

УДК 621.371.399

Влияние аэротермомеханических нагрузок на материалы радиопрозрачных теплозащитных вставок и характеристики антенн летательных аппаратов

**И. В. Цетлин, В. Б. Профе,
С. А. Шрамко, А. Р. Вохмин,
В. В. Сорокин, А. Ф. Шишканов,
А. В. Иванов, П. В. Хохлов,
Л. Ю. Нечайкина, О. А. Баулин,
А. В. Сиренко, В. В. Кокшаров,
Е. Н. Макейкин**

На протяжении последних пяти лет в РФЯЦ-ВНИИЭФ экспериментально исследуют аэротермомеханическую стойкость различных материалов радиопрозрачных теплозащитных вставок антенн на кислородо-водородной установке под воздействием теплового потока высокотемпературной струи газа. В испытаниях контролируются коэффициенты усиления и характеристики согласования антенн, защищенных радиопрозрачными теплозащитными вставками из исследуемых материалов. Приведены результаты исследований известных (РТМ-6, РТП-200) и новых материалов радиопрозрачных теплозащитных вставок (нитрид бора, СТМ).

Введение

Знание радиоизлучающих характеристик антенн с радиопрозрачной теплозащитной вставкой (РТЗВ) в реальных условиях полета летательного аппарата (ЛА) позволяет оценить энергетический потенциал радиоканала в целом и сделать вывод о его пригодности. Бортовые антенны после интенсивного аэротермомеханического воздействия на материал РТЗВ имеют коэффициент усиления на 5–20 дБ ниже первоначального, что уменьшает энергетический потенциал радиоканала. Одна из возможностей повысить запас энергетического потенциала – это уменьшить остаточные потери и, как следствие, увеличить коэффициент усиления передающих бортовых антенн. Эту задачу можно решить подбором оптимального материала РТЗВ.

Экспериментальные исследования с имитацией набегающего теплового потока на РТЗВ проводятся на кислородо-водородной установке (КВУ). В опытах с использованием КВУ под воздействием теплового потока высокотемпературной струи газа на РТЗВ реализуется комплекс аэротермомеханических нагрузок, близких к траекторным. Для данных опытов была разработана методика исследований, позволяющая фиксировать параметры антенны и радиоканала при воздействии аэротермомеханической нагрузки на РТЗВ.

В данной статье приведены результаты исследований известного и используемого материала РТП-200 и новых материалов: нитрида бора и СТМ. Следует отметить, что все материалы отечественного производства: РТП-200 изготавливает ОАО «Жилевский завод пластмасс», п. Ситне-Щелканово, Ступинский район Московской области; нитрид бора – производственная компания «Элкерс», г. Саратов; СТМ – ОАО «Композит», г. Королев Московской области.

1. Выбор материала РТЗВ

При гиперзвуковых скоростях полета ЛА в атмосфере требования к характеристикам антенных вставок значительно усложняются.

В качестве материалов для РТЗВ на протяжении многих лет использовались РТМ-6 и РТП-200. Это материалы одного класса, разработанные в 1970–1980 гг. Материалы относятся к классу волокнитов и имеют многокомпонентный состав. Результаты исследований на КВУ подтвердили, что остаточное ослабление в РТЗВ из материала РТМ-6 больше, чем из РТП-200, поэтому материал РТМ-6 мы не рассматриваем.

В связи с увеличением скорости и высоты, при которых необходимо обеспечивать работу бортовых передающих антенн, появилась необходимость в поиске новых материалов для РТЗВ, которые должны обеспечивать:

- стабильность диэлектрических параметров при значительном нагреве и в течение всего времени полета ЛА в атмосфере;
- минимальное ослабление радиосигнала;
- отсутствие коксующегося слоя;
- минимальное остаточное затухание;
- эффективную энтальпию, близкую к эффективной энтальпии штатного теплозащитного покрытия (ТЗП) ЛА;
- низкую теплопроводность;
- газонепроницаемость.

Таким образом, задача выбора перспективных материалов РТЗВ антенн имеет многокритериальный характер. Сравнительные исследования материалов РТЗВ проводились во всем диапазоне рабочих температур по следующим параметрам: диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, эффективная энтальпия, максимальная температура торможения, максимальная температура разрушения.

В результате выбраны наиболее перспективные материалы РТЗВ: нитрид бора и композиционный материал СТМ. В табл. 1 приведены характеристики исследуемых материалов.

Исследуемые материалы (см. табл. 1) подвергали аэротермомеханическим нагрузкам в условиях КВУ. В качестве ТЗП в опытах использовали стеклопластик и углепластик (табл. 2).

