

РАДИОПРОЗРАЧНЫЕ УКРЫТИЯ ДЛЯ ПЕРЕДАЮЩИХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ ДАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

В. С. Лосев, А. И. Камецков, А. М. Фертюк

При создании радиолокационных станций дальнего обнаружения возникла необходимость разработки радиопрозрачных укрытий для передающих фазированных антенных решеток, работающих с большой плотностью потока СВЧ-мощности в раскрыте фазированных антенных решеток. Кроме основного требования малых диэлектрических потерь материалы для таких укрытий должны обеспечивать необходимый уровень термического сопротивления (или коэффициента теплопередачи) и быть трудногорючими или негорючими. Как показал опыт радиоприборостроения, такими материалами могут быть полимерные композиционные материалы, использование которых потребовало создание новой высокотемпературной технологии изготовления.

Ключевые слова: радиопрозрачное укрытие, полимерные композиционные материалы, фазированная антенная решетка, радиолокационная станция, электромагнитное поле.

Введение

В первых радиолокационных станциях дальнего обнаружения (РЛС ДО) технологическая аппаратура размещалась в отопляемых железобетонных сооружениях, а фазированные антенные решетки (ФАР) с частотно-фазовым управлением – в специально разработанных антенных павильонах. Уровни излучаемой СВЧ-мощности допускали использование радиопрозрачных укрытий (РПУ), изготовленных из высокотехнологичной обработанной фанеры. На рис. 1 – 3 показано одно из таких укрытий после длительного периода эксплуатации [1].

Общая площадь РПУ составляет несколько тысяч м². Укрытия подобного типа работают с выходной излучаемой средней СВЧ-мощностью, равной несколько МВт, что соответствует значению E -напряженности, равному 600 В/м по формуле:

$$E = \sqrt{120\pi \frac{P_{\text{ср}}}{S}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ср}}$ – выходная излучаемая средняя СВЧ-мощность, Вт; S – площадь РПУ, м².

Такие значения E -напряженности составляют определенные проблемы как по радиопрозрачным материалам, так и по конструкции.

Общие технические параметры рассматриваемого РПУ представлены в табл. 1.

Переход на особо ракетно-опасных направлениях на РЛС ДО с более высоким уровнем мощности (ВУМ) излучения для обеспечения дальности действия до нескольких тысяч км привел к ряду аварий на передающих ФАР первых многофункциональных радиолокационных станций (МРЛС). Такие аварии связаны прежде всего с материалами, из которых были изготовлены панели РПУ [2 – 5].

Таблица 1

Общие технические параметры радиопрозрачного укрытия

Параметр	Значение
Диапазон радиоволн, б/р	Метровый
Сектор сканирования, град.	90
Площадь укрытия, м ²	~3000
Выходная излучаемая средняя СВЧ-мощность, Вт	$(2 \div 3) \cdot 10^6$
Рабочая температура, °С	от –50 до +50



Рис. 1. Радиопрозрачное укрытие радиолокационной станции дальнего обнаружения

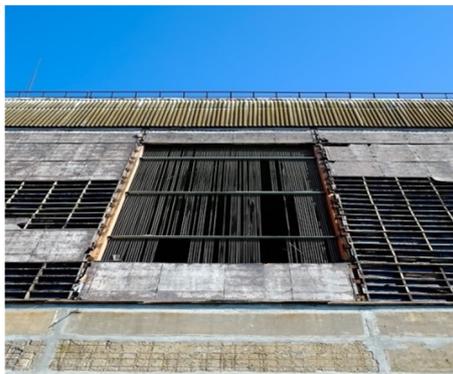


Рис. 2. Фрагмент (снаружи) центральной части радиопрозрачного укрытия радиолокационной станции дальнего обнаружения

