

УДК 621.396.67

## СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН С СООСНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ИСТОЧНИКА ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А. А. Оводенко, В. Н. Красюк, А. Р. Бестугин, М. Б. Рыжиков  
ГУАП, «Санкт–Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения»

Получена 16 января 2012 г.

**Аннотация.** Рассмотрены особенности технической реализации измерительного стенда для определения характеристик излучения бортовых антенн, предназначенных для работы в условиях высокотемпературного нагрева. Показано, что при боковом расположении источника нагрева возникают ошибки оценивания радиотехнических характеристик антенн и теплозащитных покрытий. Даны рекомендации по использованию до определённых температур технической реализации стенда, в которой источник нагрева и измерительная антенна объединены в едином корпусе.

**Ключевые слова:** характеристики антенн, измерительный стенд, высокотемпературный нагрев.

**Abstract.** Features of the technical implementation of the measuring booth for determination of board antennas characteristics in conditions with high-temperature heating have been considered. The lateral position of the heat source leads to the errors of estimation characteristics of antennas and thermal barrier coatings. To a certain temperature is best to use the technical implementation of the booth, in which the heat source and the measuring antenna combined into a single housing.

**Key words:** antennas characteristics, booth for measuring, high-temperature heating.

В настоящей статье рассматриваются особенности технической реализации измерительного стенда для определения характеристик излучения бортовых

антенн, предназначенных для работы в условиях высокотемпературного нагрева.

Обычно такие антенны помещаются под слой нагревостойкого диэлектрического материала, выполняющего роль теплозащитного покрытия антенны (ТЗП). Его электрические параметры: значение диэлектрической проницаемости (ДП), тангенс угла потерь изменяются в процессе нагрева и меняют параметры излучения исследуемой антенны [1]. Поскольку аналитический учет влияния изменения всех параметров антенны и ТЗП при изменении температуры представляет собой сложную, многопараметрическую задачу, ее постановка не всегда учитывает изменение структуры физических процессов и степени их влияния на радиотехнические параметры при нагреве. К таким факторам можно отнести неравномерное распределение температуры по поверхности и вглубь ТЗП при различных положениях источника высокотемпературного нагрева (ИВТН). Учитывая это, особую важность приобретает корректное проведение экспериментальных исследований по измерению параметров антенн.

Наиболее простым техническим решением по созданию измерительного стенда является схема, в которой исследуемая антенна подключается к СВЧ генератору через модулятор. В ней ИВТН располагается под углом к нагревостойкой диэлектрической поверхности теплозащитного покрытия (ТЗП) антенны, отдельно от них размещается измерительная антенна и блок регистрации, опорный блок которого также подключен к выходу СВЧ генератора.

В такой схеме значение диэлектрической проницаемости материала ТЗП при действующей температуре определяется посредством сравнения фазы опорного сигнала и фазы сигнала, поступающего от измерительной на блок регистрации. На него также идет сигнал от термопары, встроенной в ТЗП, который дает информацию о температуре.

Когда температурный закон на поверхности и вглубь ТЗП изменяется, это приводит к соответствующему неравномерному распределению диэлектрической проницаемости в ТЗП. Так при боковом нагреве по ТЗП возможно возникновение линейного закона распределения ДП, приводящего к линейно меняющемуся набегу фазы электромагнитной волны, проходящей через ТЗП и, как следствие, к отклонению максимума ДН исследуемой антенны.

Данную ситуацию подчеркивает рисунок 1, на котором представлена измеренная ДН антенны (открытый конец волновода), полученная в случае, когда ИВТН располагался сбоку от ТЗП. Температура нагрева ТЗП составляла порядка 1000°С.

Проблема создания более равномерного закона распределения температуры существует и в системах, предназначенных для исследования изменения физических свойств сверхвысокочастотных (СВЧ) диэлектриков при нагреве.

Наличие ИВТН вблизи исследуемой антенны приводит к неизбежному возникновению дополнительных переотражений электромагнитного поля от корпуса ИВТН. Все это может негативно сказаться на результатах измерения ДН и диэлектрической проницаемости покрытия.

Погрешность измерения ДН антенны, возникающую из-за наличия в зоне измерений ИВТН, можно учесть только при нормальной температуре. Для этого необходимо знать коэффициент отражения от поверхности ИВТН и ДН антенны с ТЗП, измеренную при нормальной температуре. Пренебрегая затуханием электромагнитной волны отраженной от ИВТН (из-за небольших расстояний), оценивают КСВ, формирующийся в антенне за счет переотражения, по формуле

$$\text{КСВ}(\varphi, \theta) = \frac{1 + \sqrt{K_p} |F(\beta, \theta)|^2 \cos \beta}{1 - \sqrt{K_p} |F(\beta, \theta)|^2 \cos \beta},$$

где  $K_p$  – коэффициент отражения от ИВТН по мощности,  $\beta$  – угол между нулевым направлением ДН на максимум при отсутствии ее поворота на угол  $\theta$ ,  $F(\beta, \theta)$  – значение ДН по напряженности в направлении на ИВТН.

