

Принципы построения наземных испытательных комплексов для исследования помехоэмиссии электроракетных двигателей

А.П. Плохих, Н.А. Важенин

Аннотация

Статья посвящена вопросам разработки принципов построения испытательных комплексов, предназначенных для исследования в наземных условиях помехоэмиссии электроракетных двигателей (ЭРД). На основе анализа существующей отечественной и зарубежной экспериментальной базы выявлены общие требования и предложены новые подходы к проектированию моделирующих стендов, предназначенных для решения практических задач в интересах обеспечения электромагнитной совместимости ЭРД. Даются рекомендации по построению и приводятся варианты технической реализации испытательных комплексов нового поколения для исследования помехоэмиссии ЭРД различных типов.

Ключевые слова

космические аппараты; электрические ракетные двигатели; электромагнитная совместимость

Введение

Как известно [1], в условиях космического пространства наличие плазменных струй электроракетных двигателей (ЭРД) приводит к сложным процессам поглощения, рефракции и дифракции электромагнитных волн, используемых в связных и радиолокационных каналах. Кроме того, в общем случае присутствует собственное электромагнитное излучение ЭРД, воздействующее на бортовые системы, как через внешнюю среду, так и через внутренние кабельные линии. Естественно, что указанные эффекты должны количественно учитываться при проектировании космических аппаратов (КА), что требует разработки методов и средств для лабораторного исследования радиофизических свойств ЭРД и их плазменных струй в наземных условиях.

В настоящее время в ракетно-космической отрасли накоплен большой опыт по отработке радиотехнической аппаратуры в условиях наземных полигонов, оснащенных специализированными безэховыми камерами (БЭК). На таких полигонах выполняются

практически все виды радиоизмерений, в частности измерения параметров антенн, характеристик рассеяния радиолокационных целей, испытания радиотехнических комплексов различного назначения на электромагнитную совместимость (ЭМС) и т.д. Измерения производятся при нормальном атмосферном давлении в предположении, что в условиях полигона реализуются электрофизические свойства «свободного пространства». Плазменные ускорители и ионные инжекторы, а также ЭРД на их основе [2] не могут пройти традиционную аттестацию непосредственно в обычных БЭК. Проблема заключается в том, что, во-первых, принцип работы этих устройств основан на инжекции неравновесной плазмы в безвоздушное окружающее пространство, а во-вторых, искусственная плазменная среда, обладающая индивидуальными электрофизическими свойствами и являющаяся источником излучения (за счет различных типов неустойчивостей), комплексно воздействует на электродинамические характеристики самого КА и его радиосистем. Все это предъявляет дополнительные требования к условиям испытаний ЭРД и метрологии при проведении радиофизических исследований. Вышеуказанное относится и к вопросу исследования помехоэмиссии ЭРД в наземных условиях, который представляют собой важную научно-техническую задачу, до конца не решенную в настоящее время.

Обзор экспериментальных стендов для исследования помехоэмиссии ЭРД

Учитывая, что нормальная работа источников плазмы возможна в вакууме не хуже 10^4 торр, для проведения радиофизических измерений необходимо обеспечить как требуемую безэховость (фиксированный уровень паразитных отражений в измерительном объеме), так и необходимый уровень вакуума. Это может быть достигнуто разными способами. Так, в качестве первых шагов в этом направлении известен метод прямого моделирования при инженерных испытаниях японского спутника для ETS III [3]. В стандартной атмосферной безэховой камере устанавливался ЭРД, к соплу которого пристыковывалась компактная вакуумная камера из «радиопрозрачного» материала (пластик, стекло), соединенная с откачной системой, расположенной вне безэховой камеры. Измерения электрических и магнитных полей, создаваемых двигателем, производились стандартной аппаратурой при атмосферном давлении. Несмотря на хорошее методическое и метрологическое сопровождение, полигоны этого типа не получили широкого распространения из-за высокой стоимости и трудности оценки погрешностей, связанных с влиянием «радиопрозрачных» стенок вакуумной камеры на характер распространения радиоволн и на динамику истечения плазменной струи в замкнутом объеме.

В начале 1990-х годов в период выхода на международные рынки российских ЭРД интерес к этой проблеме активизировался, и законодателем в области измерений стал

исследовательский центр НАСА им. Льюиса (Lewis Research Center). Исследования собственного излучения ЭРД проводились по упрощенной схеме в металлических вакуумных камерах без поглощающих покрытий (Рисунок 1) с использованием специально подготовленной аппаратуры [4].

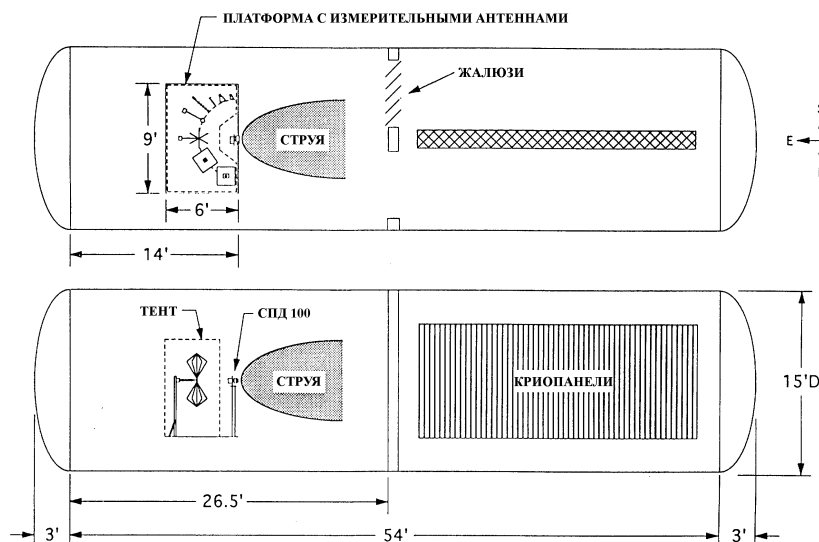


Рис.1. Испытательный стенд

При этом ЭРД устанавливался по оси вакуумной камеры, а измерительные антенны, перекрывающие исследуемый частотный диапазон, - в задней полусфере двигателя на расстоянии 1м от центра его сопла (за основу взяты нормативы стандарта измерений электромагнитной совместимости (ЭМС), например, MIL-STD-461B). Не критикуя явные недостатки такого подхода (наличие отражений от металлических стенок вакуумной камеры), отметим, что на подобных стендах за несколько лет прошли испытания практически все модели коммерческих ЭРД (в том числе и российских), а полученные результаты послужили основой их квалификационных характеристик. Сам факт того, что шумы ЭРД, фиксируемые по этой схеме измерений, как правило, удовлетворяли стандартам ЭМС США для внеполосных помех (MIL-STD-461B и MIL-STD-462), не вызвал необходимости совершенствования методики измерений, которая в таком виде используется разработчиками ЭРД и сейчас.

В ряде задач, связанных с исследованием прохождения радиоволн при наличии искусственных плазменных образований (ИПО), создаваемых, например, плазменными струями ЭРД, необходимо количественно оценивать такие известные физические эффекты как поглощение, отражение и рассеяние радиоволн. С учетом большого динамического диапазона изменения характеристик электромагнитных волн при этих процессах, адекватное измерение таких эффектов возможно только в безэховых вакуумных камерах (БЭВК).

В этом случае вакуумная камера имеет стенки, покрытые радиопоглощающими материалами (РПМ), не влияющими на качество вакуума, а измерения электрических и магнитных полей производятся в вакуумной среде [5]. Однако в условиях вакуума обеспечить требуемую безэховость затруднительно как из-за отсутствия широкополосных поглощающих покрытий (перекрывающих весь измерительный диапазон), так и из-за нестабильности их свойств в вакууме (обильное газовыделение).