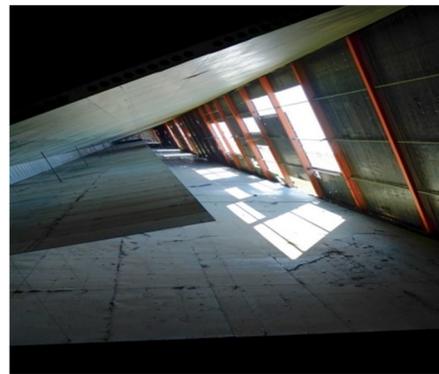


Рис. 3. Фрагмент (изнутри) радиопрозрачного укрытия радиолокационной станции дальнего обнаружения

Первая авария (пожар) произошла на РЛС ДО, размещенной на объекте в северной части страны. Тушение горящего РПУ из брандспойтов мобильных средств пожаротушения эффекта не дало, так как горел внутренний слой из пенополистирола (ППС). С причинами возникновения пожара на передающем центре станции разбиралась комиссия, состоящая из ведущих разработчиков, конструкторов и технологов в области антенных устройств [6].

При разборе были рассмотрены различные версии пожара:

1. Связано с управлением фазовыми фронтами в раскрыве ФАР, так как управление фазой осуществлялось фазовращателями от аппаратуры фазирования, в которой отсутствовали ограничения по пределам выдачи кодов управления фазовращателями.

2. Возгорание на передающей радиоаппаратуре станции.

3. Горючие материалы, которые применялись при изготовлении передающего РПУ, не были пригодны для данного использования, так как при проведении испытаний макетов фрагмента РПУ на различные воздействия, в том числе на нагрев при воздействии высокой плотности потока СВЧ-мощности электромагнитного поля (ППМ ЭМП), разработчиками было отмечено, что при превышении температуры выше 120°C происходит нагревание наполнителя между слоями РПУ – ППС с набуханием и выделением газа. При испытаниях было зафиксировано, что газ является горючим.

В заключении комиссии было отмечено, что причиной пожара стал выделяемый газ, а причиной возгорания укрытия – длительное воздействие повышенной ППМ ЭМП за счет нахождения луча ФАР за границами сектора сканирования, которая достигала десятки kВт/м^2 .

Было принято решение о восстановлении РЛС ДО с использованием новых термостойких радиопрозрачных материалов. При этом было подчеркнуто, что на некоторых объектах, таких как МРЛС, в передающих РПУ использовались такие же материалы, что и в семействе РЛС ДО, а поскольку все передающие РПУ РЛС ДО выполнены одинаково, то пожароопасность может возникать на всех объектах.

Для передающих ФАР РЛС ДО была проведена доработка конструкции РПУ. Она включала замену используемых радиопрозрачных материалов на трудногорючие и горючего ППС на высокотемпературный и трудногорючий пенопласт, доработку конструкции устройства крепления панелей РПУ к металлическому экрану и доработку аппаратуры управления положением луча антенны, кото-

рая не позволяла выходить лучу за пределы заданного сектора сканирования. Проведенные испытания ФАР с новым РПУ подтвердили его теплоизоляционные параметры (термическое сопротивление) и пожаростойкость, что позволяет эксплуатировать укрытие более 35-ти лет.

Была создана кооперация заводов-изготовителей и заводов-поставщиков материалов и определены технология изготовления и порядок замены РПУ, отработавших свой срок службы. Работы были разделены на несколько этапов в рамках составных частей опытно-конструкторских работ.

В дальнейшем пожар произошел на приемном РПУ РЛС ДО, развернутом объекте в южной части страны. На рис. 4 показано горящее приемное РПУ [7].

По характеру горения РПУ был сделан предположительный вывод о том, что поджег произошел с внешней стороны устройства. Горючесть была обусловлена тем, что РПУ было изготовлено из горючих материалов. Это было первое сгоревшее РПУ приемной ФАР подобной станции. В общем случае проблемы такого характера возникают на передающих укрытиях с большой ППМ ЭМП в раскрыве ФАР.

Отличие МРЛС от семейства РЛС ДО, с точки зрения передающего РПУ, заключается в том, что у первого устройства излучаемая ФАР мощность в несколько раз выше, составляя десятки kВт/м^2 , и работает она в сантиметровом диапазоне, что вызывает дополнительную пожароопасность.

