

ПРИМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-МОДИФИЦИРОВАННОГО ФТОРОПЛАСТА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕННЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ

Л.Н. Иванова, Д.Д. Кохнюк, С.А. Хатилов*

ОАО «ЦКБА», г. Омск; *ФГУП «НИИ им. Л.Я. Карпова», г. Москва

Приведен сравнительный анализ свойств радиопрозрачных материалов, предназначенных для изготовления небольших антенных обтекателей. Показана целесообразность использования структурно-модифицированного политетрафторэтилена (фторопласта, марки ф-4РМ) в качестве материала тонкостенного обтекателя сверхширокополосной спиральной антенны, работающей в непрерывном диапазоне ультравысоких (УВЧ) и сверхвысоких (СВЧ) частот.

Ключевые слова: антенный обтекатель, сверхширокополосная антенны, фторопласт.

APPLICATION OF THE STRUCTURALLY MODIFIED FLUOROPLASTIC IN THE ULTRABROADBAND RADOME PRODUCTION

L.N. Ivanova, D.D. Kohnyuk, S.A. Khatipov

A comparative analysis is given for the properties of radiotransparent materials intended for the compact radome production. There's an expediency shown for the usage of structurally modified polytetrafluoroethylene (ф-4РМ fluoroplastic) as a material of the thin-wall radome for the ultrabroadband spiral antenna operating in the continuous ultrahigh-frequency (UHF) and microwave (MW) bands.

Keywords: radome, ultrabroadband antenna, fluoroplastic.

Антенный обтекатель предназначен для защиты сверхширокополосных антенн, работающих в диапазоне ультравысоких (УВЧ) и сверхвысоких (СВЧ) частот от влияния климатических факторов, механических, термических и эрозионных воздействий в жёстких условиях эксплуатации, например, при высоких скоростях полёта летательных аппаратов.

Это накладывает ряд требований к конструкции обтекателя, особенно к толщине стенки, к радиофизическим и физико-механическим свойствам материалов, из которых он изготовлен.

Основным требованием, предъявляемым к обтекателю с точки зрения минимизации влияния его на радиотехнические характеристики (РТХ) защищаемой антенны, является достижение максимально возможного коэффициента прохождения (КП) электромагнитных волн через его стенку. Следует отметить, что на изменение исходных характеристик системы антенна – обтекатель влияет не только обтекатель (с его фазово-амплитудными характеристиками), но и сама антенна, которая также имеет свои фазово-амплитудные характеристики. О заметном влиянии антенных обтекателей на ухудшение тактико-технических характеристик, к примеру, бортовых РЛС говорят следующие факты:

1. Даже качественно выполненные антенные обтекатели для РЛС обнаружения и наведения самолетов (типа МиГ и Су) вносят существенные коррективы в дальность действия РЛС, т.к. их коэффициент радиопрозрачности (по мощности) находится в пределах 0,7...0,85.

2. Из-за своей невыгодной в радиотехническом отношении формы самолетные обтекатели вносят угловые ошибки в определение направления на цель до 20 угл. мин; ракетные обтекатели для систем самонаведения являются главным фактором, определяющим угловые ошибки самонаведения и главной причиной, дестабилизирующей работу этих систем.

3. Из-за наличия отражений ВЧ-энергии обтекатель является одним из главных факторов, приводящих к увеличению уровня боковых лепестков системы антенна – обтекатель, что влечет за собой ухудшение работы РЛС [1, 2].

Указанные факты еще раз показывают, что улучшение характеристик РЛС в значительной мере связано с параметрами обтекателя. Этим требованиям наиболее полно отвечают материалы, например, на основе фторопласта.

Известен антенный кожух [3], изготовленный из листа полимера на основе политетрафторэтилена (фторопласта-4). Основным достоинством антенного кожуха является низкий уровень диэлектрических потерь даже в диапазоне «высоких» частот, однако каких-либо сведений, относящихся к прочности, термостойкости и эрозионной устойчивости антенного кожуха в публикации не приведено. Вместе с тем известно, что фторопласт-4 обладает невысоким уровнем физико-механических характеристик, ограничивающим его применение в качестве конструкционного материала. Как в чистом виде, так и в составе композиций фторопласт-4 (Ф-4) имеет высокую ползучесть, низкую износостойкость и чрезвычайно низкую радиационную стойкость.