Характеристики БЭВК зависят от нескольких факторов, основные из которых - форма, размеры и качество применяемого РПМ. При этом следует учитывать следующие специфические ограничения:

- цилиндрическую форму типовых вакуумных камер;
- ограниченность рабочего объема камеры производительностью откачной системы;
- применение РПМ, совместимых с вакуумом.

Основные принципы построения БЭВК были реализованы на базе установки У-2В, входящей в состав экспериментальных стендов МАИ [6]. Первоначальный вариант установки У-2В был предназначен для исследования стационарных плазменных двигателей (СПД) на газовом рабочем теле с мощностью до 5 кВт и разрядным напряжением до 1000 В. Установка состоит из вакуумной камеры с системой откачки, систем подачи рабочего тела, электро- и водо-обеспечения и приборно-измерительного комплекса контроля технологических параметров. Цилиндрическая вакуумная камера диаметром 2 м и длиной 6 м изготовлена из немагнитной стали, имеет охлаждаемые стенки и снабжена двумя шиберными затворами. В камере обеспечивается вакуум $\sim 10^{-5}$ торр - при неработающем изделии и не хуже 2×10^{-4} торр в режиме работы ЭРД. Внешний вид установки представлен на рисунке 2.



Рис.2. Экспериментальная установка

С учетом размеров камеры, в качестве рабочего был выбран сантиметровый диапазон длин волн. В качестве РПП было применено отечественное радиопоглощающее покрытие (РПП) типа Дон-18, обеспечивающее в диапазоне длин волн 3...50 см коэффициент отражения – 10...20 дБ.

Основу БЭВК составила разборная каркасная конструкция с элементами крепления РПП, устанавливаемая на внутренней поверхности вакуумной камеры. Плиты РПП размером 500×500 мм располагаются по поперечному сечению камеры наклонно, образуя двенадцатигранник (Рисунок 3). Из двух торцевых стенок вакуумной камеры по технологическим соображениям РПП покрывается только одна. Такой тип камер называется полуоткрытым и результаты измерений в них при определенных условиях практически адекватны измерениям в полностью закрытых камерах. ЭРД размещается на оси камеры в непосредственной близости от торцевой стенки, облицованной РПП.

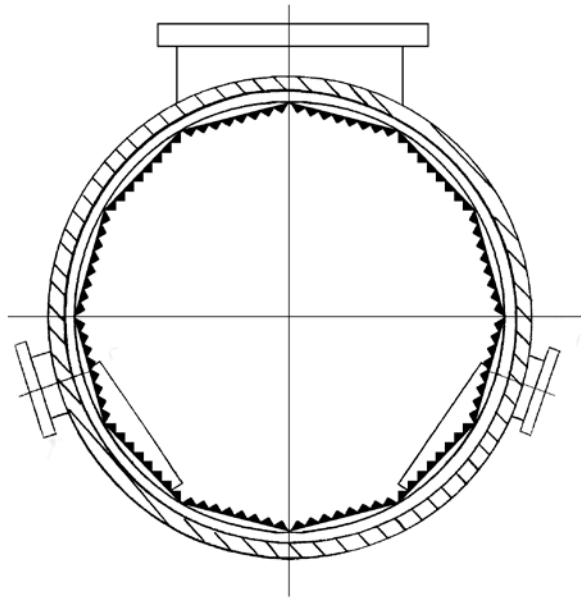


Рис.3. Размещение РПП в камере

В Европе так же был накоплен большой опыт исследования помехоэмиссии применительно к ионным двигателям (ИД). Конструкции наземных стендов рассмотрим на примере измерения собственного электромагнитного излучения ионных двигателей RIT-10 и T5, предназначенных для установки на КА ARTEMIS [7, 8].

Испытания на ЭМС производились в Мюнхенском филиале DASA/MBB. Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 4. Двигатель помещался на торце стеклянного цилиндра диаметром 40 см и длиной 1 м, который был установлен вертикально на турбомолекулярном насосе, обеспечивающим необходимый вакуум. При этом измерительные антенны располагались вне стеклянного цилиндра, внутри которого распространялась плазменная струя. Сама установка помещалась внутрь стандартной БЭК, находящейся при атмосферном давлении. Исследование проводилось на предмет удовлетворения требованиям стандартов ЭМС КА ARTEMIS.

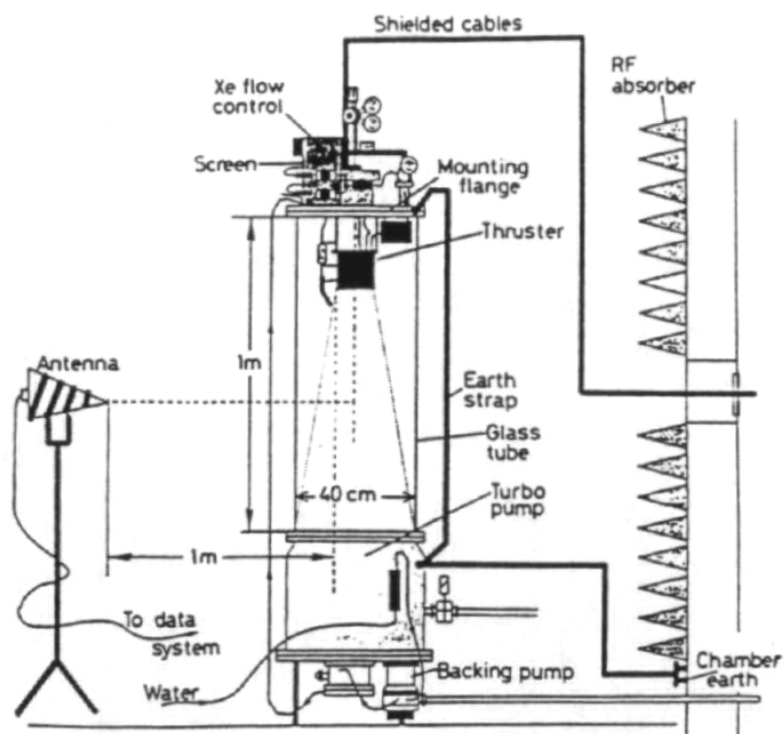


Рис.4. Общий вид экспериментальной установки DASA/MBV

С целью исследования излучения двигателя T5 при уровне тяги до 25 мН, работы были продолжены в Кулхамовской лаборатории (AEA Technology, Culham Laboratory, Abingdon, UK) [8] с использованием вакуумной установки большого объема с увеличенной производительностью вакуумных насосов. Использовались два крионасоса, которые обеспечивали давление от 6×10^{-6} до 10×10^{-6} торр при тяге двигателя 25 мН. В данных экспериментах двигатель устанавливался в торце стеклянного цилиндра диаметром 0.6 м и длиной 1 м, расположенного горизонтально (см. рисунок 5). Вокруг стеклянного цилиндра была возведена временная БЭК, позволяющая устанавливать на расстоянии 1 м антенны и обеспечивать доступ персонала. Многоканальная приемная система позволяла обеспечивать одновременный прием сигналов как от антенн установленных в БЭК, так и от антенн расположенных в металлической вакуумной камере в условиях многократных переотражений излучаемых сигналов (см. рисунок 5).