Данное изменение мощности учитываем в схеме измерений ДН антенны. В процессе реальных измерений это не приведет к полной компенсации влияния помех от ИВТН в силу того, что при работе ИВТН ТЗП разогревается и искажает исходную ДН антенны  $F(\beta, \theta)$ , которая использована в расчетах поправочного коэффициента. Внесение же коррекции по результатам измерения ДН не приведет к получению истинной ДН антенны, так как измеренная ДН уже искажена в силу переотражений, которые зависят от температуры.

Таким образом, в простой схеме стенда для измерения параметров антенн и ТЗП с боковым расположением ИВТН всегда есть искажения измеряемых параметров, которое тем выше, чем больше температура на поверхности ТЗП.

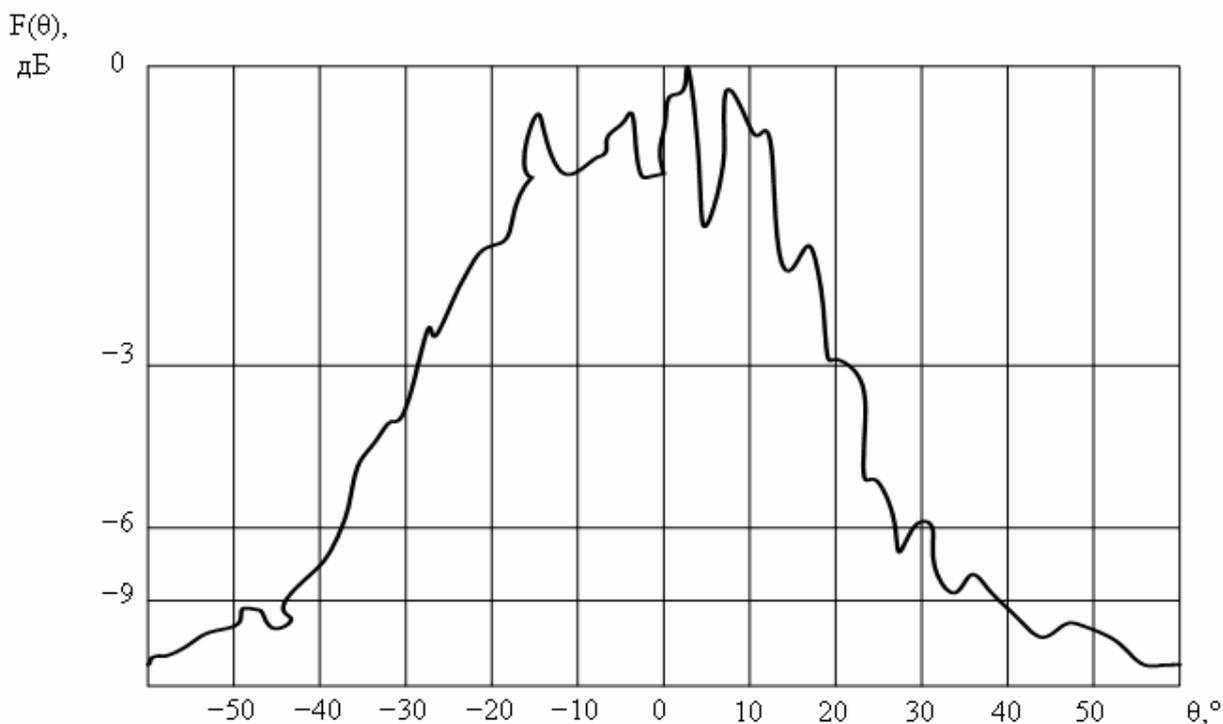


Рисунок 1 – Измеренная ДН антенны при боковом расположении ИВТН.

Зная оценку КСВ, получаем соответствующее уменьшение мощности, отдаваемой антенной на излучение по соотношению

$$\Delta P(\varphi, \theta) = \frac{(\text{КСВ}(\varphi, \theta) - 1)^2}{(\text{КСВ}(\varphi, \theta) + 1)^2} = K_p F(\varphi, \theta)^4 \cos^2 \beta.$$

Если в качестве ИВТН при боковом размещении использовать дуговой плазмотрон [2], то его можно расположить на более отдаленном расстоянии от нагреваемого ТЗП, что при соответствующем размещении уменьшит негативное влияние за счет переотражений. При использовании газокислородной горелки, ее необходимо помещать ближе к ТЗП, но это усиливает негативное влияние на результаты экспериментов за счет дифракции электромагнитной волны на ее корпусе.