Создание композиций до сих пор являлось единственным эффективным способом модифицирования фторопласта-4 (Ф-4) с целью улучшения эксплуатационных характеристик. Возможности химического модифицирования Ф-4 крайне ограничены в силу его химической инертности. Однако в последние годы был получен новый материал Ф-4РМ [4, 5] – структурно-модифицированный политетрафторэтилен, который не содержит каких-либо примесей и характеризуется сверхвысокой износостойкостью – в 10^4 раз выше, чем у исходного материала, повышенной радиационной стойкостью – в 10^2 и более раз, сниженной ползучестью – в 10^2 и, самое главное, высокими диэлектрическими характеристиками (на уровне исходного Ф-4), химической и термической стойкостью.

Известен антифрикционный материал на основе фторопласта – 40 (Ф40С5М1,5), содержащий антифрикционную добавку – дисульфид молибдена в количестве 1,5 вес. % [6]. Однако его прочность и эрозионная стойкость недостаточны для использования в качестве материала обтекателя. Фторопласт-4, являясь отличным атмосферостойким диэлектриком, имеющим широкий интервал рабочих температур и низкий коэффициент трения, обладает недостаточными твердостью, хладотекучестью, сопротивлением ползучести и деформацией под нагрузкой, и как следствие, низкой эрозионной стойкостью.

На нашем предприятии в настоящее время с целью защиты антенн от внешних факторов применяется антенный обтекатель, который изготовлен из прочного модифицированного поликарбоната с добавлением дисульфида молибдена [7]. Указанный антенный обтекатель при толщине стенки 2 мм имеет достаточную прочность и является наиболее эрозионно устойчивым по сравнению с другими вариантами обтекателей. Недостатком обтекателя являются повышенные диэлектрическая проницаемость ($2,7 \div 3,1$) и тангенс угла диэлектрических потерь ($0,007 \div 0,009$) материала обтекателя, что приводит к уменьшению КП обтекателя и ухудшает РТХ антенны, особенно в области верхних частот СВЧ диапазона. Кроме того, термостойкость обтекателя $+130^\circ\text{C}$ недостаточна для очень жестких условий эксплуатации (например, $+290^\circ\text{C}$ в течение 7 минут).

Целью данной работы является улучшение эксплуатационно-технических характеристик: повышение прочности, термостойкости и эрозионной устойчивости радиопрозрачного антенного обтекателя с одновременным увеличением коэффициента прозрачности.

Обеспечение всех требований, предъявляемых к тонкостенным радиопрозрачным обтекателям для сверхширокополосных антенн, усложняется тем, что повышение механической прочности, термостойкости, эрозионной устойчивости противоречит интересам радиотехники, приводя к ухудшению радиопрозрачности и искажению диаграмм направленности антенн.

Поэтому специфика тонкостенных обтекателей для сверхширокополосных антенн выдвигает требование обеспечения минимально возможных диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материала обтекателя при одновременном обеспечении механических требований и требований по термостойкости и эрозионной устойчивости. Сложный поиск материала обтекателя с такими уникальными свойствами обычно приводил к отрицательному результату. Вновь разработанный структурно-модифицированный политетрафторэтилен марки Ф-4РМ, применяемый как триботехнический материал для поршневых колец, подшипников, манжет, вкладышей, уплотнителей, был рассмотрен для применения в радиотехнических целях, в частности, для использования в качестве материала для изготовления тонкостенных антенных обтекателей.

Указанная цель достигается за счёт того, что сверхширокополосный антенный обтекатель, имеющий полуцилиндрическую или полусферическую поверхность с равной

или увеличивающейся к основанию толщиной стенки, изготавливается из структурно-модифицированного политетрафторэтилена и имеет тонкостенную конструкцию с толщиной стенки в центральной части 1,5-3,5 мм.

Сравнение свойств Ф-4РМ, поликарбоната ПК-М-2 и Ф-4 представлено в таблице.