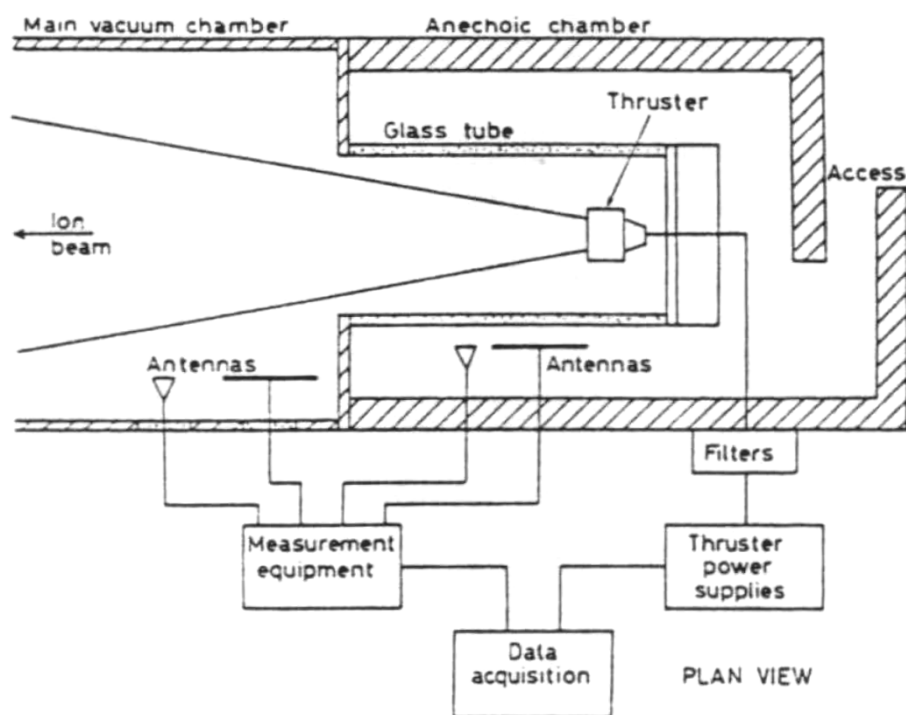


Рис.5. Схема установки Кулхамовской лаборатории

Результаты измерений излучения двигателя оказались близки к полученным ранее результатам, а использование специального имитатора подтвердило возможность калибровки характеристик антенн, размещенных в металлической камере. В этом случае пересчитанные значения уровней излучения оказывались достаточно близки, к измерениям, полученным в БЭК, что подтвердило принципиальную возможность проведения измерений в металлических вакуумных камерах.

Особенности построения испытательных стендов Японии рассмотрим на примере исследования характеристик электромагнитного излучения ИД для космического проекта MUSES-C [9]. В данном ИД ионизация осуществляется СВЧ разрядом. Для исследования совместной работы ИД, нейтрализатора, блока питания и управления была использована вакуумная камера, состоящая из вакуумного насоса и стеклянного цилиндра. Источник ионов и нейтрализатор были помещены на металлическом подвесе, и в камере создавался необходимый вакуум. ИД работал с ионным током пучка 130 мА, что соответствовало номинальному уровню тяги 7 мН. Сама вакуумная камера с соответствующим оборудованием помещалась в стандартную БЭК (см. рисунок 6). Для исследования вклада нейтрализатора в общее излучения двигателя использовалась дополнительная экспериментальная установка, представленная на рисунке 7. В ней для измерений использовалась экранированная камера. Нейтрализатор помещался в малую стеклянную камеру Т-образной формы. В качестве имитатора анода использовалась стальная пластина, площадью в 30 мм², а СВЧ излучение подавалось от задающего генератора с усилителем

мощности. В процессе работы электронный ток устанавливался равным току нейтрализатора в номинальном режиме ИД. Таким образом, моделировалась независимая работа нейтрализатора и исследовалось его собственное излучение.

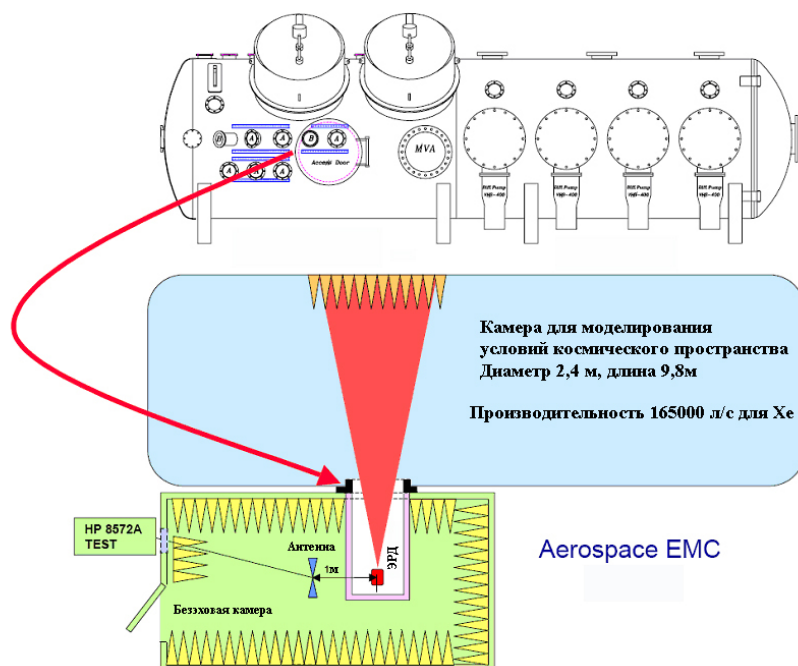


Рис.6. Стенд для измерения электромагнитного излучения ЭРД

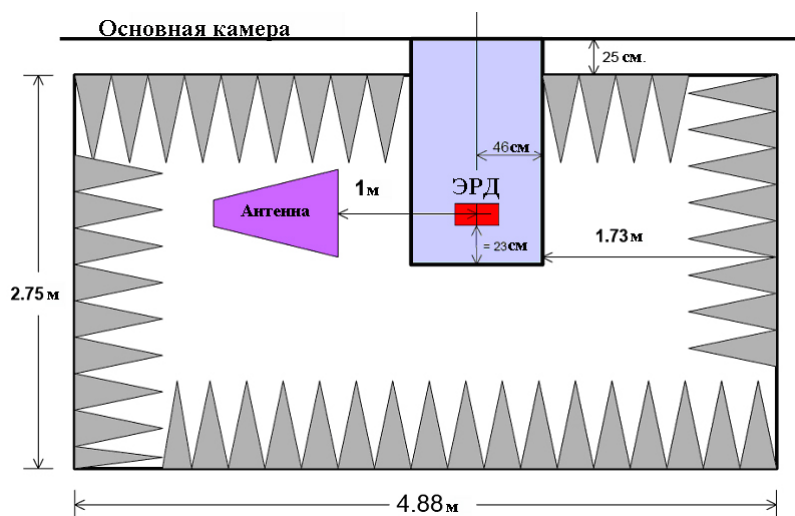


Рис.7. Схема размещения диэлектрической вакуумной камеры и антенны

В настоящее время при развитии стендовой базы для исследования радиофизических характеристик ЭРД в наземных условиях наметилась тенденция разделения вакуумных и измерительных зон путем создания комбинированных стендов. В этом направлении ведутся интенсивные работы в США. Так оборудование для тестирования ЭРД на ЭМС, например, компании Aerospace Corporation [10, 11] включает три дополнительных функциональных элемента, интегрированных в состав стандартного вакуумного стенда с камерой больших размеров (рисунок 6). К ним относятся:

- дополнительная диэлектрическая вакуумная камера, в которой устанавливается ЭРД. Это

цилиндр из стекловолокна диаметром 0.9 м и длиной 1.8 м, прозрачный для электромагнитного излучения. Он подсоединен к большой металлической вакуумной камере, которая имеет производительность откачки 165000 л/с [10];

- экранированное безэховое помещение, ограничивающее рабочую зону вокруг диэлектрического цилиндра с размерами 5×3×3 м, которое обеспечивает экранирование от внешнего излучения более чем на 100 дБ в диапазоне от 14 кГц - 18 ГГц (MILSTD 285 и NASA 65-5) и поглощение внутреннего излучения за счет радиопоглощающих покрытий от -6 дБ (80...250 МГц) до -30 дБ для частот выше 250 МГц. Помещение находится при атмосферном давлении. Модульная конструкция со стенами, которые могут быть демонтированы, обеспечивает удобный доступ к диэлектрической вакуумной камере, когда измерения не проводятся;
- калиброванный измерительный комплекс (HP8672A), соединенный с набором измерительных антенн, находящихся в безэховом помещении. Геометрия размещения показана на рисунке 7.