Характеристики исследуемых материалов

| Марка материалов | Характеристика | | |
|-------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| | РТП-200 | Нитрид бора | СТМ |
| ε | 4,0 на частоте 1 МГц | 4,2–4,4 (на частоте 10 ГГц) | 2,78–2,84 при температуре 20–1200 °С (на частоте 10 ГГц) |
| $\text{tg } \delta$ | 0,015 на частоте 1 МГц | 0,001 (на частоте 10 ГГц) | ~ 0,004–0,016 при температуре 20–1200 °С (на частоте 10 ГГц) |
| Температура разрушения, К | 2500 | 3300 | 1900* |
| Эффективная энтальпия, ккал/кг | 700 | – | – |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/м* | 0,44–0,47 | 45–55 при температуре 20–1200 °С | 0,48–1,01 при температуре 20–1200 °С |

Примечание: * – максимальная температура без оплавления.

Таблица 2

Опыты с материалами РТЗВ и ТЗП

| Номер опыта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Материал | Нитрид бора | РТП-200 | Нитрид бора | СТМ | РТП-200 |
| ТЗП | Стеклопластик | Стеклопластик | Углепластик | Углепластик | Углепластик |

2. Методика испытаний

На рис. 1 показана схема проведения измерений коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) антенны и ослабления в радиоканале и их регистрации при воздействии струи КВУ на РТЗВ антенны.

Имитатор моделирует боковую поверхность ЛА и включает в себя образец из исследуемого материала ТЗП и РТЗВ антенны.

Анализатор цепей позволяет одновременно измерять КСВН передающей антенны и ослабление в радиоканале и по сетевому кабелю УТР передавать данные на ноутбук для регистрации. Управление анализатором цепей осуществляется по сети УТР с помощью ноутбука.

Основу КВУ составляет полузамкнутая камера сгорания с соплом, оснащенная системами подачи водорода и кислорода, пневмоэлектрической системой дистанционного управления процессом подачи газов в камеру сгорания. В результате сгорания кислородо-водородной смеси формируется высокоскоростная высокотемпературная струя, при обдуве которой на объектах испытаний реализуются значительные аэротермомеханические нагрузки.

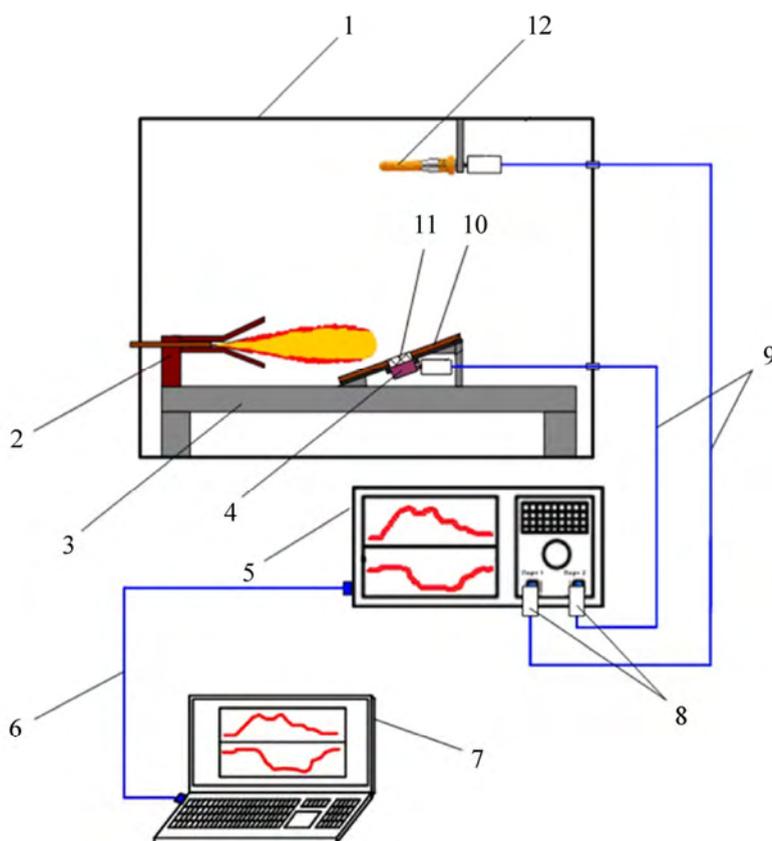


Рис. 1. Схема проведения измерений КСВН антенны и ослабления в радиоканале и их регистрации при работе КВУ: 1 – испытательный бокс; 2 – камера сгорания КВУ; 3 – испытательный стол; 4 – передающая антенна; 5 – анализатор цепей; 6 – кабель сетевой УТР; 7 – ноутбук; 8 – аттенюаторы; 9 – фидер; 10 – имитатор, покрытый ТЗП; 11 – исследуемый материал, установленный в имитатор; 12 – приемная антенна

3. Результаты исследований

3.1. РТЗВ из нитрида бора

На рис. 2, 3 показан имитатор, закрепленный на камере сгорания КВУ, с РТЗВ из нитрида бора до и после проведения опыта.

На рис. 4, 5 приведены графики изменения КСВН (Δ КСВН) и ослабления радиосигнала в радиоканале (Δ П) при проведении опыта с РТЗВ из нитрида бора и ТЗП из стеклопластика (опыт № 1) и углепластика (опыт № 3) соответственно.