Таблица. Сравнительные характеристики структурно-модифицированного политетрафторэтилена, поликарбоната ПК-М-2 и Ф-4

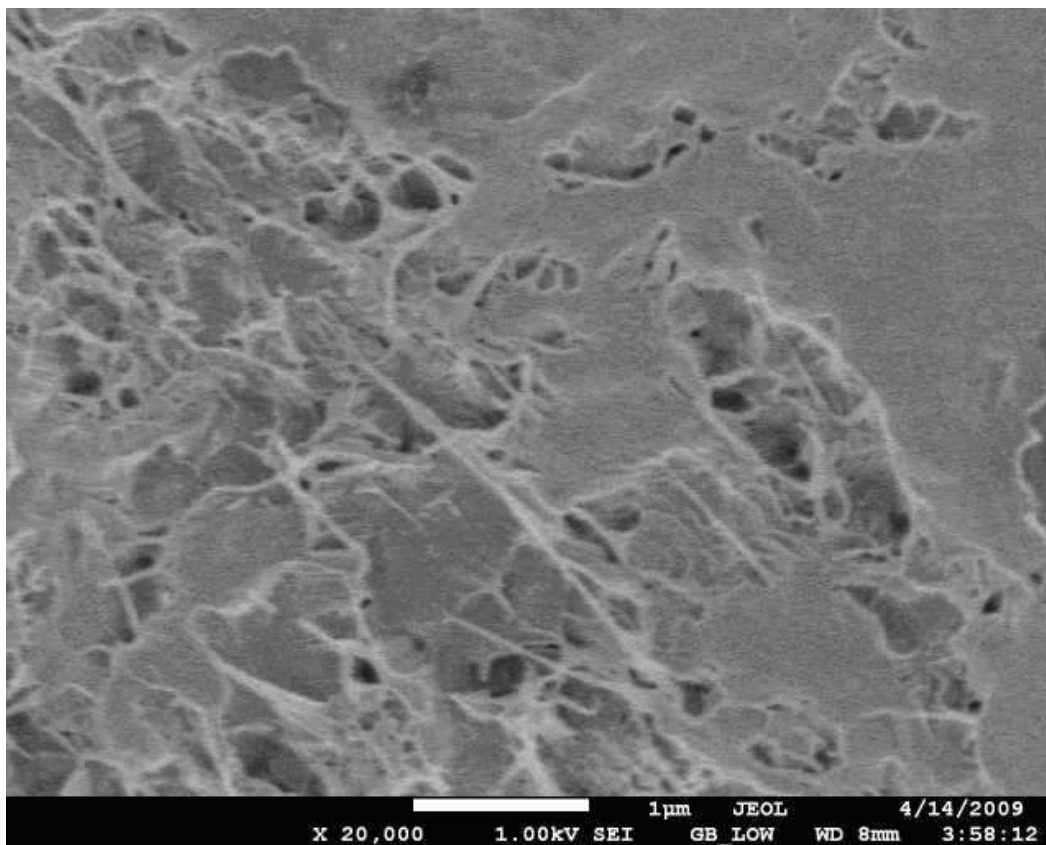
| Параметры | Структурно-модифицированный политетрафторэтилен марки Ф-4РМ | ПК-М-2 ТУ 6-06-47-89 | Ф-4 ГОСТ10007-80 |
|--|---|-------------------------|---------------------|
| Плотность, г/см ³ | 2,20 – 2,21 | 1,23 – 1,25 | 2,14 – 2,16 |
| Пористость, % | 0,1 – 0,2 | – | 1 – 3 |
| Ударная вязкость, КДж/см ² | Не разрушается более 100 | 30 | 100 |
| Диэлектрическая проницаемость | 2,1÷2,2 | 2,7÷3,1 | 2,1÷2,2 |
| Тангенс угла диэлектрических потерь | 0,0002÷0,0003 | 0,007÷0,009 | 0,0002÷0,0003 |
| Диапазон рабочих температур при умеренных нагрузках до 3 МПа | -260°÷+250°С | -60°÷+130°С | -260°÷+100°С |
| Термостойкость при 250°С, часы | До 1000 | – | До 1000 |
| Модуль упругости при сжатии, МПа | 600 | 83 | 350-400 |
| Интенсивность износа в режиме палец-диск, (25 кг/см ² ; 1 м/с, Ra = 0,15, HRc=0,45), мкм/км | 0,1-0,3 | – | 2000 |
| Радиационная стойкость (вакуум), Мрад | 300 | 50 | 1 |

Из таблицы видно, что структурно-модифицированный политетрафторэтилен обладает лучшими механическими свойствами, термостойкостью, радиационной стойкостью и эрозионной устойчивостью, а его диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь меньше по сравнению с поликарбонатом.