Размер безэхового помещения позволяет размещать измерительные антенны вне диэлектрического цилиндра по бокам и позади ЭРД на расстоянии 1 м от него, как того требует стандарт MIL-STD 461/462. Антенны, необходимые для регистрации излучения в диапазонах от 10 кГц до 18 ГГц, могут использоваться и помещаться в безэховое помещение последовательно на время проведения соответствующего эксперимента, что устраняет влияние антенн друг на друга. У диэлектрической вакуумной камеры, в которой находится ЭРД, все конструктивные элементы: болты, люки, крышки, и т.п., выполнены из диэлектрических материалов. Кроме того, все элементы крепления и питания ЭРД (трубы, оправки, болты и т.п.), кроме монтажной плиты, также выполнены из диэлектрических материалов. Электрические кабели и трубы подачи расходного материала (газа) проложены таким образом, чтобы уменьшить их влияние на проведение измерений.

Струя ЭРД направлена по оси диэлектрической камеры в основную вакуумную камеру (рисунок 6), где для уменьшения эффектов, связанных с отражением высокоэнергетических ионов и снижения уровня отраженного электромагнитного излучения установлено поглощающее покрытие в виде перфорированной поверхности из алюминиевых пирамид, покрытых мягким графитом.

Геометрические размеры пирамидальных элементов выбраны таким образом, чтобы уменьшить отражение на частотах выше 80 МГц. Пример расположения ЭРД в диэлектрической вакуумной камере приведен на рисунке 7. Электромагнитное излучение ЭРД принималось антеннами, соответствующими требованиям стандарта MIL-STD

461E/462. Далее по калиброванным кабелям сигналы передавались из безэховой камеры на микроволновый измерительный комплекс.

Анализ существующей отечественной и зарубежной экспериментальной базы, предназначенной для исследования помехоэмиссии ЭРД, показал, что в настоящее время разработчиками используется три подхода:

- проведение измерений непосредственно в металлических вакуумных камерах;
- проведение измерений в безэховых вакуумных камерах;
- проведение измерений с использованием комбинированных стендов, в которых зоны измерения и вакуума разделены.

Несмотря на хорошие метрологические результаты, основными недостатками существующих комбинированных стендов является жесткая привязка конструкции БЭК к вакуумному оборудованию, что ограничивает возможности использования испытательного стенда для решения других задач по отработке ЭРД (например, проведения ресурсных испытаний, при которых электрофизические свойства «радиопрозрачной» камеры могут быть необратимо изменены). Поэтому представляет интерес исследование возможности использования в комбинированных стендах унифицированных мобильных БЭК.

Особенности конструкций мобильных БЭК

Как правило, мобильная БЭК в своей основе имеет экранированное помещение (камеру), облицованное радиопоглощающими материалами, обеспечивающими требуемые характеристики безэховости. В зависимости от эффективности экранирования и конструктивного исполнения БЭК подразделяют на три класса в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1

Классы экранированных камер

Классы экранированных камер	I класс	II класс	III класс
Эффективность экранирования, дБ	80...120	30...80	До 30
Конструктивное исполнение	Неразборная	Неразборная,	сборно-разборная

Для определения помехоэмиссии технических средств экранированные помещения оборудуются РПМ, обеспечивающими отсутствие переотражений в исследуемом диапазоне частот. Применяется полное и частичное покрытие экранированных помещений РПМ. Последнее применяют для снижения резонансов, при этом, РПМ размещают на стенах и потолке в точках основного отражения электромагнитных волн. При этом достигается меньшая стоимость камеры, чем в случае БЭК с полным покрытием.

В настоящее время широкое распространение получили экранированные камеры сборной модульной конструкции, которые выполнены из панелей, изготовленных из оцинкованной стали толщиной 2 мм [12]. Сборка камер производится методом болтового соединения с использованием специализированных сетчатых высокочастотных прокладок. Обобщенный вариант модульной конструкции малогабаритной экранированной камеры представлен на рисунке 8. Рабочий диапазон частот таких экранированных камер может простирается от 10 кГц и до 40 ГГц, а эффективность экранирования составляет:

- магнитная составляющая: 10 кГц 70 дБ, 100 кГц – 10 МГц 100 дБ, выше 10 МГц 100...120 дБ;
- электрическая составляющая: 10 кГц – 100 МГц 100 дБ, плоская волна 100 МГц - 1 ГГц 100 дБ, 10 ГГц 100 дБ, 18 ГГц 90 дБ, 40 ГГц 80 дБ.

Типовой график зависимости эффективности экранирования от частоты представлен на рисунке 9.

