

Специализированные металлокерамические корпуса с интегрированными и локальными радиационно-защитными экранами

А. Алонцев¹, С. Грабчиков, д. ф.-м. н.²

УДК 621.38 | ВАК 2.2.2

В настоящее время актуальность обеспечения и повышения радиационной стойкости электронной компонентной базы (ЭКБ) очевидна и реализуется в основном технологическим (применением специальных технологических процессов и материалов при изготовлении интегральных микросхем), схемотехническим и конструкционным способами. В АО «ТЕСТПРИБОР» разработаны материалы и технология, которые могут быть использованы для изготовления корпусов нового поколения ЭКБ, применяемой в аппаратуре ракетной и космической техники для обеспечения повышенных требований к радиационной устойчивости.

Конструкционная защита (обшивка) космических аппаратов (КА), выполненная на основе алюминия и его сплавов, не обеспечивает в полной мере ослабление радиационных факторов космического пространства (КП), а применение радиационно-стойких интегральных схем (ИС) не всегда возможно: например, ограничен срок проектирования КА, неприемлемо высокая стоимость и др. Поэтому для защиты наиболее уязвимых элементов следует использовать локальную защиту, которая не влечет за собой значительного увеличения массы и габаритов КА и при этом обеспечивает необходимый уровень ослабления ионизирующего излучения КП.

В настоящее время для локальной защиты кристаллов ИС в составе КА от воздействия ионизирующего излучения (ИИ) КП по дозовым эффектам существует ряд технических решений: специализированные корпуса ИС (WALOPACK, RAD-PAK™), специализированные покрытия и локальная защита ИС в составе аппаратуры КА. Все эти решения направлены на повышение радиационной стойкости коммерческих микросхем, либо повышение стойкости микросхем с уникальными функциональными характеристиками, радиационно-стойкие аналоги которых отсутствуют.

В АО «ТЕСТПРИБОР» разработаны специализированные металлокерамические корпуса (МКК) с интегрированными

и локальными радиационно-защитными экранами (РЗЭ) различных типов и способов герметизации, основное отличие которых состоит в методах герметизации подкорпусного пространства (рис. 1а, б, в):

- герметизация осуществляется методом шовно-роликовой сварки металлической крышкой с Т-образным профилем (см. рис. 1а);
- герметизация осуществляется методом пайки верхним защитным экраном (см. рис. 1б);
- герметизация осуществляется методом лазерной сварки крышки с локальными экранами (см. рис. 1в).

Оба корпуса имеют нижние защитные экраны, которые одновременно являются монтажными площадками для посадки кристаллов ИС.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК КОРПУСАМИ МК 4247.100-2 И 4248.144-2

Для оценки ослабления локальных дозовых нагрузок (ЛДН) специализированными металлокерамическими корпусами (МКК) 4248.144-2 и 4247.100-2 использовалось численное моделирование в ПО Fastrad и GEANT4 и сравнение полученных данных с экспериментом.

Оценка ослабления ЛДН проводилась в два этапа.

Первый этап. Оценка ослабления ЛДН при перпендикулярном падении пучка частиц (протонов или электронов) на крышки МКК 4248.144-2 и 4247.100-2.

Второй этап. Оценка ослабления ЛДН для изотропно-го потока частиц в КП для пяти типовых орбит.

Критерием для выбора типовых орбит являлось их прохождение через естественные радиационные пояса

¹ АО «ТЕСТПРИБОР», начальник конструкторского бюро.

² ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок.