Главным предприятием (ГП) было решено для передающих ФАР МРЛС применить совершенно новые материалы и новую технологию. В результате сложнейших работ и многочисленных видов испытаний остановились на материалах, выполненных на основе фторопластов с кварцевой основой [8]. Данные материалы выдерживают температуру в сотни $^{\circ}\text{C}$, имеют наименьшие диэлектрические потери при прохождении через них большого потока СВЧ-мощности, обладают высокой гидрофобностью, высокой прочностью и устойчивостью к температурным перепадам. Выбранные материалы и конструкционные решения обеспечивали электрическую прочность в десятки kВ/м ($E \geq 10^3 \text{ kВ/м}$). К недостаткам материала можно отнести его деструкцию, вызванную воздействием климатических факторов в течение длительного времени, например, солнечной радиацией.

Дополнительно для уменьшения веса и увеличения прочности РПУ было предложено внутреннюю структуру сделать ячеистой, а внешнюю конструкцию – полуцилиндрической в виде «лодки» для увеличения ее естественных гидрофобных свойств (рис. 5).



Рис. 4. Пожар на радиопрозрачном укрытии радиолокационной станции дальнего обнаружения



Рис. 5. Фрагмент радиопрозрачного укрытия для фазированных антенных решеток в виде «полубочки»



Рис. 6. Передающее радиопрозрачное укрытие полигональной радиолокационной станции

Данные конструкции РПУ были изготовлены для полной замены передающих РПУ полигональной радиолокационной станции (ПРЛС) и МРЛС, и была проведена замена старых устройств. При демонтаже было отмечено, что замена была проведена своевременно, так как на внутренней поверхности РПУ уже были обнаружены следы подгара материала. Передающее РПУ ПРЛС приведено на рис. 6.

Выполненная работа позволила снизить пожароопасность на РПУ нового поколения для передающей ФАР МРЛС.

Восстановление технологии создания радиопрозрачного укрытия

Позднее на ФАР МРЛС возникла внештатная ситуация: произошло возгорание, из-за которого закопилось РПУ и обгорели полиэтиленовые излучатели передающих антенных секций. Благодаря тому, что укрытие было изготовлено из негорючих материалов, возгорание локализовалось и было ликвидировано. Для анализа ситуации была создана комиссия. Было принято решение, что РПУ отработало трехкратный срок службы и подлежит замене. Полиэтиленовые излучатели восстановлению не подлежали.

При детальном анализе возможности изготовления РПУ новой модификации выяснилось, что технологическая документация и специализированное оборудование для изготовления утрачены, а опыта по выполнению демонтажа и монтажа РПУ нет.

В 2010 – 2015 гг. была создана новая кооперация заводов-изготовителей и заводов-поставщиков ма-

териалов для изготовления РПУ. С целью разработки данной технологии изготовления РПУ были выделены средства по Федеральной целевой программе (ФЦП). Первоначально были определены полимерные композиционные материалы, из которых должны быть изготовлены укрытия для передающих ФАР. В качестве сырья использовалась лакоткань марки Ф-4Д С ТС-8/3-К-0,28. Основой для лакоткани является кварцевая ткань. Кварцевую ткань изготавливают из нитей, которые вытягивают из кварцевых стержней при нагреве их в пламени горючей смеси природного газа с кислородом по ТУ 6-48-112-94; фторопластовую пленку получают методом экструзии из суспензии фторопласта Ф-4МБ по ТУ 301-05-73-90.

Силами сотрудников ГП была отработана технология изготовления сотовой конструкции (рис. 7) на базе опытно-экспериментального комплекса, созданы испытательные стенды, изготовлены большая и мини-безэховая камеры (рис. 8, 9).

В рамках ФЦП была разработана техническая и технологическая документация, а также изготовлен опытный образец (ОО) секции РПУ полного состава для передающей ФАР МРЛС (рис. 10, 11).