Из рис. 4 видно, что за время воздействия в опыте № 1 ослабление радиосигнала за счет продуктов горения ТЗП, изменения КСВН антенны, расплавления, уноса и изменения диэлектрических свойств антенной вставки из нитрида бора составило не более 7,4 дБ. Остаточные потери в исследуемом образце РТЗВ из нитрида бора составили не более 3,5 дБ.

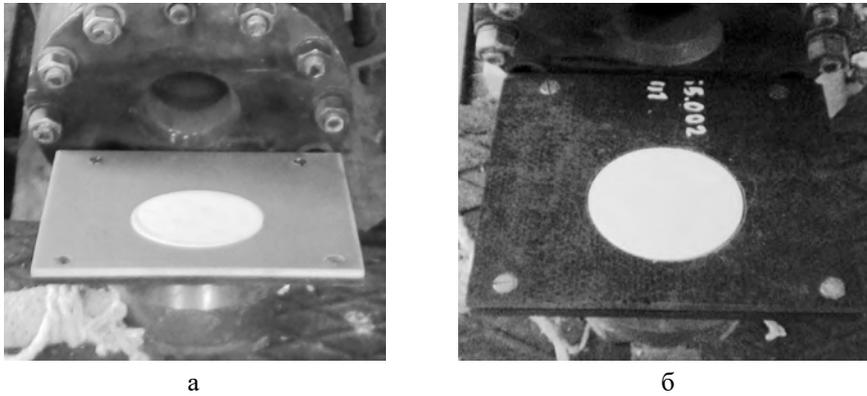


Рис. 2. Имитатор, закрепленный на камере сгорания КВУ, до опыта: ТЗП – стеклопластик (а), ТЗП – углепластик (б)

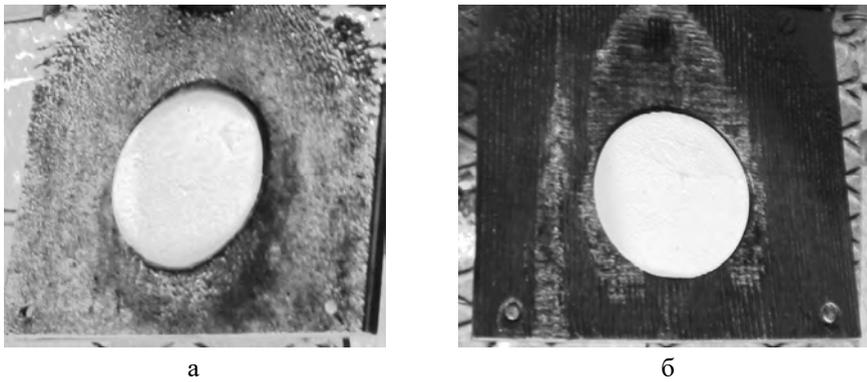


Рис. 3. Имитатор, закрепленный на камере сгорания КВУ, после опыта: ТЗП – стеклопластик (а), ТЗП – углепластик (б)

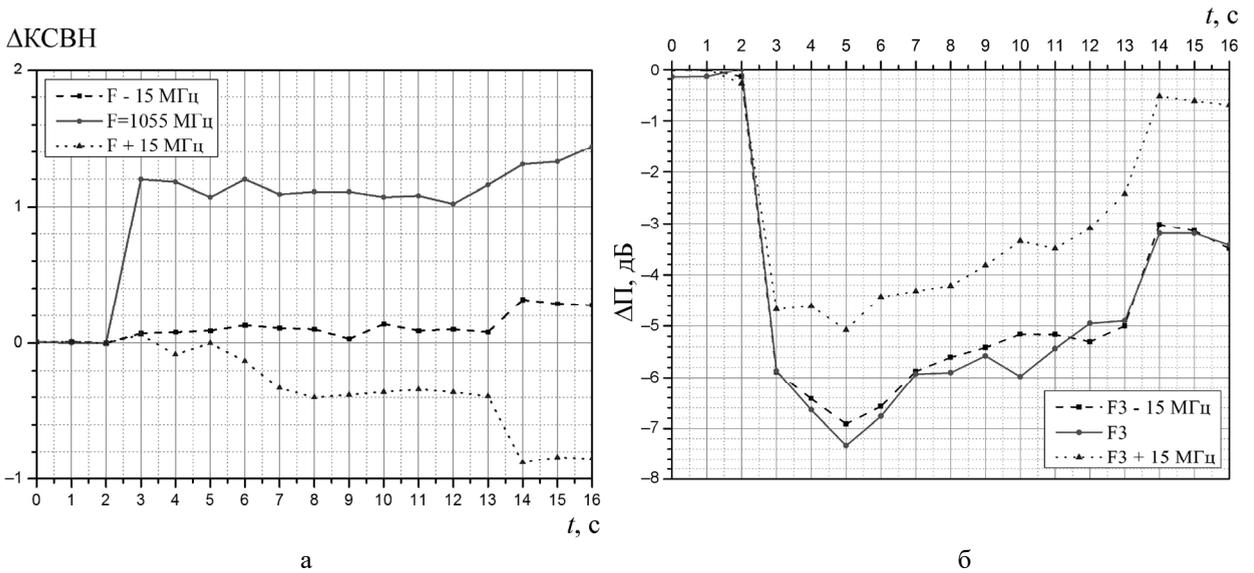


Рис. 4. Изменение КСВН антенны (а) и ослабление радиосигнала в радиоканале (б) с РТЗВ из материала нитрид бора и ТЗП из стеклопластика. Время воздействия 2–13 с