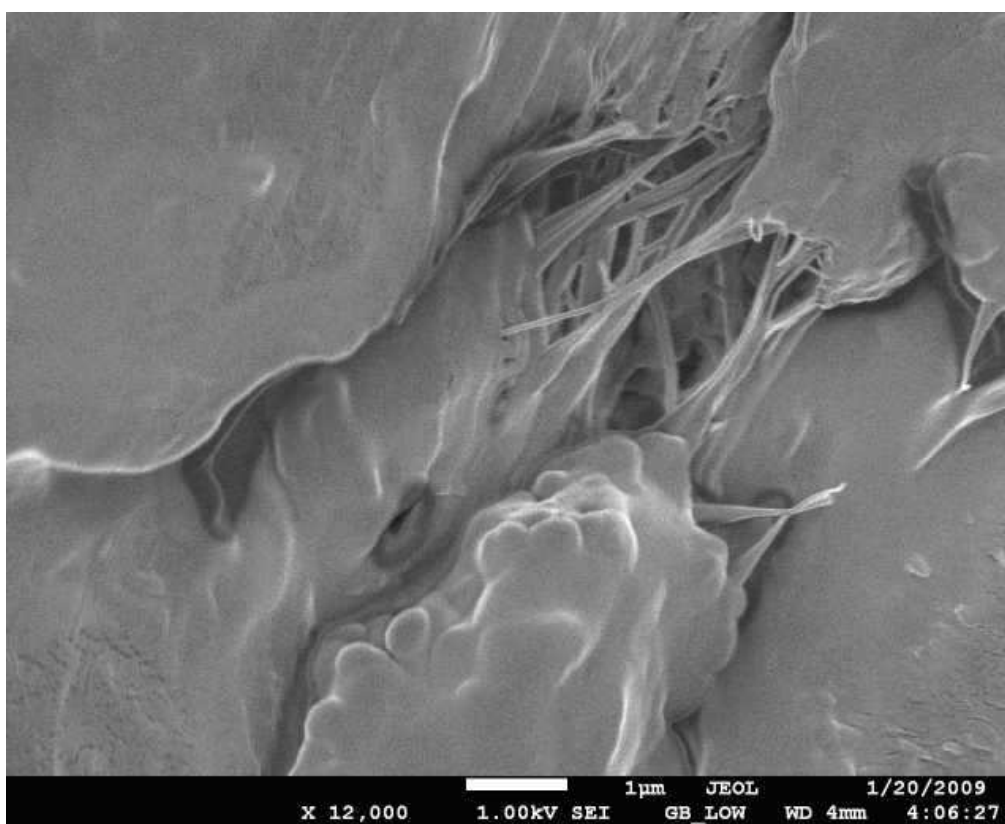
Блочный фторопласт-4 характеризуется довольно высокой пористостью 1-3%. Эта пористость формируется в процессе спекания порошка. В связи с тем, что фторопласт-4 имеет высокую молекулярную массу (то есть длинные полимерные цепи) и очень высокую вязкость в расплаве (из-за особенностей формирования и строения кристаллической фазы), спекание не позволяет добиться однородной непористой структуры. На рис. 1 представлены типичные микрофотографии промышленных образцов блочного фторопласта-4 при различном увеличении. Видно, что в объеме образца имеются множественные поры. В области пор формируются надмолекулярные структуры, отличные от основной массы полимера. Масштаб описываемых структур находится в интервале 10-100 нм.

Следует упомянуть еще два фактора, которые способствуют формированию устойчивой и регулярной пористости ПТФЭ – это низкая поверхностная энергия и малая растворимость газов в кристаллической фазе. Первый фактор способствует сохранению в вязкой среде структур с повышенным свободным объемом, другими словами, сохранению “пузырьков”, которые не могут «схлопнуться» за счет поверхностного натяжения. Второй – приводит к тому, что в области высоких температур при спекании порошка растворенные в полимере газы стремятся выпасть в отдельную фазу.

После радиационного воздействия эти структуры существенно изменяются (количественно и качественно). В целом (в среднем) происходит гомогенизация надмолекулярной структуры, пористость снижается в 10 и более раз (см. таблицу). Поры практически исчезают (рис. 2). Снижение пористости способствует увеличению модуля упругости, предела текучести и улучшению упругих свойств (см. таблицу).