Для изготовления составных частей РПУ полного состава ГП разработало высокотехнологический комплекс, включающий в себя (рис. 12, 13): гидравлический пресс горячего прессования Orma NPC Digit, установку гидроабразивной резки Water Jet Sweden, гибридную температурную камеру FT 2518-600 и вакуумную установку Busch R5.



Рис. 7. Фрагмент макета радиопрозрачного укрытия, выполненный из лакоткани марки Ф-4Д С ТС-8/3-К-0,28



Рис. 8. Внешний вид большой мини-безэховой камеры опытно-экспериментального комплекса

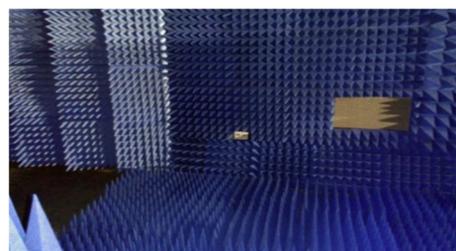


Рис. 9. Вид рабочей зоны большой мини-безэховой камеры опытно-экспериментального комплекса



Рис. 10. Опытный образец секции радиопрозрачного укрытия полного состава для передающей фазированной антенной решетки многофункциональной радиолокационной станции



Рис. 11. Испытания на прочность опытного образца секции радиопрозрачного укрытия полного состава для многофункциональной радиолокационной станции



Рис. 12. Гидравлический пресс горячего прессования Orma NPC Digit



Рис. 13. Установка гидроабразивной резки Water Jet Sweden

В качестве материала для изготовления составных частей укрытия бралась негорючая фторопластовая лакоткань марки Ф-4Д С ТС-8/3-К-0,28, полученная методом трехкратной (или четырехкратной) пропитки суспензией на основе фторопласта Ф-4Д и термической обработки кварцевой ткани ТС-8/3-К согласно ТУ 2249-001-85075123-2015 и ТУ 22.21.42-001-35189643-2017.

Общие технические параметры рассматриваемого РПУ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Общие технические параметры радиопрозрачного укрытия

Параметр	Значение
Диапазон радиоволн, б/р	сантиметровый
Сектор сканирования, град.	±45
Площадь одного укрытия, м ²	~200
Выходная излучаемая средняя ППМ, кВт/м ²	до 60
Рабочая температура, °С	от -55 до +70

ГП разработало программу и методики испытаний ОО составных частей (секций) РПУ, по которым были выполнены испытания. Далее ОО секции РПУ был успешно смонтирован в состав РПУ передающей ФАР МРЛС (рис. 14).

По результатам испытаний ОО секции РПУ было принято совместное решение об изготовлении составных частей (секций) РПУ для всех передающих ФАР МРЛС.

Хочется отметить, что на этапе создания семейства первых РЛС ДО ГП впервые была использована методика тепловизионного контроля [9 – 11], которая в дальнейшем была применена в МРЛС для выполнения экспериментальных проверок нагрева внешней поверхности РПУ передающих ФАР при функционировании станции на ВУМ.

Кроме того, производство РПУ для крупноапертурных ФАР РЛС ДО является очень дорогостоящим и может применяться при единичном или мелкосерийном изготовлении, что делает технологии их создания специфическими, а сами укрытия – уникальными. Так, например, стоимость РПУ, выполненного из негорючей фторопластовой лакоткани марки Ф-4Д С ТС-8/3-К-0,28 в виде сотовой конструкции с учетом используемого сырья достигает ~ 1 млн руб. за м².

Впоследствии по выпущенной конструкторской документации и технологическим процессам был произведен демонтаж старых укрытий, отработавших более 25-ти лет, и монтаж новых РПУ во все передающие ФАР изделия (рис. 15).