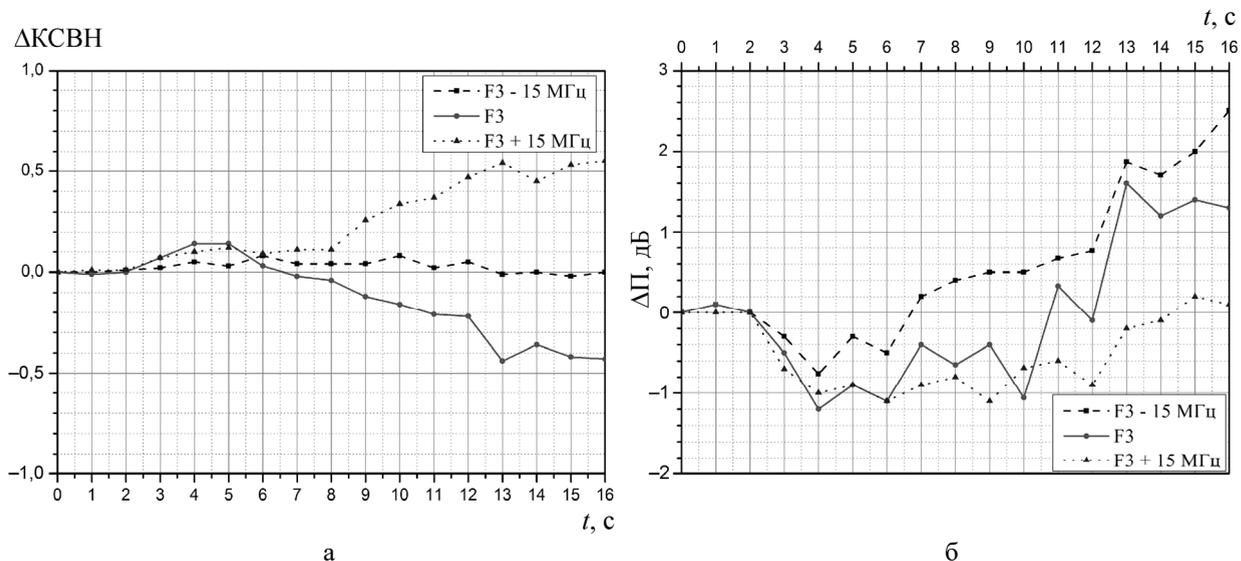


Рис. 5. Изменение КСВН антенны (а) и ослабление радиосигнала в радиоканале (б) с РТЗВ из нитрида бора и ТЗП из углепластика. Время воздействия 2–13 с

В опыте произошло оплавление антенной накладкой из материала ПА-6. Причиной разрушения является повышенная теплопроводность РТЗВ из нитрида бора.

На рис. 6 показаны тыльная сторона объекта испытаний (слева) и антенной накладкой (справа).

На рис. 7 показана антенная накладка с внешней (слева) и внутренней стороны (справа). Как видно, плавлению подверглась только внешняя поверхность антенной накладкой. В результате теплового воздействия накладкой деформировалась, что способствовало нарушению согласования антенны.

В опыте № 3 повторно исследовали нитрид бора с ТЗП имитатора из углепластика. Антенна была защищена накладкой из материала РТП-200, которая сохранила свою геометрию под воздействием нагрева и не внесла дополнительный вклад в изменение КСВН и ослабление в радиоканале в отличие от вставки из материала ПА-6, применявшейся в предыдущем опыте.

Из рис. 5 видно, что во время воздействия ослабление радиосигнала за счет продуктов горения ТЗП, изменения КСВН антенны, расплавления, уноса и изменения диэлектрических свойств антенной вставки из нитрида бора составило не более 1,5 дБ. Остаточные потери в исследуемом образце составили ~0 дБ.

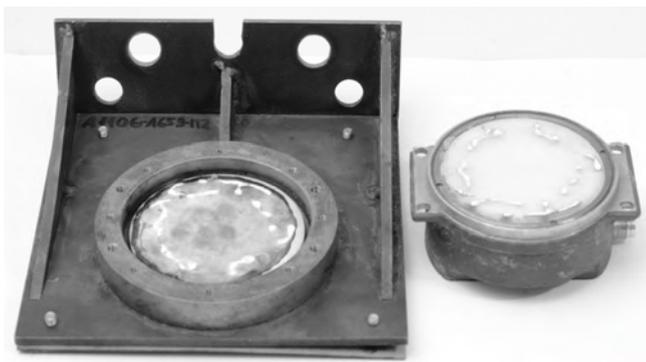


Рис. 6. Объект испытаний после опыта



Рис. 7. Антенная накладкой

3.2. РТЗВ из РТП-200

На рис. 8, 9 показан имитатор, закрепленный на камере сгорания КВУ, с РТЗВ из материала РТП-200 до и после проведения опыта.