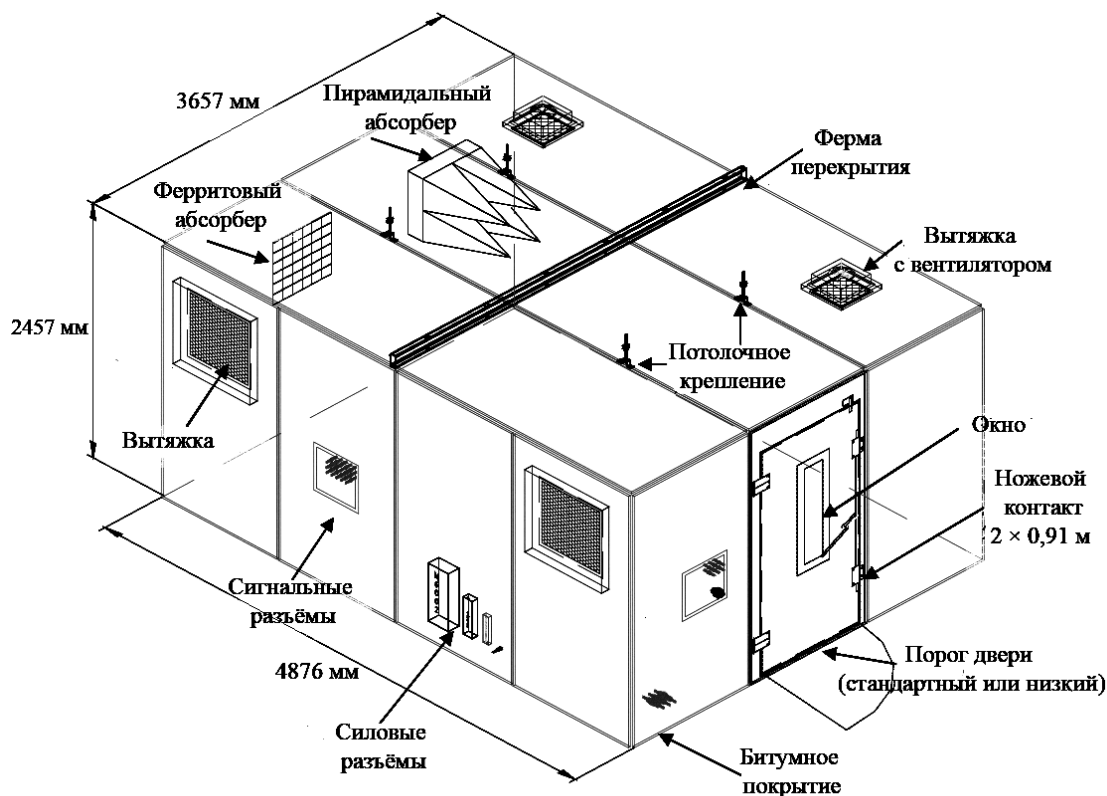


Рис.8. Модульная конструкция экранированной камеры

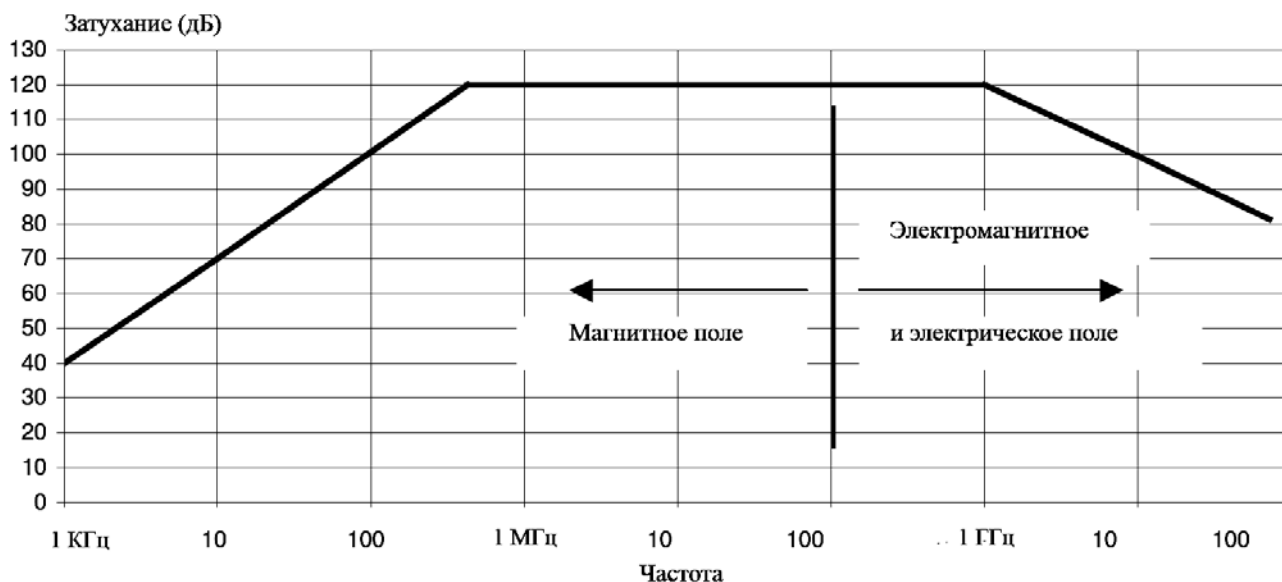


Рис. 9. Зависимость эффективности экранирования от частоты

Дополнительное оборудование БЭК

Следует отметить, что существенное влияние на экранирование оказывают элементы, нарушающие электродинамическую однородность внутренней поверхности БЭК. К ним относятся: двери, вентиляционные отверстия, проходные разъемы сигнальной и питающей сетей, окна для наблюдения. Для сохранения параметров экранирования вентиляционные отверстия закрываются фильтрами, выполненными в виде сотовых решеток в однослойном или многослойном исполнении, которые могут обеспечивать коэффициент экранирования не менее 100 дБ. Современные фильтры питания могут обеспечивать подавление не менее 100 дБ в полосе частот от 14 кГц до 18 ГГц. Сигнальные фильтры, как правило, имеют полосу подавления до 40 ГГц с эффективностью не менее 100 дБ, исключая частоты полезного сигнала. Возможна также установка оптических линий связи. Экранированные камеры комплектуются дверями различных типов, при этом основная проблема заключается в необходимом экранировании дверного проема.

Если необходима установка фальшпола, то высота порога определяется его высотой. Измерительные и оптические кабели заводятся в экранированные камеры с помощью проходных разъемов, устанавливаемых на стены (см. рисунок 10). Возможна установка разъемов любых типов, в частности N, SMA, SK, K, BNC, 7/16 и пр.

При размещении измерительных антенн в экранированной БЭК актуальным является вопрос о возможности изменения их расположения в пространстве. Это требуется, например, для изменения плоскости поляризации или для изменения угла визирования измерительной антенны. Для этих целей производится широкая номенклатура продукции, включающая антенные позиционеры и поворотные столы [12]).

Радиопоглощающие покрытия современных БЭК

В области создания РПП хорошо известна продукция компания Emerson & Cuming Microwave Products, которая производит стандартные геометрические РПП для БЭК [13]. Специально для измерений в интересах ЭМС выпускаются поглотители, основные марки которых приведены в таблице 2.

Таблица 2

Радиочастотные поглотители для задач ЭМС

Наименование	Описание	Частота
ECCOSORB® VHP-NRL	Широкополосный пирамидальный поглотитель	100 МГц – 90 ГГц
ECCOSORB® FS-NRL	Поглотитель с плоской верхней частью	Более 1 ГГц
ECCOSORB® HHP-NRL	Полый пирамидальный поглотитель	100 МГц – 40 ГГц
ECCOSORB® CV-NRL	Широкополосный криволинейный пенный поглотитель	1.5 ГГц – 40 ГГц

Характеристики данных РПП рассмотрим на примере твердотельного поглотителя из пенополиуретана марки ECCOSORB VHP-NRL. Основное его назначение – облицовка БЭК. Обладает самыми высокими широкополосными характеристиками из всех известных поглотителей для широких углов падения. Внешний вид покрытия показан на рисунке 10, а типовые характеристики приведены в таблицах 3, 4.

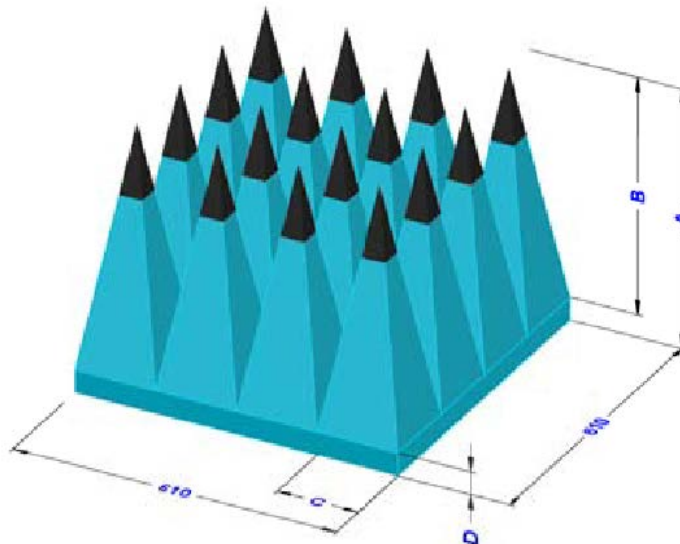


Рис.10. Размерные параметры покрытия ECCOSORB VHP-NRL

Как следует из анализа геометрических покрытий, их размеры существенно зависят от нижней границы требуемого частотного диапазона. Так, например, для покрытий ECCOSORB VHP-NRL для обеспечения на нижней частоте диапазона 200 МГц поглощения падающей электромагнитной волны порядка -25 дБ потребуется использование пирамидальных элементов с высотой 114 см.

Если поднять нижнюю граничную частоту до 500 МГц, то для обеспечения поглощения порядка – 25 дБ достаточно уже будет пирамид высотой 30 см. Это накладывает существенные ограничения на минимальные размеры безэховых камер.