Рис. 14. Монтаж опытного образца секции радиопрозрачного укрытия в состав радиопрозрачного укрытия передающей фазированной антенной решетки многофункциональной радиолокационной станции



Рис. 15. Проверка качества монтажа радиопрозрачного укрытия в части герметичности и гидрофобизации, смонтированного в состав передающей фазированной антенной решетки многофункциональной радиолокационной станции

Смонтированные укрытия успешно прошли испытания на ВУМ. По актам межведомственных испытаний было принято совместное решение, по которому смонтированные РПУ вместе с комплектами эксплуатационной документации были переданы в эксплуатацию для дальнейшего использования в модернизированной МРЛС.

Заключение

В данной статье приведена история создания материалов и укрытий для РЛС ДО и МРЛС с большой излучаемой плотностью потока СВЧ-мощности в раскрыве ФАР. Рассмотренную высокотемпературную технологию изготовления радиопрозрачных укрытий можно рекомендовать для создания РПУ передающих ФАР мощных радиолокаторов нового поколения.

Литература

1. РЛС СПРН «Днепр» в Севастополе внутри и снаружи // Живой Журнал : [сайт]. – 2014. – 25 марта. – URL : <https://1greywind.livejournal.com/496310.html>.
2. Системы вооружения ракетно-космической обороны России. [В двух томах]. Т. 1. Системы стратегической противоракетной обороны / Под общ. ред. Ю. И. Борисова. – Москва : Столичная энциклопедия, 2020. – 416 с.
3. Системы вооружения ракетно-космической обороны России. [В двух томах]. Т. 2. Системы ПРН, ПКО, ККП / Под общ. ред. Ю. И. Борисова. – Москва : Столичная энциклопедия, 2020. – 448 с.
4. Авдонин Б. Н. Оборонная мощь России / Б. Н. Авдонин. – Москва : Военный парад, 2009. – 512 с.

5. Первов М. А. Системы ракетно-космической обороны России создавались так / М. А. Первов. – Москва : Авиарус-XXI, 2004. – 540 с.
6. Марков В. И. История создания и развития Центрального научно-производственного объединения «Вымпел» / В. И. Марков // Корпорация «Вымпел». Системы ракетно-космической обороны. – Москва : Оружие и технологии, 2005. – С. 30–36.
7. Линник С. С. Отечественные средства раннего ракетного предупреждения. Часть 1-я / С. С. Линник // Военное обозрение. – 2016. – 9 августа. – URL : <https://topwar.ru/98987-otechestvennyye-sredstva-rannego-raketnogo-preduprezhdeniya-chast-1-ya.html>.
8. Лосев В. С. Пожар. Корпорация «Вымпел». Системы ракетно-космической обороны / В. С. Лосев. – Москва : Оружие и технологии, 2005. – С. 214–218.
9. Бабаян Г. Г. Температурный режим радиопрозрачных укрытий передающих ФАР / Г. Г. Бабаян, Д. К. Гаврилов, В. С. Лосев // Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения и интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения Воздушно-космической обороны (РТИ Системы ВКО-2014): II Всероссийская научно-техническая конференция: Сб. материалов. – Москва : Радиотехника, 2014. – С. 10–109.
10. Бабаян Г. Г. Радиопрозрачные укрытия для передающих фазированных антенных решеток и способы их согласования / Г. Г. Бабаян, В. С. Лосев, Д. К. Гаврилов // III Всероссийская научно-техническая конференция «РТИ Системы ВКО – 2015»: труды конференции. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – С. 173–179.
11. Гаврилов Д. К. Тепловые процессы в радиопрозрачных укрытиях передающих фазированных антенных решеток и способы их контроля / Д. К. Гаврилов, Г. Г. Бабаян,

В. С. Лосев // III Всероссийская научно-техническая конференция «РТИ Системы ВКО – 2015»: труды конференции. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – С. 180–186.