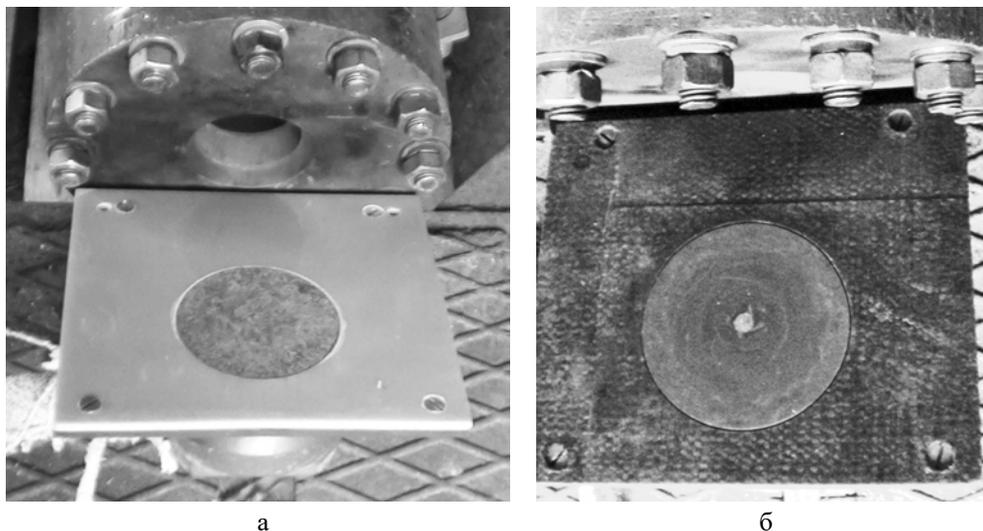


Рис. 8. Имитатор, закрепленный на камере сгорания КВУ, до опыта:
ТЗП – стеклопластик (а), ТЗП – углепластик (б)

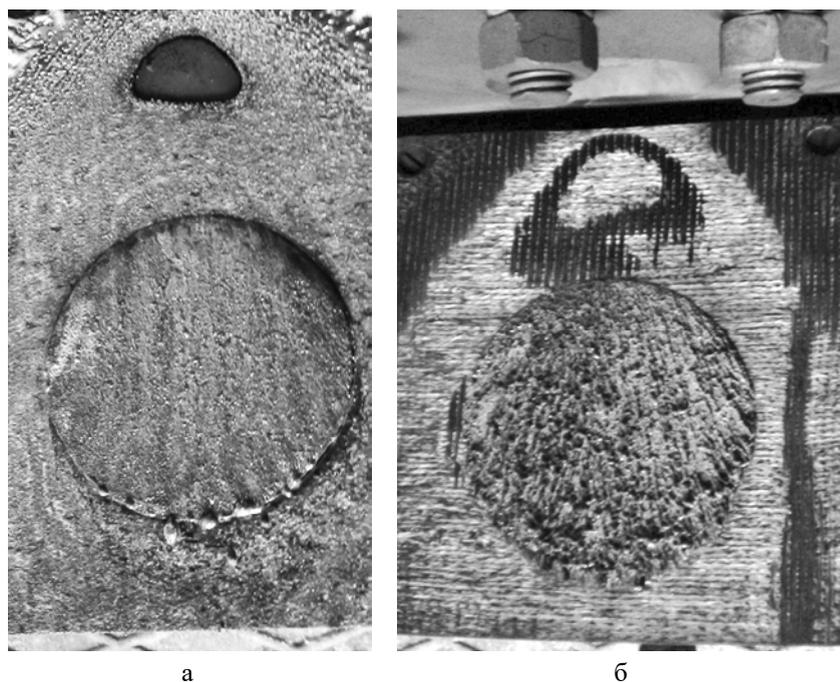


Рис. 9. Имитатор, закрепленный на камере сгорания КВУ, после опыта:
ТЗП – стеклопластик (а), ТЗП – углепластик (б)

На рис. 10, 11 приведены графики изменения КСВН (Δ КСВН) и ослабления радиосигнала в радиоканале (Δ П) в опыте с РТЗВ из материала РТП-200 и ТЗП из стеклопластика (опыт № 2) и углепластика (опыт № 5) соответственно.