Таблица 3

Геометрические характеристики покрытий

Сорт покрытия VHP	Общая высота А (см)	Высота пирамиды В (см)	Ширина пирамиды С (см)	Высота основания D (см)	Количество пирамид на пластину	Вес кг
VHP-2-NRL	5.6	4	1.9	1.6	1024	1.2
VHP-4-NRL	10.2	7.7	3.8	2.5	256	1.3
VHP-8-NRL	20.3	17.8	6.8	2.5	81	1.6
VHP-12-NRL	30.5	27.8	10.2	2.7	36	2.2
VHP-18-NRL	45.7	41.7	15.3	4	16	2.9
VHP-26-NRL	66.1	55.9	20.3	10.2	9	5.4
VHP-36-NRL	91.4	76.4	30.5	15	4	6.3
VHP-45NRL	114	93.7	30.5	20.3	4	9

Таблица 4

Максимальное затухание покрытий при фронтальном падении волны

	120 МГц	200 МГц	300 МГц	500 МГц	1 ГГц	3 ГГц	5 ГГц	10 ГГц	15 ГГц	24 ГГц	
VHP-2-NRL						-40	-45	-40	-45	-50	
VHP-4-NRL						-45	-50	-45	-50		
VHP-8-NRL					-30	-50		-50			-50
VHP-12-NRL					-35						
VHP-18-NRL				-25	-40						
VHP-26-NRL			-25	-30	-45	-50	-50	-50			
VHP-36-NRL		-20	-30	-35							
VHP-45-NRL	-20	-25	-35	-40							

Пример технической реализации мобильной БЭЖ

Вариант использования комбинированных стендов для исследования помехоэмиссии ЭРД был рассмотрен применительно к реализации на экспериментальной базе МАИ. За основу был взят экспериментальный стенд установки У2В. Топология размещения оборудования представлена на рисунке 11.

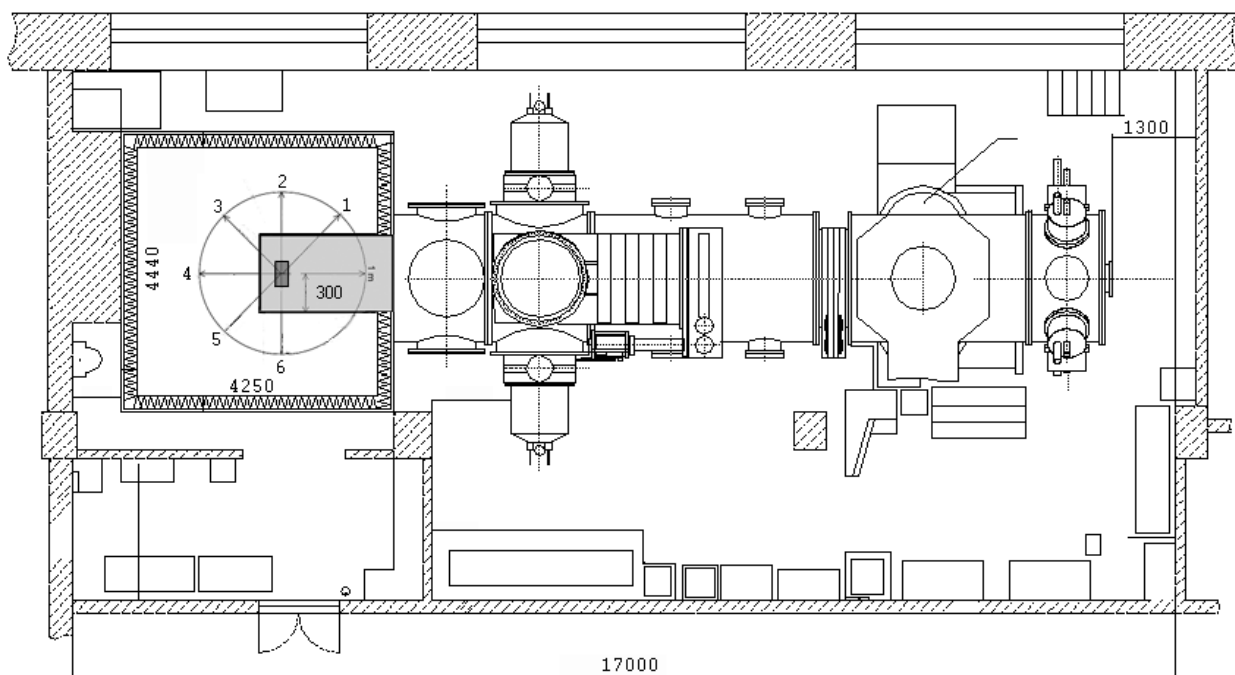


Рис.11. Топология размещения оборудования на экспериментальном стенде

Установка содержит две металлические вакуумные камеры, соединенные шиберным затвором диаметром 1200 мм. Каждая камера снабжена своими откачными насосами, что позволяет реализовывать одновременно одно или два рабочих места с одновременным запуском двух ЭРД. Путем соединения двух объемов в один, возможно испытывать ЭРД повышенной мощности. Левая вакуумная камера снабжена переходным фланцем, на который устанавливается «радиопрозрачный» диэлектрический цилиндр, размещенный в БЭК, находящейся при атмосферном давлении.

При этом максимально достижимые размеры БЭК определяются размером основного помещения и составляют $4.44 \times 4.25 \times 4.0$ м. ЭРД устанавливается на левой стенке диэлектрического цилиндра, а ось его струи направлена вдоль оси «радиопрозрачного» диэлектрического цилиндра и последующей металлической вакуумной камеры. В такой БЭК можно проводить практически все необходимые виды измерений в интересах задач ЭМС. Так, например, для определения помехоэмиссии ЭРД, в БЭК может устанавливаться одновременно или последовательно набор измерительных антенн, подключенных через проходные коаксиальные разъемы к аппаратуре спектрального и временного анализа, расположенной вне помещения БЭК. Такая гибкость позволяет выбрать оптимальное сочетание скорости измерения и чувствительности.

На рисунке 11 представлен вариант обеспечения максимальных размеров БЭК, которые можно реализовать на данном стенде. Однако реальная эксплуатация такой конструкции затруднительна. Это связано с тем, что измерения в интересах ЭМС проводятся не постоянно, а сам стенд должен эксплуатироваться и для других задач. В этом случае, при

проведении испытаний ЭРД, связанных, например, с подтверждением рабочих характеристик двигателя, «радиопрозрачный» цилиндр будет дополнительно подвергаться воздействию плазменных струй ЭРД, что быстро исчерпает его ресурс по стабильным электрофизическим свойствам. Поэтому при разработке БЭК была принята концепция обеспечения мобильности при интеграции БЭК с металлической вакуумной камерой. С этой целью в основу конструкции положена платформа, устанавливаемая на рельсовом пути, обеспечивающим возможность перемещения последней относительно неподвижной вакуумной камеры. При этом сама БЭК устанавливается непосредственно на перемещаемой платформе. Для сохранения эффективных размеров БЭК, диапазон перемещений должен быть невелик, порядка 1 м, что позволяет откатить БЭК, отсоединить «радиопрозрачный» диэлектрический цилиндр и поставить на его место металлическую заглушку, обеспечивающую работоспособность основной вакуумной камеры, в которой могут продолжаться экспериментальные работы, связанные с эксплуатацией ЭРД. Естественно, что с учетом перемещений первоначальные линейные размеры БЭК должны быть уменьшены. Размещение ЭРД показано на рисунках 12, 13, а общий вид БЭК с перемещаемой платформой представлен на рисунке 14, Новизна предложенного технического решения защищена патентом РФ [14].