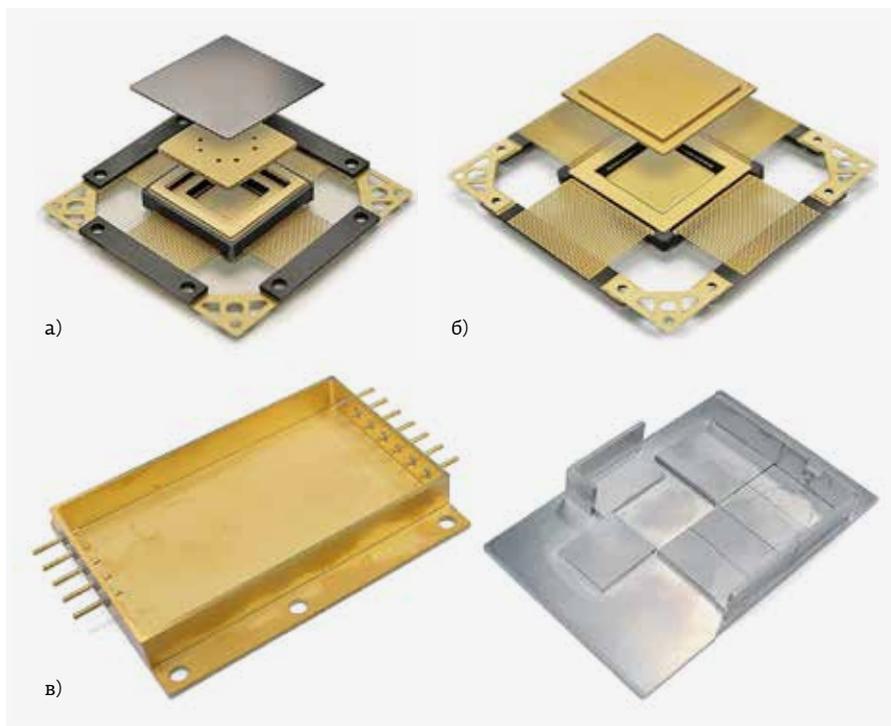


Рис. 1. Специализированные металлокерамические корпуса с интегрированными и локальными радиационно-защитными экранами:
 а – специализированный 100-выводной планарный металлокерамический корпус 4247.100-2 с интегрированными радиационно-защитными экранами;
 б – специализированный 144-выводной планарный металлокерамический корпус 4248.144-2 с интегрированными радиационно-защитными экранами;
 в – специализированный 12-выводной металлокерамический корпус МК 41Ф.12-3 с локальными радиационно-защитными экранами

Земли (ЕРПЗ): через пояс протонов, через пояс электронов, а также одновременное прохождение через пояса протонов и электронов. Также учитывалось широкое распространение выбранных орбит для современных КА. Исходя из этого, выбрано пять типовых орбит:

- орбита МКС – круговая орбита с высотой 400 км и наклоном 51,5°;
- круговая полярная орбита с высотой 800 км и наклоном 98°;
- ВЭО – апогей 40 000 км, перигей 500 км, наклонение 63°, аргумент перигея 270°;

- ГЛОНАСС – круговая орбита с высотой 19 100 км и наклоном 64,8°;
- ГСО – высота 35 784 км.

Результаты исследований по оценке ослабления дозовой нагрузки специализированными металлокерамическими корпусами 4248.144-2 и 4247.100-2 электронного излучения представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1. Ослабление дозовой нагрузки корпусами 4248.144-2 и 4247.100-2 при воздействии электронного излучения (K_e)

Наименование корпуса	Коэффициент ослабления дозы от электронов 2,2 МэВ		Коэффициент ослабления дозы от электронов 3,6 МэВ	
	Эксперимент	Расчет*	Эксперимент	Расчет*
4248.144-2	2124	1800	90	130
4247.100-2	859	700	34	50

* Расчет проводился в ПО Fastrad (версия 3.4.3.0) прямым методом Монте-Карло.

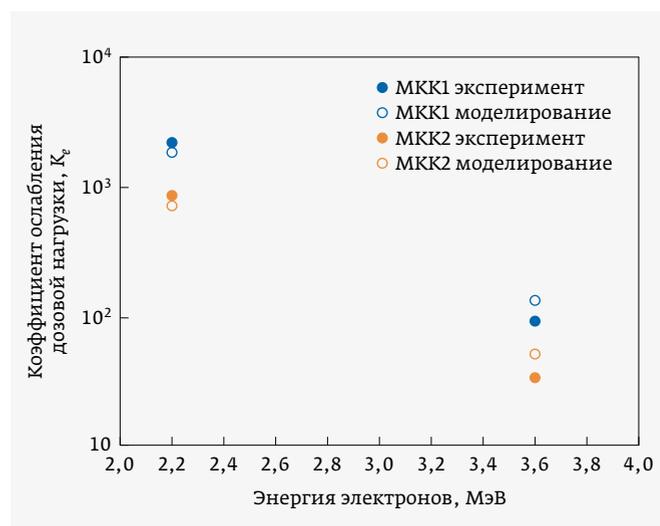


Рис. 2. Ослабление дозовой нагрузки корпусами 4248.144-2 и 4247.100-2 при воздействии электронного излучения (K_e)

Таблица 2. Ослабление дозовой нагрузки корпусами 4248.144-2 и 4247.100-2 при воздействии протонного излучения (K_p)

Энергия протонов	Коэффициент ослабления дозовой нагрузки	
	Эксперимент	Расчет*
10	-	606 570
15	-	96 500
21	27 448	30 000
30	-	7 550
50	0,7	0,75
70	1,0	0,88
90	0,9	0,92
120	0,9	0,95
250	0,9	0,95

* Расчет проводился с помощью модуля MULASSIS (версия 1.23, скомпилированная с помощью geant4-09-05-patch-02) прямым методом Монте-Карло.