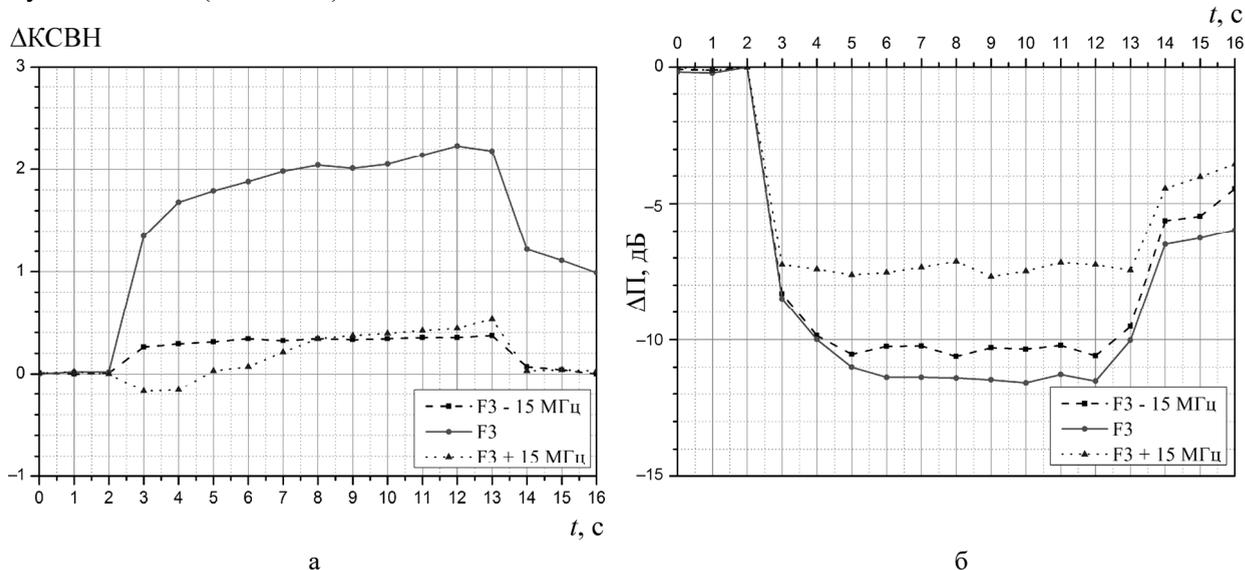


Рис. 10. Изменение КСВН антенны (а) и ослабление радиосигнала в радиоканале (б) с РТЗВ из материала РТП-200 и ТЗП из стеклопластика. Время воздействия 2–13 с

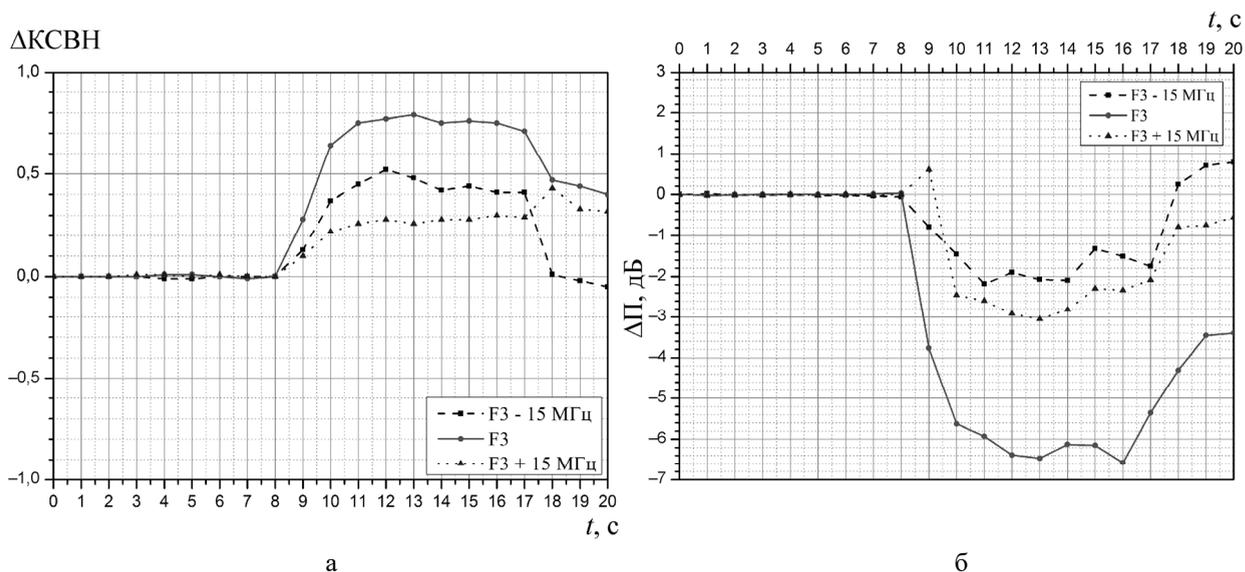


Рис. 11. Изменение КСВН антенны (а) и ослабление радиосигнала в радиоканале (б) с РТЗВ из материала РТП-200 и ТЗП из углепластика. Время воздействия 3–17 с

Из рис. 10 видно, что за время воздействия в опыте № 2 ослабление радиосигнала за счет продуктов горения ТЗП, изменения КСВН антенны, расплавления, уноса и изменения диэлектрических свойств антенной вставки из РТП-200 составило не более 12 дБ. Остаточные потери в исследуемом образце составили не более 7 дБ.

