организационно-финансовых проблем (необходимо несколько комплектов фотошаблонов; не отработанность технологии сшивки такого формата; слабо прогнозируемый выход годных и др.) в этом варианте будет крайне затруднительным быстрое управление фотоэлементами по шинам длиной 100 мм.

Б) мозаичная или черепичная сборка фокальной плоскости из отдельных фотомодулей. При этом на каждом стыке модулей теряется, как правило, 1 - 2 строки и столбца.

Нами предложена конструкция синтезированной фокальной плоскости, получаемой путем сшивки изображений с четырех (или двух) оптических модулей, каждый из которых содержит только примерно на четверть (половину) заполненную ячейками фокальную плоскость (рис. 4 - случай четырех модулей). Фокальная плоскость каждого модуля собирается из одинаковых фотоматриц удобного в производстве формата (например 400 × 300 ячеек), установленных так, чтобы зазор между фотообластями соседних (как по горизонтали, так и по вертикали) матриц был на несколько ячеек меньше формата единичной фотоматрицы (например, 390 × 290 ячеек). В зазорах между матрицами располагаются схемы управления. Четыре модуля фокусируются на объект со сдвигом на размер фотообласти так, чтобы изображения с модулей дополняли друг друга,

а из-за меньшего, чем фотообласть зазора, и перекрывались на краях, что позволяет программно сшить эти четыре изображения в одно. Фактически технологические проблемы создания одной безззорной фокальной плоскости заменяются четырехкратным тиражированием одного описанного модуля.

При разработке КМОП фотоматрицы можно предусмотреть их безззорное расположение на кремниевой пластине по одной из осей. При удовлетворительном выходе годных кристаллов, когда на пластине годные чипы будут образовывать группы по ~5 расположенных в ряд штук, уже из таких групп можно создавать модули. Таких модулей потребуется только два.

В настоящее время нами проработан 32-кадровый вариант, с максимальной зарядовой емкостью более 1 Ме-, минимальным межкадровым периодом не более 100 нс, минимальной экспозицией 20 нс, проекцией пикселя на сцинтилляционный экран 100×100 мкм, оптическим расстоянием от сцинтилляционного экрана до плоскости установки матриц 4 метра. Конверсионная эффективность регистратора n (отношение фотоэлектронов в ячейке приемника к количеству квантов исходного излучения на сцинтилляторе), при прочих равных условиях (энергии кванта исходного излучения, параметрах сцинтиллятора, коэффициенте пропускания оптики) определяется светосилой объектива $(D/f)^2$, коэффициентом увеличения M и $\eta \times FF$:

$$n \sim (D/f)^2 \times M^2 \times \eta \times FF,$$

что дает существенный выигрыш за счет увеличения квантовой эффективности и коэффициента увеличения. Так с объективом светосилой как в ЭОП+ПЗС комплексах, конверсионная эффективность до 100 раз превысит аналогичный показатель для ЭОП+ПЗС комплексов и может достичь 100 фотоэлектронов на протон, а динамический диапазон превысит 80 дБ. Использование схем с тремя "перегибами", с двойной коррелированной выборкой (ДКВ) для дополнительного подавления (кТС) шума, позволит существенно снизить собственный шум КМОП регистратора (до 10-20 е-). При этом, если ограничиться достаточной для регистрации отдельных $P+$ величиной $n \sim 25-50$ е-/P+, для всего комплекса потребуется только один объектив (что устранил триангуляционные искажения) с последующим светоделиением на 2 или 4 фотоприемных модуля.

Можно заключить, что проект протонографического комплекса на основе специализированных КМОП фотоматриц перспективен как по основным техническим параметрам, так и по компактности-экономичности. Кроме того, этот проект импортнезависим, его ключевые компоненты (микросхемы фотоприемников, оптика) могут быть спроектированы и изготовлены в России. В целом, значительный прогресс в создании систем регистрации быстрых процессов возможен при переходе от использования схем общего применения к созданию специализированной компонентой базы, в частности разработанного матричного многокадрового быстродействующего КМОП фотоприемника "FR-16".