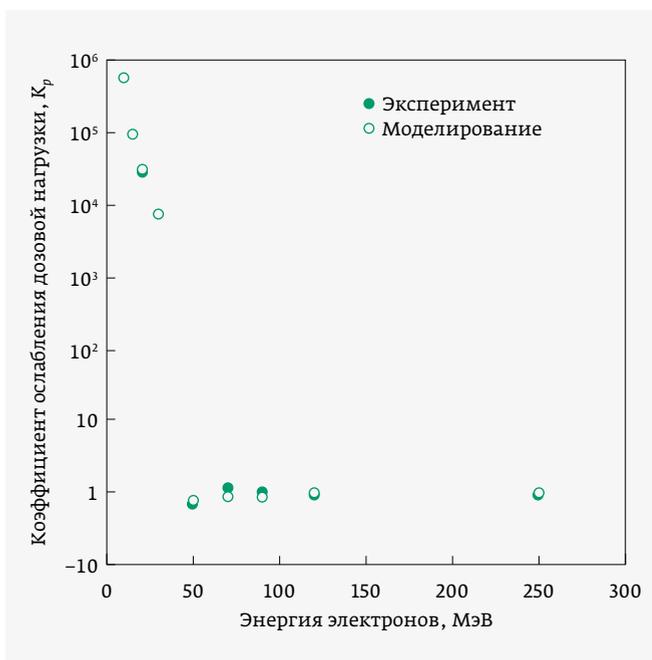


Рис. 3. Ослабление дозовой нагрузки корпусами 4248.144-2 и 4247.100-2 при воздействии протонного излучения (K_p)

Таблица 3. 144-выводной МКК 4248.144-2. Коэффициенты ослабления дозовой нагрузки

Внешняя защита	Орбита	Суммарная доза		Доза от электронов		Доза от протонов	
		$K_{минСА}$	$K_{максСА}$	$K_{минСА}$	$K_{максСА}$	$K_{минСА}$	$K_{максСА}$
0,1 г/см ²	МКС	46	612	3 586	4 946	9	4
	Полярная	89	74	9 958	3 242	6	5
	ВЭО	879	1 345	6 120	9 564	552	552
	ГЛОНАСС	4 151	5 509	4 151	5 509	-	-
	ГСО	27 320	27 328	27 320	27 328	-	-
0,5 г/см ²	МКС	5	43	941	1 149	2	2
	Полярная	4	9	1 022	1 175	2	2
	ВЭО	30	40	996	1 143	14	14
	ГЛОНАСС	1 085	1 361	1 085	1 361	-	-
	ГСО	2 034	2 034	2 034	2 034	-	-
1,0 г/см ²	МКС	2,0	7,7	649	717	1,6	1,4
	Полярная	1,9	2,5	606	673	1,5	1,5
	ВЭО	7,2	8,9	521	599	4,7	4,7
	ГЛОНАСС	609,2	692,7	609	693	-	-
	ГСО	732,4	705,4	732	705	-	-

СА – солнечная активность.

Примечание: протоны ЕРПЗ для орбит ГЛОНАСС и ГСО не вносят вклад в поглощенную дозу.

Таблица 4. 100-выводной МКК 4247.100-2. Коэффициенты ослабления дозовой нагрузки МКК 4247.100-2

Внешняя защита	Орбита	Суммарная доза		Доза от электронов		Доза от протонов	
		$K_{\text{минСА}}$	$K_{\text{максСА}}$	$K_{\text{минСА}}$	$K_{\text{максСА}}$	$K_{\text{минСА}}$	$K_{\text{максСА}}$
0,1 г/см ²	МКС	36	436	1586	2093	7,0	3,0
	Полярная	71	59	4316	1362	4,8	4,1
	ВЭО	484	733	2752	4172	308,2	308,2
	ГЛОНАСС	1798	2273	1798	2273	-	-
	ГСО	10989	10992	10989	10992	-	-
0,5 г/см ²	МКС	4,8	42,3	436	523	2,0	1,7
	Полярная	4,5	9,5	491	553	1,9	1,9
	ВЭО	30,7	41,4	493	553	14,7	14,7
	ГЛОНАСС	516,4	644,2	516	644	-	-
	ГСО	1038,5	1038,5	1039	1039	-	-
1,0 г/см ²	МКС	2,0	7,9	377	438	1,6	1,4
	Полярная	1,9	2,6	343	394	1,5	1,5
	ВЭО	7,6	9,3	293	346	4,9	4,9
	ГЛОНАСС	357,7	411,2	358	411	-	-
	ГСО	434,0	434,0	434	434	-	-

СА – солнечная активность.