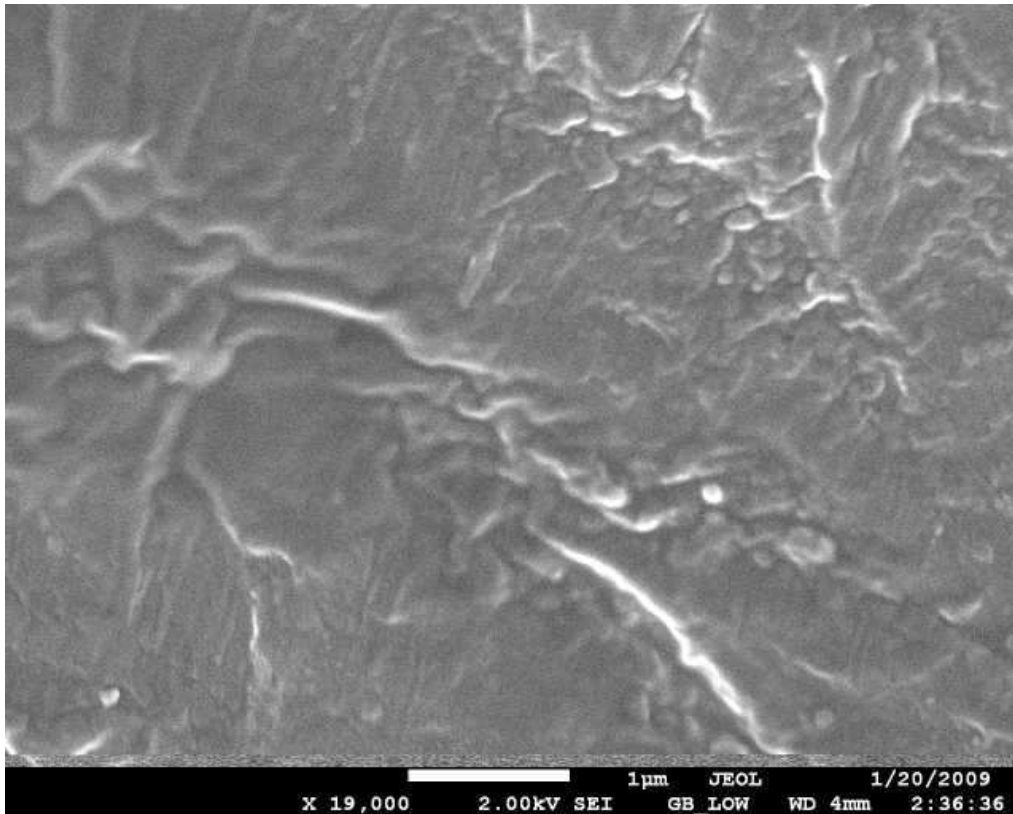


А)