В опыте № 5 (см. рис. 11) было проведено повторное исследование материала РТП-200 с ТЗП из углепластика. Из рис. 11 видно, что за время воздействия ослабление радиосигнала за счет продуктов горения ТЗП, изменения КСВН антенны, расплавления, уноса и изменения диэлектрических свойств антенной вставки из РТП-200 составило не более 7 дБ. Остаточные потери в исследуемом образце составили не более 4 дБ.

В опытах № 1, 2, 3, 5 было определено, что продукты горения ТЗП из стеклопластика изменяют КСВН антенны (1,2–2,2) и увеличивают ослабление в радиоканале (5–6 дБ). Ослабление в продуктах горения ТЗП из углепластика и в струе КВУ практически отсутствует.

3.3. РТЗВ из СТМ

На рис. 12 показан имитатор, закрепленный на камере сгорания КВУ, с РТЗВ из материала СТМ и ТЗП из углепластика до и после проведения опыта.

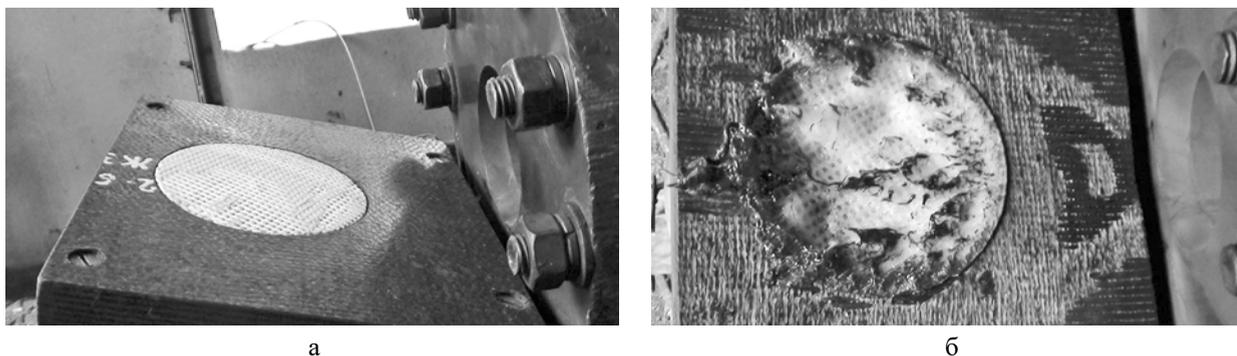


Рис. 12. Имитатор, закрепленный на камере сгорания КВУ: а – до опыта, б – после опыта

На рис. 13 приведены графики изменения КСВН антенны и ослабления радиосигнала в радиоканале в опыте № 4 с РТЗВ из материала СТМ и ТЗП из углепластика.

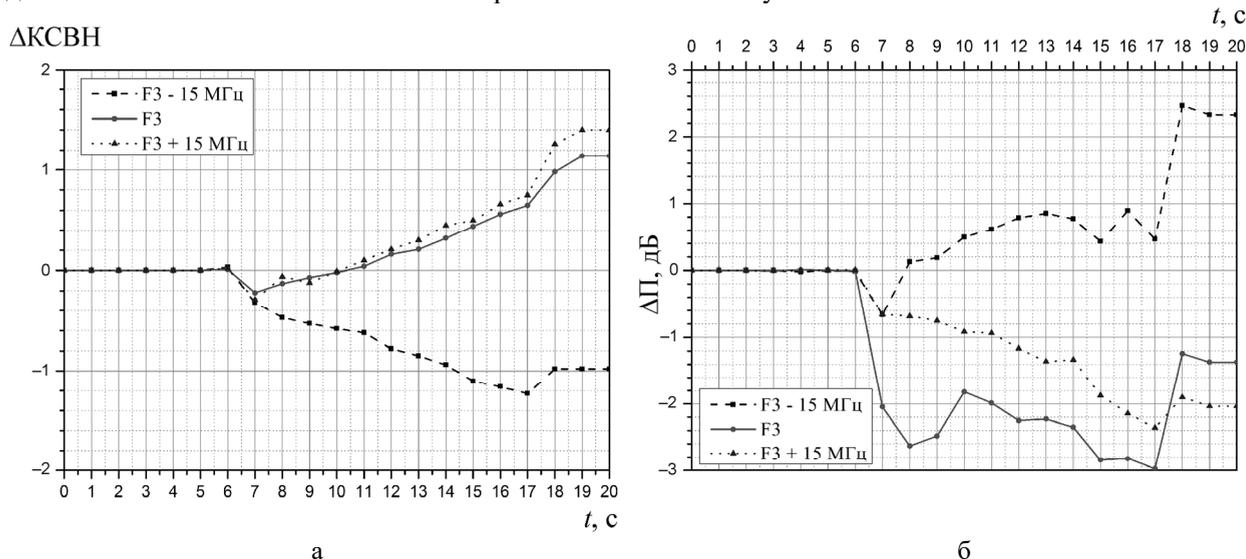


Рис. 13. Изменение КСВН антенны (а) и ослабление радиосигнала в радиоканале (б) с РТЗВ из материала СТМ и ТЗП из углепластика. Время воздействия 3–17 с

Из рисунка видно, что за время воздействия ослабление радиосигнала за счет продуктов горения ТЗП, изменения КСВН антенны, расплавления, уноса и изменения диэлектрических свойств антенной вставки из СТМ составило не более 3 дБ. Остаточные потери в исследуемом образце – не более 2 дБ.