Примечание: протоны ЕРПЗ для орбит ГЛОНАСС и ГСО не вносят вклад в поглощенную дозу.

Результаты по ослаблению дозовой нагрузки специализированными металлокерамическими корпусами 4248.144-2 и 4247.100-2 протонного излучения представлены в табл. 2 и на рис. 3.

Для выбранных типовых орбит (орбита МКС, круговая полярная орбита 800 км, высокоэллиптическая орбита (ВЭО), орбита ГЛОНАСС, геостационарная орбита (ГСО)) и значений внешней защиты (0,1 г/см², 0,5 г/см², 1,0 г/см²) были рассчитаны суммарные коэффициенты ослабления (отношение дозы в корпусе к дозе без корпуса) электронного и протонного излучений. В табл. 3 и 4 приведены результаты проведенных расчетов для двух типов специализированных корпусов.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК КОРПУСОМ МК 41Ф.12-3

Для оценки ослабления ЛДН электронного и протонного излучения космического пространства специализированным металлокерамическим корпусом МК 41Ф.12-3 с локальными радиационно-защитными экранами использовалось численное моделирование в ПО Fastrad и GEANT4.

Коэффициенты ослабления K накопленной дозы в металлическом корпусе защитными экранами толщиной d_2

с учетом конструкционной защиты d_1 от суммарного потока протонов и электронов радиационного пояса Земли (ЕРПЗ) на разных орбитах при максимуме и минимуме солнечной активности (СА) представлены в табл. 5.

Коэффициенты уменьшения частоты одиночных сбоев K_{oc} для ЭКБ в корпусе с учетом конструкционной защиты $d_1=1$ г/см² с защитным экраном толщиной $d_2=2$ г/см² без учета конструкционной защиты космического аппарата при воздействии высокоэнергетических протонов (ВЭП) ЕРПЗ при средней и максимальной плотности потока частиц согласно РД 134-0139-2005 представлены в табл. 6.

Компания «ТЕСТПРИБОР» разработала материалы и технологию, которые могут быть использованы для изготовления корпусов нового поколения электронной компонентной базы, применяемой в аппаратуре ракетной и космической техники для обеспечения повышенных требований к радиационной устойчивости.

Применение корпусов с интегрированной и локальной радиационной защитой позволит:

- обеспечить повышенную радиационную стойкость ИМС, источников вторичного электропитания

Таблица 5. Коэффициенты ослабления K накопленной дозы ЭКБ в корпусе защитными экранами толщиной d_2 с учетом конструкционной защиты d_1

d_1 , г/см ²	d_2 , г/см ²	Орбита № 1		Орбита № 2		Орбита № 3		Орбита № 4		Орбита № 5	
		К, отн.ед.		К, отн.ед.		К, отн.ед.		К, отн.ед.		К, отн.ед.	
		Мин. СА	Макс. СА								
0,01	1,0	7,5	16,4	2,5	2,8	2,0	4,5	5,7	8,7	4,2	5,2
	1,7	14,3	29,6	3,5	4,0	2,3	5,1	8,3	12,8	5,9	7,3
	2,3	22,8	42,5	4,5	5,2	2,5	5,5	10,7	16,2	7,4	9,3
	3,0	33,2	55,8	5,5	6,4	2,8	6,0	13,0	19,3	8,9	11,1
0,1	1,0	6,7	16,3	2,3	2,5	1,8	3,7	5,0	7,6	3,7	4,5
	1,7	12,1	27,0	3,1	3,5	2,0	4,1	7,0	10,5	5,0	6,1
	2,3	19,0	39,0	4,0	4,5	2,3	4,4	8,9	13,2	6,2	7,6
	3,0	27,4	50,8	4,8	5,5	2,5	4,7	10,7	15,6	7,4	9,1
1,0	1,0	2,5	3,2	1,5	1,6	1,2	1,2	1,7	1,8	1,6	1,6
	1,7	3,7	4,4	1,9	1,9	1,3	1,3	2,1	2,1	1,9	1,9
	2,3	5,0	5,5	2,2	2,3	1,4	1,4	2,5	2,5	2,2	2,2
	3,0	6,8	6,7	2,6	2,7	1,6	1,5	2,8	2,8	2,5	2,5

Примечание:

Орбита № 1 – среднеорбитальная круговая с углом наклоения 30° на высоте 8000 км;

Орбита № 2 – среднеорбитальная круговая с углом наклоения –60° на высоте 4000 км;

Орбита № 3 – низкоорбитальная круговая с углом наклоения 60° на высоте 400 км;

Орбита № 4 – высокоорбитальная эллиптическая с параметрами: $H_A=40000$ км, $H_P=600$ км, угол наклоения 63°, угол перигея $\omega=90^\circ$;

Орбита № 5 – высокоорбитальная эллиптическая с параметрами: $H_A=20000$ км, $H_P=320$ км, угол наклоения 63°, угол перигея $\omega=90^\circ$.