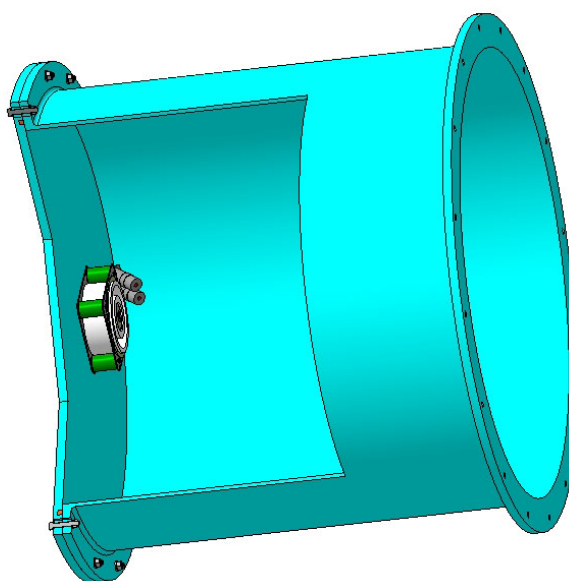


Рис.12. Размещение ЭРД в диэлектрическом цилиндре

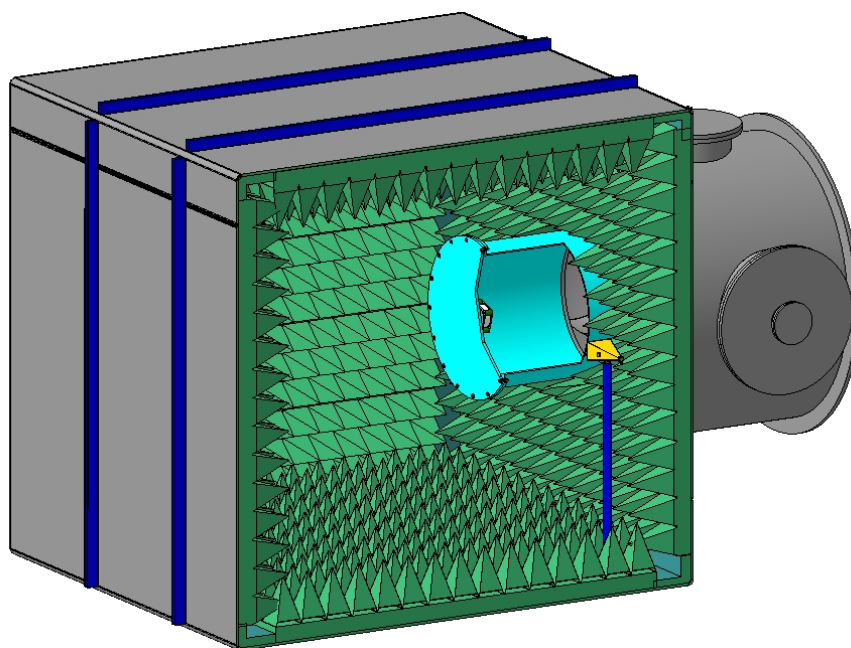


Рис.13. Общая геометрия БЭК

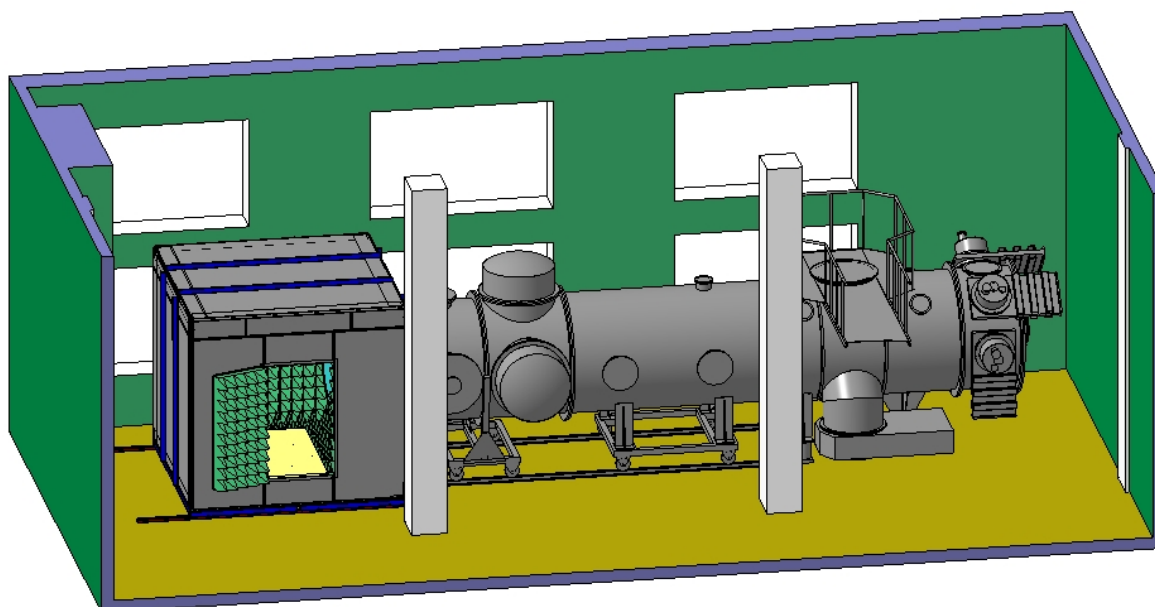


Рис.14. Размещение БЭК на стене

При реализации основу конструкции БЭК составила экранированная камера, собранная из стандартных сэндвич-панелей, поставляемых немецкой фирмой Emc-Technik & Consulting [12]. Стандартные размеры сэндвич-панелей составляют: 2438×1219 мм и 3048×1219 мм. При необходимости могут быть изготовлены панели нестандартных размеров. При монтаже использовался формирующий каркас из металлических швеллеров, к которым крепились экранирующие панели. Швеллера располагались на внешней и внутренней поверхностях экранированной камеры и стягивались специальными винтами. Конструкция разъемного крепления представлена на рисунке 15.

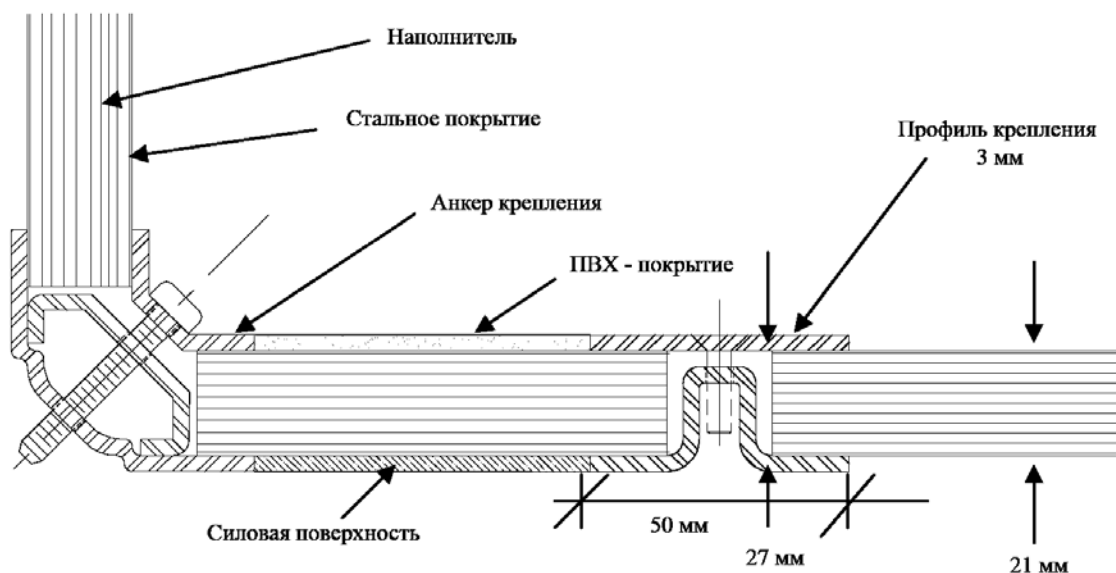


Рис.15. Конструкция разъемных креплений

БЭК снабжена специализированной дверью размером 2×1.3 м. Через эту дверь в камеру транспортируется и монтируется диэлектрический цилиндр, а так же вносятся и размещаются измерительные антенны. Внутри камера оборудуется РПП, обеспечивающими необходимую безэховость. При проектировании необходимо учитывать, что при использовании геометрических покрытий для достижения требуемого поглощения на низких частотах необходимо увеличивать геометрическую высоту адсорберов. Однако в обсуждаемом случае размеры БЭК достаточно ограничены, что требует решения оптимизационной задачи с учетом возможного ограничения исследуемого диапазона частот излучения ЭРД. Собранный экранированная камера располагается на передвижной металлической платформе размером 4×4 м, изготовленной из двух секций размером 4×2 м. Разбиение на две секции необходимо, чтобы обеспечить беспрепятственную доставку платформы в лабораторное помещение.