В опыте № 4 были получены одни из минимальных значений изменения КСВН антенны и ослаблений в радиоканале. Антенная накладдка из СТМ заметно оплавилась. Отметим, что изменение КСВН антенны и ослабления в радиоканале начались через 3 с после начала воздействия.

3.4. Сравнительная оценка экспериментальных характеристик антенны и ослабления сигнала в радиоканале

Экспериментальные характеристики антенны и ослабления сигнала в радиоканале приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики антенн и радиоканала в исследованиях материалов РТЗВ антенн в условиях КВУ

| Номер опыта | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|-----------------------------------------------------|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| РТЗМ | | Нитрид бора | РТП-200 | Нитрид бора | СТМ | РТП-200 |
| ТЗП | | Стекло-пластик | Стекло-пластик | Угле-пластик | Угле-пластик | Угле-пластик |
| Характеристика | Изменение КСВН передающей антенны (ΔКСВН) | ≤1,2 | ≤2,2 | ≤0,6 | ≤1,2 | ≤0,8 |
| | Ослабление радиосигнала в продуктах горения ТЗП, дБ | ≤6,0 | ≤5,0 | ≤0,8 | 0,0 | 0,0 |
| | Суммарное ослабление в радиоканале (ΔП), дБ | ≤7,4 | ≤12,0 | ≤1,5 | ≤3,0 | ≤6,6 |
| | Остаточное ослабление в радиоканале, дБ | ≤3,4 | ≤7,0 | 0,0 | ≤2,0 | ≤3,4 |

Сравнение экспериментальных результатов показывает, что при аэротермомеханическом воздействии струи КВУ образец из нитрида бора имеет меньшие отклонения по согласованию антенны (КСВН), суммарному и остаточному ослаблениям в радиоканале, а также по механическим изменениям.

Эксперименты показали, что РТЗВ, изготовленная из нитрида бора, позволяет минимизировать потери в радиоканале при воздействии струи КВУ и имеет минимальные остаточные потери после ее воздействия.

Образец из нитрида бора обладает более высокой теплопроводностью, и этот фактор необходимо учитывать при разработке бортовых передающих антенн. В их конструкции должны применяться термостойкие материалы.

Продукты сгорания ТЗП из углепластика не влияют на ослабление сигнала в радиоканале, КСВН антенны и остаточное ослабление в радиоканале в отличие от стеклопластика, продукты сгорания которого оказывают существенное влияние.

РТЗВ из материала СТМ позволяет снизить до минимума потери в радиоканале при воздействии струи КВУ и имеет минимальные остаточные потери после ее воздействия. В то же время образовавшийся расплав антенной вставки требует дальнейших исследований.

При использовании нитрида бора в качестве РТЗВ антенн летательных аппаратов необходимо рассмотреть работы по созданию многослойных (из нескольких материалов) конструкций РТЗВ для защиты бортовых антенн.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований материалов радиопрозрачных теплозащитных антенных вставок в условиях кислородо-водородной установки показали, что применяемые методики и технические решения являются эффективными. Используемая методика может быть основой дальнейших исследований аэротермомеханических свойств теплозащитных материалов, целью которых должно быть создание РТЗВ из новых материалов с минимальным значением остаточных потерь, оптимизация конструкции и формы антенных вставок, подтверждение полученных результатов исследованиями и испытаниями.

Influence of Aerothermomechanical Loadings on the Materials of Radiolucent Heat-Shield Inserts and on the Characteristics of Antennas of Flying Vehicles

I. V. Tsetlin, V. B. Profe, S. A. Shramko, A. R. Vokhmin, V. V. Sorokin, A. F. Shishkanov, A. V. Ivanov, P. V. Khokhlov, L. Yu. Nechaykina, O. A. Baulin, A. V. Sirenko, V. V. Koksharov, Ye. N. Makeykin

During the last five years RFNC-VNIIEF has been carrying out experimental researches of aero-thermomechanical resistance of different materials of antenna's radiolucent heat-shield inserts (RHSI) in the hydro-oxygen plant under the impact of heat fluent of high temperature gas current. Main characteristics which are controlled within tests are amplification factors and parameters of antennas matching protected by the RHSI from investigated materials/ The article gives the results of the investigations of known (RTM-6, RTP-200) and new RHSI materials (boron nitride, STM).