Поступила в редакцию 13.12.2022

*Валентин Степанович Лосев, кандидат технических наук, главный специалист.
Андрей Иванович Камецков, главный специалист, e-mail: akametskov@rti-mints.ru.
Андрей Михайлович Фертюк, инженер 1-й категории, e-mail: afertyuk@rti-mints.ru.
(АО «Радиотехнический институт имени академика А. Л. Минца»).*

RADOMES FOR TRANSMITTING PHASED ARRAY ANTENNAS OF LONG-RANGE RADARS

V. S. Losev, A. I. Kametskov, A. M. Fertyuk

The creating of long-range radars, it became necessary to develop radome for transmitting phased array antennas (PAA) operating with a high-density power flow in the opening of PAA. In addition to the basic requirement of low dielectric losses, materials for such shelters must provide the necessary level of thermal resistance (or film coefficient) and be difficult to ignite or incombustible. As the experience of radio engineering has shown, such materials can be polymer composite materials (PCM), the use of which required the creation of a new high-temperature manufacturing technology.

Keywords: radome, polymer composite materials, phased array antenna, radar, electromagnetic field.

References

1. Radar early warning system "Dnepr" in Sevastopol inside and out // LiveJournal: [website]. – 2014. – 25 march. – URL: <https://1greywind.livejournal.com/496310.html>.
2. Weapon systems of rocket and space defense of Russia. [In two volumes]. Vol. 1. Strategic missile defense systems / Under the general editorship of Yu. I. Borisov. – Moscow : Metropolitan Encyclopedia, 2020. – 416 p.
3. Weapon systems of rocket and space defense of Russia. [In two volumes]. Vol. 2. PRN, PKO, KKP systems / Under the general editorship of Yu. I. Borisov. – Moscow : Metropolitan Encyclopedia, 2020. – 448 p.
4. Avdonin B. N. The defense power of Russia / B. N. Avdonin. – Moscow : Military Parade, 2009. – 512 p.
5. Pervov M. A. The systems of rocket and space defense of Russia were created like this / M. A. Pervov. – Moscow : Aviarus-XXI, 2004. – 540 p.
6. Markov V. I. History of creation and development of the Central Scientific and Production Association «Vimpel» / V. I. Markov // Vimpel Corporation. Rocket and space defense systems. – Moscow : Weapons and Technologies, 2005. – P. 30–36.
7. Linnik S. S. Domestic means of early missile warning. Part 1 / S. S. Linnik // Military Review. – 2016. – 9 august. – URL : <https://topwar.ru/98987-otechestvennye-sredstva-rannego-raketnogo-preduprezhdeniya-chast-1-ya.html>.
8. Losev V. S. Pozhar. Vimpel Corporation. Rocket and space defense systems / V. S. Losev. – Moscow : Weapons and Technologies, 2005. – P. 214–218.
9. Babayan G. G. The temperature regime of radio-transparent shelters of transmitting headlights / G. G. Babayan, D. K. Gavrilov, V. S. Losev // Prospects for the development of long-range radar and integrated systems and complexes of information support for Aerospace defense (Radio and Information Systems for Aerospace Defense): II All-Russian Scientific and Technical Conference: Sat. materials. – Moscow : Radio-technika, 2014. – P. 102–109.
10. Babayan G. G. Radio-transparent shelters for transmitting phased antenna arrays and ways of their coordination / G. G. Babayan, V. S. Losev, D. Gavrilov // III All-Russian Scientific and Technical Conference «Radio and Information Systems for Aerospace Defense – 2015»: proceedings conferences. – Moscow : Bauman Moscow State Technical University, 2015. – P. 173–179.
11. Gavrilov D. K. Thermal processes in radio-transparent shelters of transmitting phased antenna arrays and methods of their control / D. K. Gavrilov, G. G. Babayan, V. S. Losev // III All-Russian Scientific and Technical Conference «Radio and Information Systems for Aerospace Defense – 2015»: Proceedings of the conference. – Moscow : Bauman Moscow State Technical University, 2015. – P. 180–186.

*Valentin Stepanovich Losev, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Chief Specialist.
Andrey Ivanovich Kametskov, Chief Specialist, e-mail: akametskov@rti-mints.ru.
Andrey Mikhailovich Fertyuk, First Category Engineer, e-mail: afertyuk@rti-mints.ru.
(JSC «Academician A. L. Mints Radiotechnical Institute»).*