Данный экспериментальный стенд может рассматриваться как очередной шаг в направлении разработки технических средств аттестации квалификационных и летных моделей ЭРД в рамках требований ЭМС.

Таким образом, приведенные в данной статье результаты могут быть использованы при разработке наземных комплексов для испытания ЭРД на помехоэмиссию в интересах системных задач ЭМС, а так же с целью последующей разработки нормативных документов и стандартов.

Заключение

1. Проведен анализ существующей отечественной и зарубежной экспериментальной базы, предназначенной для исследования помехоэмиссии ЭРД, который показал, что в настоящее время разработчиками используется три подхода:

- проведение измерений непосредственно в металлических вакуумных камерах;
- проведение измерений в БЭК;
- проведение измерений с использованием комбинированных стендов, в которых зоны измерения и вакуума разделены.

При этом наибольшими преимуществами обладают комбинированные стенды, которые позволяют не только упростить процесс измерений, но и использовать РПП, ориентированные на работу при нормальном атмосферном давлении, применительно к которым имеется широкая номенклатура по рабочему диапазону и уровню поглощения.

2. Основными недостатками существующих комбинированных стендов является жесткая привязка конструкции БЭК к вакуумному оборудованию, что ограничивает возможности использования испытательного стенда для решения других задач по отработке ЭРД (например, проведения ресурсных испытаний, при которых электрофизические свойства «радиопрозрачной» камеры могут быть необратимо изменены). Поэтому были предложены новые подходы к проектированию моделирующих стендов, предназначенных для решения практических задач в интересах обеспечения ЭМС ЭРД, основанные на использовании мобильных БЭК.

3. Проведены исследования в направлении создания мобильных БЭК с повышенными характеристиками безэховости. Показано, что в этом случае основу БЭК должна составлять экранированная камера с затуханием не менее 100 дБ в исследуемом диапазоне частот, которая может быть выполнена на основе модульной конструкции с использованием, например, типовых экранированных панелей фирмы EMC-TECHNIK & CONSULTING. Внутренность камеры покрывается РПП геометрического типа, среди которых могут быть рекомендованы покрытия ECCOSORB VHP-NRL фирмы Emerson & Cuming Microwave Products. В качестве дополнительного оборудования целесообразно использовать антенные позиционеры и поворотные столы.

4. Разработанные принципы и конструкторские решения прошли апробацию при создании мобильной БЭК, развернутой на базе экспериментальных стендов МАИ. Принципиально новым техническим решением было размещение мобильной БЭК на платформе, установленной на рельсовом пути, обеспечивающим возможность перемещения последней относительно неподвижной вакуумной камеры. Такая конструкция позволяет откатить БЭК, отсоединить «радиопрозрачный» диэлектрический цилиндр и поставить

на его место металлическую заглушку, обеспечивающую работоспособность основной вакуумной камеры, в которой могут продолжаться экспериментальные работы, связанные с эксплуатацией ЭРД. При этом расширяется многофункциональность комплекса и продлевается ресурс работы «радиопрозрачной» вакуумной камеры. Новизна технического решения защищена Патентом РФ 107769 от 19 апреля 2011 года.

5. Полученные результаты могут быть использованы при разработке наземных комплексов для испытания ЭРД на помехоэмиссию в интересах системных задач ЭМС, а так же с целью последующей разработки нормативных документов и стандартов.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-143.2012.8 и Гранта Совета по грантам Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования № 11.G34.21.0022.

Библиографический список

1. Плохих А.П. «Лабораторные исследования радиофизических характеристик и эффектов электродинамического воздействия электроракетных двигателей». Модель Космоса 8-е издание, МГУ, 2007 г.
2. Попов Г.А. Электрические ракетные двигатели (ЭРД). Разработки ЭРД в России. Роль Московского авиационного института. Вестник Московского авиационного института 2005 т. 12, N 2, с. 112-122.
3. Kitamura, S. «Development of the Engineering Test Satellite-3 (ETS-3) Ion Engine System», NASA TM-77538, 1984.
4. Caveni, L.H., Curran, F.M., Brophi, J.R. «Russian Electric Space Propulsion Evaluated for Use on American Small Satellites». 2nd German-Russian Electric Propulsion Conference, Moscow, Russia, July 1993, p. 134.
5. Kim, V., Plokhikh, A., Sorokin, A., and Solomatin, A. «Methods and Means for Studying the Hall Thrusters Self-Radiation». 2nd German-Russian Electric Propulsion Conference, Moscow, Russia July 1993, с. 105.
6. Плохих А.П. Особенности проведения радиоизмерений в металлических вакуумных камерах // Вестник московского авиационного института. 2004. т. 11, N2, с. 66-78.
7. H. Muller, R. Kukies and H. Bassner, «EMC Tests on the RITA Ion Propulsion Assembly for the ARTEMIS Satellite», AIAA Paper 92-3208, 1992.

8. S. Chanda, F. Mawdsley, R.D. Brown, S.D. Watson, A.K. Malik and D.G. Fearn, «Measurements of the Electromagnetic Emissions from the T5 Ion Thruster», IEPC Paper 93-234, 1993.
9. K. Nishiyama, Y. Shimizu, I. Funaki, H. Kuninaka, K. Toki «Measurements of the Electromagnetic Emissions from the MUSES-C Ion Engine System», The 27th International Electric Propulsion Conference, Paper IEPC-01-112. Pasadena, CA, 15-19 October, 2001.
10. E.J. Beiting, M.L. Garrett, J.E. Pollard, B. Pezet, and P. Gouvernayre. «Spectral Characteristics of Radiated Emission from SPT-100 Hall Thrusters». The 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, October 31 -November 4, 2005, IEPC-2005-221.
11. E.J. Beiting, M.L. Garrett, J.E. Pollard, B. Pezet, and P. Gouvernayre. «Temporal Characteristics of Radiated Emission from SPT-100 Hall Thrusters in the L, S, and C Bands». The 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, October 31 - November 4, 2005, IEPC-2005-222.
12. EMC-TECHNIK & CONSULTING. [Электронный ресурс] / Электрон. дан. – 2010, Режим доступа: <http://www.emc-technik.de/php/index.php>, свободный.
13. EMERSON & CUMING MICROWAVE PRODUCTS. [Электронный ресурс] / Электрон. дан. – 2010, Режим доступа: <http://www.eccosorb.com>, свободный.
14. Важенин Н.А., Плохих А.П., Попов Г.А., Козлов В.И., Арбатский В.М. «Испытательный стенд», Патент РФ 107769 от 19.04.2011 г.

Сведения об авторах

ПЛОХИХ Андрей Павлович, заместитель директора Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: 84991959458; e-mail: riame@sokol.ru

ВАЖЕНИН Николай Афанасьевич, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: 84991959458; e-mail: riame@sokol.ru