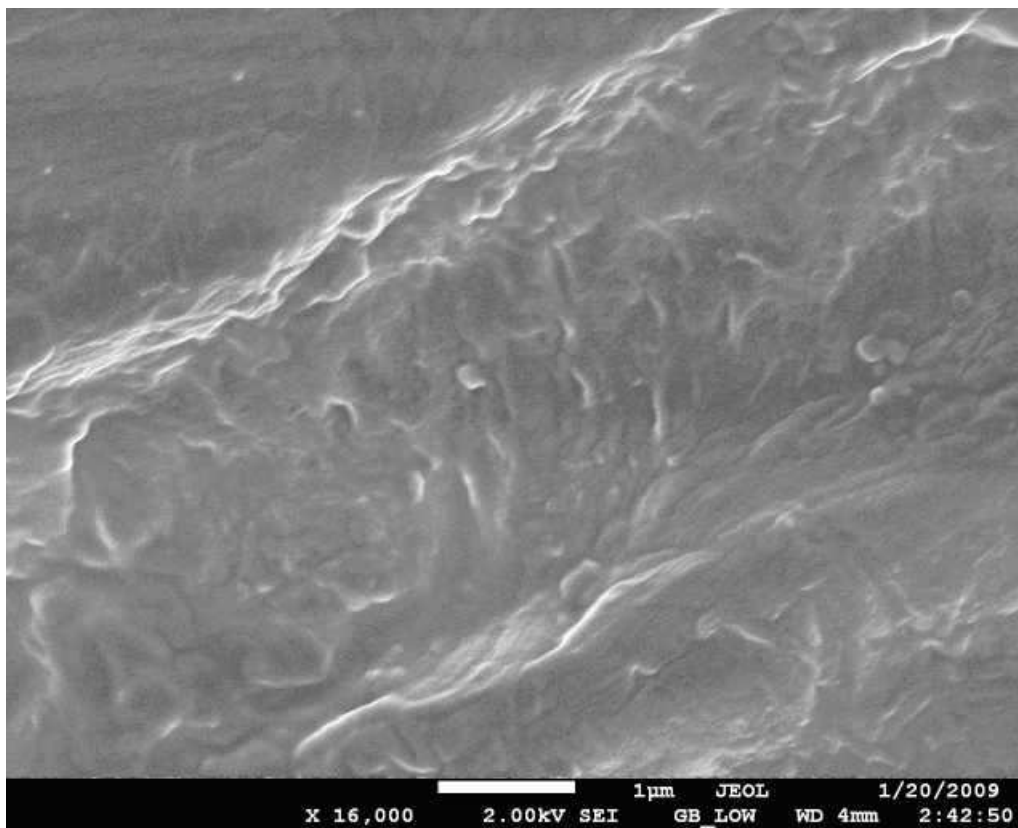


Б)

Рис. 1. Примеры пористых структур в объеме исходных образцов блочного фторопласта-4 при различном увеличении: А) $\times 20000$; Б) $\times 12000$



A)



Б)

Рис. 2. Типичные микрофотографии блочного фторопласта-4 после радиационного модифицирования, приводящего к образованию однородной (непористой) надмолекулярной структуры при различном увеличении: А) $\times 19000$; Б) $\times 16000$

Проведённые испытания на динамическое воздействие твёрдых частиц показали, что эрозионная устойчивость обтекателя из Ф-4РМ выше, чем у обтекателя из поликарбоната. Скорость весового уноса (v_y , г/сек) для обтекателя из Ф-4РМ составила 0,0002 г/сек против 0,0018 г/сек для обтекателя из поликарбоната.

Проверка тонкостенных антенных обтекателей из Ф-4РМ в натуральных условиях на летательном аппарате со скоростями 2,5-3 М подтвердила их прочность, термостойкость и эрозионную устойчивость при самых жёстких условиях эксплуатации.

Кроме того, антеннам с установленными на них обтекателями из структурно-модифицированного политетрафторэтилена марки Ф-4РМ были проведены следующие механические и климатические испытания:

- испытание на прочность при воздействии широкополосной случайной вибрации;
- испытание на воздействие циклического изменения температур от -60°C – 2 часа, до $+85^{\circ}\text{C}$ – 2 часа, всего 10 циклов;
- испытание на воздействие повышенной влажности $98\pm 2\%$, всего 6 циклов;
- испытание на воздействие пониженной температуры среды -60°C – 2 часа;
- испытание на воздействие повышенной температуры среды $+85^{\circ}\text{C}$ – 2 часа, $+185^{\circ}\text{C}$ – 30 минут, кратковременно в течение 7 минут – $+290^{\circ}\text{C}$.

После каждого испытания проводился осмотр тонкостенных антенных обтекателей, изготовленных из Ф-4РМ, и контролировалась работоспособность антенн (измерялся коэффициент стоячей волны (КСВН)). Антенны и обтекатели из Ф-4РМ испытания успешно выдержали.

Сравнительная проверка КП тонкостенных антенных обтекателей из Ф-4РМ и из поликарбоната показала, что в диапазоне частот выше 9 ГГц КП обтекателей из Ф-4РМ выше, чем у обтекателей из поликарбоната. На частоте 10 ГГц КП обтекателей из Ф-4РМ составил 92% по сравнению с обтекателями из поликарбоната, имеющими КП равный 83%.

Применение структурно-модифицированного политетрафторэтилена марки Ф-4РМ в качестве материала радиопрозрачного тонкостенного антенного обтекателя вместо поликарбоната позволило улучшить РТХ антенны в верхней части СВЧ диапазона:

- коэффициент усиления увеличился до 1,5 раз;
- минимальный коэффициент эллиптичности улучшился в 1,1 раза;
- минимальная ширина диаграмм направленности увеличилась на $4\div 20^{\circ}$;
- уровень боковых лепестков диаграмм направленности уменьшился в $1,5\div 2,2$ раза.