Список литературы

1. Д.В.Бородин, Ю.В.Осипов, В.В.Васильев., В.П.Майоров, М.С.Сёмин, И.М.Сёмин. 3D КМОП фотоматрица видимого диапазона и быстродействующая камера на ее основе. Труды XXIV Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, АО «НПО «Орион», 24-27 мая 2016 г. с.348-350.
2. <http://videoscan.ru/page/888>
3. M. E.Viktorov, S.V.Golubev and A.V.Vodopyanov. The dynamics of supersonic plasma flow interaction with the magnetic arch. Plasma Phys. Control. Fusion 61 (2019) 035001. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aaf68f>.
4. http://www.videoscan.ru/store_files/products/videomig/videomig_info_2.pdf
5. Д.В.Бородин, Ю.В.Осипов, В.В.Васильев. Отечественные матричные КМОП фотоприемники. Труды НИИСИ РАН, 2017 г, т. 7, №2, С.74-77.

6. П.А.Кузнецов, И.С.Мощев. Расширение динамического диапазона коротковолновых ИК матричных фотоприемных устройств. Прикладная физики, 2017 г., №5, С. 52-58.
7. Д.В.Бородин, Ю.В.Осипов, В.В.Васильев. Микросхема КМОП-фотоприемника видимого диапазона формата 1280×1024 с размером ячейки 13×13 мкм. Прикладная физика, 2016, № 2, С. 76-81. <http://appliedphys.orion-ir.ru/appl-16/16-2/PF-16-2-76.htm>
8. Д.В.Бородин, Ю.В.Осипов, В.В.Васильев. Эффективное использование динамического диапазона КМОП фотоматриц и проблемы его расширения. Вопросы радиоэлектроники. Серия "Техника телевидения", 2016 г., № 4, С. 40-47.
9. В.В.Бурцев, А.И.Лебедев, А.Л.Михайлов и др. Многокадровая протонография - метод исследования быстропротекающих гидродинамических процессов. Физика горения и взрыва, 2011 г., Т.47, № 6, С. 16 - 28.
10. А.Роуз. Зрение человека и электронное зрение. Москва, Изд. "Мир", 1977 г., 216 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ СТВОРКИ ОБТЕКАТЕЛЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

А.Ю. Луценко, Д.К. Назарова, Д.М. Слободянюк

МГТУ имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Рассматриваются аэродинамические характеристики (АДХ) модели створки головного обтекателя с применением средств пассивной стабилизации. Проведены эксперименты в дозвуковой аэродинамической трубе по определению балансировочных углов атаки, на которых численно получены значения аэродинамического качества. Проведено сравнение рассмотренных вариантов стабилизации.

Ключевые слова: аэродинамические характеристики, ракета-носитель, створка головного обтекателя, моделирование обтекания, пассивная стабилизация, ANSYS CFX.

Введение. Одной из причин рассеивания точек падения отделяемых конструктивных элементов ракет-носителей (РН), таких как створки головного обтекателя (ГО), является наличие ненулевого аэродинамического качества при балансировочном угле атаки. Это обусловлено тем, что створка имеет форму тонкой изогнутой поверхности с относительно малой массой [1-3], а также отсутствием средств стабилизации. Вследствие этого на Земле выделяют специальные районы падения, размеры которых занимают большую площадь и требуют дорогостоящего обслуживания [4]. Задача поиска средств уменьшения площадей районов падения створок ГО РН очень актуальна [5,6], но в настоящий момент исследована недостаточно.

Для минимизации районов падения створок ГО возможно применение различных парашютных систем:

- 1) воздушно-космическая парашютная система, обеспечивающая ориентированный вход в плотные слои атмосферы, гашение гиперзвуковой скорости, а также снижение теплового нагружения [7];

- 2) парашютная система, состоящая из тормозного парашюта и парашюта-крыла для спасения створок головного обтекателя в воздухе [8];

- 3) парашютная система, состоящая из тормозного парашюта и основного купольного парашюта, предполагающая спасение створок головного обтекателя в море [8].