Таблица 6. Коэффициенты уменьшения частоты одиночных сбоев K_{oc} для ЭКБ в корпусе со стенками толщиной $d_1=1$ г/см² защитным экраном толщиной $d_2=2$ г/см² без учета КА

Плотность потоков ВЭП ЕРПЗ	K_{oc} , отн. ед.			
	Орбита № 1	Орбита № 2	Орбита № 3	Орбиты № 4 и 5
Средняя плотность потоков ВЭП ЕРПЗ	7,9	1,8	1,4	2,5
Максимальная плотность потоков ВЭП ЕРПЗ	6,5	1,9	1,3	2,1

Примечание:

Орбита № 1 – среднеорбитальная круговая с углом наклоения 30° на высоте 8000 км;

Орбита № 2 – среднеорбитальная круговая с углом наклоения –60° на высоте 4000 км;

Орбита № 3 – низкоорбитальная круговая с углом наклоения 60° на высоте 400 км;

Орбита № 4 – высокоорбитальная эллиптическая с параметрами: $H_A=40000$ км, $H_P=600$ км, угол наклоения 63°, угол перигея $\omega=90^\circ$;

Орбита № 5 – высокоорбитальная эллиптическая с параметрами: $H_A=20000$ км, $H_P=320$ км, угол наклоения 63°, угол перигея $\omega=90^\circ$.

и силовых интегральных схем электронных компонентов и аппаратуры;

- использовать электронные компоненты коммерческого и промышленного классов для космических приложений;
- расширить номенклатуру применяемых интегральных микросхем, источников вторичного электропитания

и силовых интегральных схем и тем самым снизить затраты на комплектацию при производстве космической аппаратуры;

- обеспечить снижение весовых и габаритных параметров аппаратуры по сравнению со стандартными методами конструктивной защиты. ●



ИСПЫТАНИЯ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОЛЕЙ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Испытательная лаборатория ЭМС АО «ТЕСТПРИБОР» проводит испытания по категориям:

- кат. B (sw/cw) ■ кат. F (sw/cw) ■ кат. S (sw/cw и PM) ■ кат. W (sw/cw)
- кат. D (sw/cw) ■ кат. R (sw/cw и PM) ■ кат. T (sw/cw) ■ кат. Y (sw/cw)

Испытания могут проводиться с применением реверберационной камеры по кат. B (pm), кат. D (pm), кат. G (sw/cw), кат. L (sw/cw).

Проверка работоспособности реверберационной камеры по КТ-160 G кат. D с импульсной модуляцией.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ ОТ УГЛА ПОВОРОТА «ТЮННЕРА»

ЧАСТОТА	400 МГц	600 МГц	800 МГц	1 ГГц	2 ГГц	3 ГГц	4 ГГц	5 ГГц	6 ГГц	6 ГГц	7 ГГц	8 ГГц	8 ГГц	9 ГГц	10 ГГц	11 ГГц	12 ГГц	12 ГГц	13 ГГц	14 ГГц	15 ГГц	16 ГГц	17 ГГц	18 ГГц
НАПР. ПОЛЯ E (В/м)	175	175	175	500	750	750	750	750	750	250	250	250	750	750	750 (650)	750 (670)	750 (640)	500	500	500	500	500	500	500 (400)
УГОЛ ПОВОРОТА	302, 81	341,1	341,1	178, 83	254, 7	0	318, 67	283, 03	270, 02	270, 02	55, 84	0	0	281, 81	199, 76	6,82	20, 79	20, 79	227, 84	261, 034	301, 91	48, 82	337, 87	152, 73
УРОВЕНЬ ГЕНЕРАТОРА dBm	-19	-15	-19	-16,1	-14,8	-8,6	-9,9	-6,6	-10	-19,3	-19	-19,6	-8,6	-7,9	3	-3	-3	-7	-10	-6,8	-9,3	-4	0	-1



+7 (495) 657-87-37



tp@test-expert.ru
www.test-expert.ru



125480, г. Москва,
ул. Планерная, д. 7А