При этом коэффициент перекрытия рабочего диапазона частот антенны с обтекателем не менее 20. На рис. 3 приведены графики коэффициента усиления антенны с обтекателями из Ф-4РМ и поликарбоната. Видно, что антенна с обтекателем из Ф-4РМ имеет больший коэффициент усиления, чем с обтекателем из материала поликарбонат.

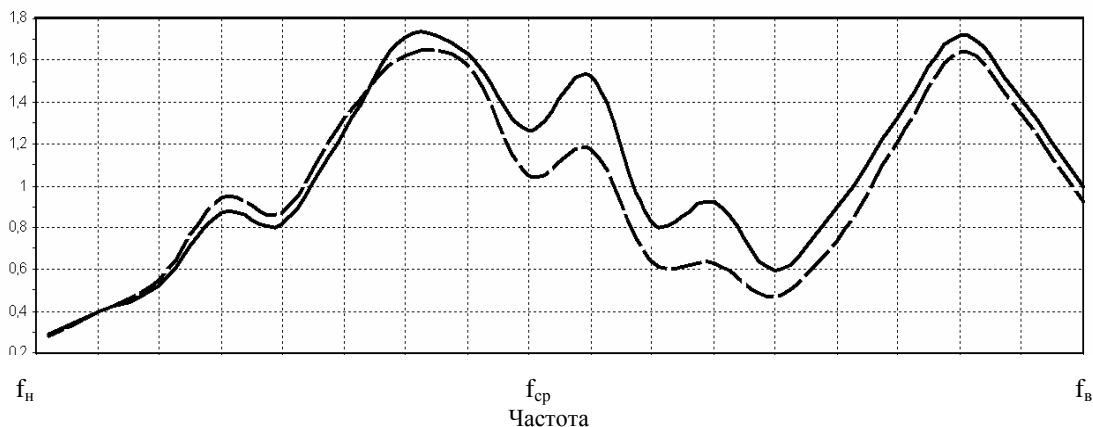


Рис. 3. Графики коэффициента усиления с обтекателями:
 - - - - модифицированный поликарбонат с антифрикционной добавкой;
 — структурно-модифицированный политетрафторэтилен

На рис. 4 и 5 представлены диаграммы направленности антенны на одной и той же верхней частоте рабочего диапазона частот с обтекателями из Ф-4РМ и материала поликарбонат. Из приведённых графиков видно, что диаграммы направленности антенны с обтекателем из материала поликарбонат искажены, имеют двугорбость, в то время как диаграммы направленности антенны с обтекателем из Ф-4РМ имеют удовлетворительную, практически монотонную форму.

Таким образом, как это подтверждают результаты испытаний, решена поставленная задача и достигнут требуемый технический результат – улучшены эксплуатационно-технические характеристики: повышена термостойкость, прочность и эрозионная устойчивость тонкостенного антенного обтекателя с одновременным улучшением коэффициента прозрачности и улучшением РТХ защищаемой антенны.

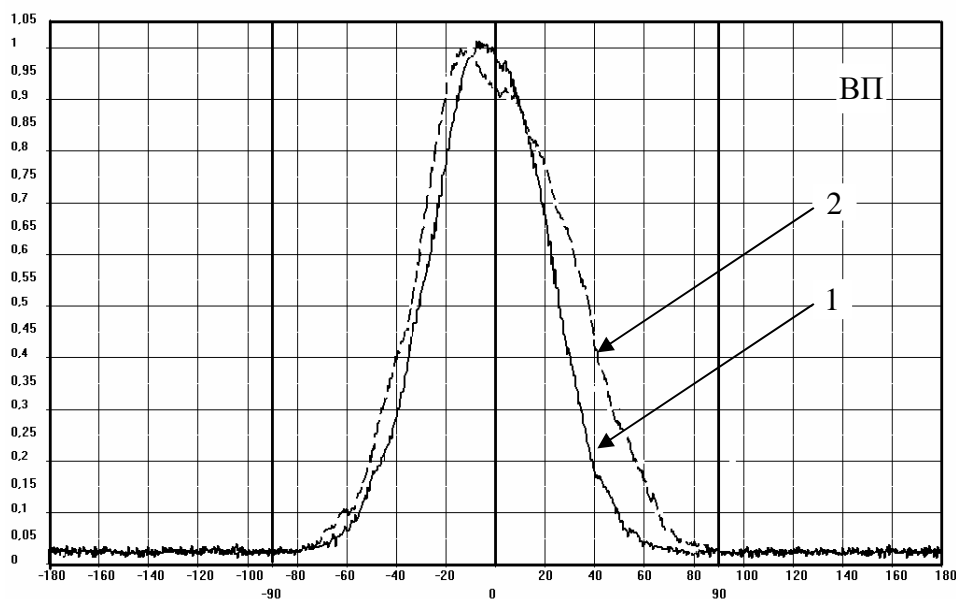


Рис. 4. Диаграммы направленности антенны:
 1 – структурно-модифицированный политетрафторэтилен;
 2 – модифицированный поликарбонат с антифрикционной добавкой

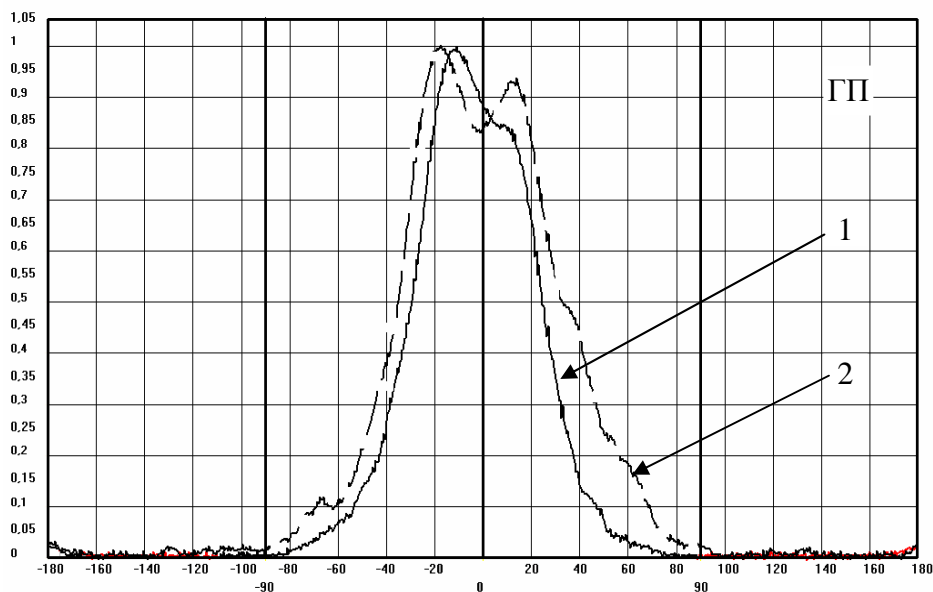


Рис. 5. Диаграммы направленности антенны:
 1 – структурно-модифицированный политетрафторэтилен;
 2 – модифицированный поликарбонат с антифрикционной добавкой

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каплун В.А. Антенные радиопрозрачные обтекатели. – Радиотехника. – 2002. – № 11. – С. 6-15.
2. Бойко М.А., Титов А.Н., Ястребов В.П. Обтекатели РЛС самолетов нового поколения. – Радиотехника. – 2002. – № 11. – С. 39-40.
3. Патент H 01Q 1/42,(11) WO № 030077363 A1, 18.09.2003 г. //Антенный кожух // Tokuhira, Katsusada // Daikin Industries, Ltd.
4. Хатилов С.А., Артамонов Н.А. Способ радиационно-химического модифицирования политетрафторэтилена и материал на его основе. Патент РФ № 2304592, заявл. 31.03.2006, опубл. 20.08.2007.
5. Хатилов С.А., Конова Е.М., Артамонов Н.А. – Российский химический журнал (РЖХО им. Д.И. Менделеева). – 2008. – Т. 52. – № 5. С. 64.
6. Канцельсон М.Ю., Балаев Г.А. Пластические массы. – Ленинград: «Химия». – 1978. – С. 101-103.
7. Седунов Э.И. Антенный обтекатель. Патент РФ № 2292101 С2, опубл. 20.01.2007. – Бюл. № 2.