С другой стороны, если в качестве ИВТН использовать дуговой плазмотрон, то это также может привести к снижению точности определения ДП и диаграммы направленности (ДН) антенны из-за возникновения в зоне измерений только частично прозрачной струи плазмотрона. Различные свойства плазмы при взаимодействии с электромагнитной волной можно пояснить на простом примере наличия безстолкновительной плазмы, в которой частота электромагнитной волны  $\omega$  много больше соответствующей частоты столкновений ионов  $\nu$ . Тогда ДП описывается известным соотношением

$$\varepsilon = 1 - \frac{N_e e^2}{\varepsilon_0 m_e \omega^2}, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $m_e$  – масса электрона,  $\varepsilon_0$  – абсолютная ДП воздуха,  $N_e$  – действующая концентрация электронов в плазме. В данном случае диэлектрическая проницаемость величина действительная и плазма обладает свойствами диэлектрика. Из (1) следует, что относительная ДП плазмы всегда меньше единицы и зависит от рабочей частоты излучения антенны. Очевидно, что при значительной электронной плотности  $\varepsilon$  может оказаться равной нулю. Можно найти круговую частоту  $\omega_0$ , при которой выполняется данное условие:

собственную (плазменную) частоту –  $\omega_p$ . При  $\omega < \omega_p$  относительная диэлектрическая проницаемость становится меньше нуля. В этом случае электромагнитные колебания не распространяются, а быстро затухают. Все это приводит к необходимости отвода нерадиопрозрачного пламени плазмотрона.

Для уменьшения негативного влияния наличия плазмы на распространение электромагнитных волн и при относительно невысоких температурах нагрева ( $\approx 1000$  °С) в качестве ИВТН вместо плазмотрона можно использовать газокислородную горелку [3]. Такая горелка состоит из корпуса, газового насадка, центральной кислородной трубы, газоподводных патрубков. Чтобы избежать бокового нагрева ТЗП и смещения ДН исследуемой антенны, неравномерного распределения ДП при исследовании ТЗП необходимо применять такую техническую реализацию измерительного стенда (схема представлена на рисунке 2), в которой измерительная антенна установлена внутри ИВТН.

Техническая реализация ИВТН представлена на рисунке 3а. Он содержит корпус (1) с цилиндрической выходной горловиной и кислородоподводящим патрубком (2), соосно размещенными в корпусе, концентрически расположенными газопроводящей топливной трубой (3) и центральной кислородоподводящей трубой (4) с патрубками подвода соответствующего газа (5,6). В цилиндрической выходной горловине устанавливается сопловой насадок (7) на выходе топливной трубы, который содержит 12 отверстий для подачи рабочего газа, например, ацетилена и 48 отверстий для подачи кислорода.

Также ставится диэлектрическая форсунка (8) на выходе центральной кислородной трубы, которая образует волновод измерительной антенны с короткозамыкающим плунжером (9), установленным со стороны, противоположной форсунке. Волновод соединяется через волноводный фланец с диэлектрическим заполнением (10) с блоком регистрации, а патрубки подачи топлива и кислорода ИВТН соединены с выходами блока управления.



Рисунок 2 – Схема измерительного стенда.

Диэлектрическое заполнение фланца играет также роль преграды для движущегося под давлением кислорода. Форсунка выполняется в виде стакана из диэлектрического нагревостойкого материала, например пирокерама 3603 [1] с диаметрально расположенными в днище стакана под углом  $3\div 5^\circ$  к продольной оси форсунки отверстиями диаметром  $d_1 = 0,0245(F_n)^{0,5}$  на расстоянии  $R_1 = 0,061(F_n)^{0,5}$  от продольной оси,  $F_n$  – площадь поперечного сечения корпуса ИВТН со стороны крепления соплового насадка. Сопловой насадок выполняется с равномерно распределенными по окружности кислородоподводящими и топливоподводящими отверстиями с диаметрами  $d_2 = 0,0245(F_n)^{0,5}$  и  $d_3 = 0,0294(F_n)^{0,5}$ , расположенными от оси ИВТН на расстояниях  $R_2 = 0,29(F_n)^{0,5}$  и  $R_3 = 0,44(F_n)^{0,5}$ . Металлические элементы ИВТН выполнены из латуни, а внутренняя поверхность центральной кислородоподводящей трубы, являющейся волноводом, имеет покрытие из металла с малыми резистивными потерями, например, серебра. Для повышения коэффициента полезного действия измерительной системы поверхность указанного волновода в месте соединения с патрубком (6) выполнена с отверстиями для подачи кислорода в виде сетки (11). Диаметр отверстий много

меньше длины волны в волноводе, поэтому электромагнитная волна через них не проникает [4].

Конструкция диэлектрической форсунки представлена на рисунке 3 (б), на рисунке 3 (в) представлена конструкция соплового насадка.

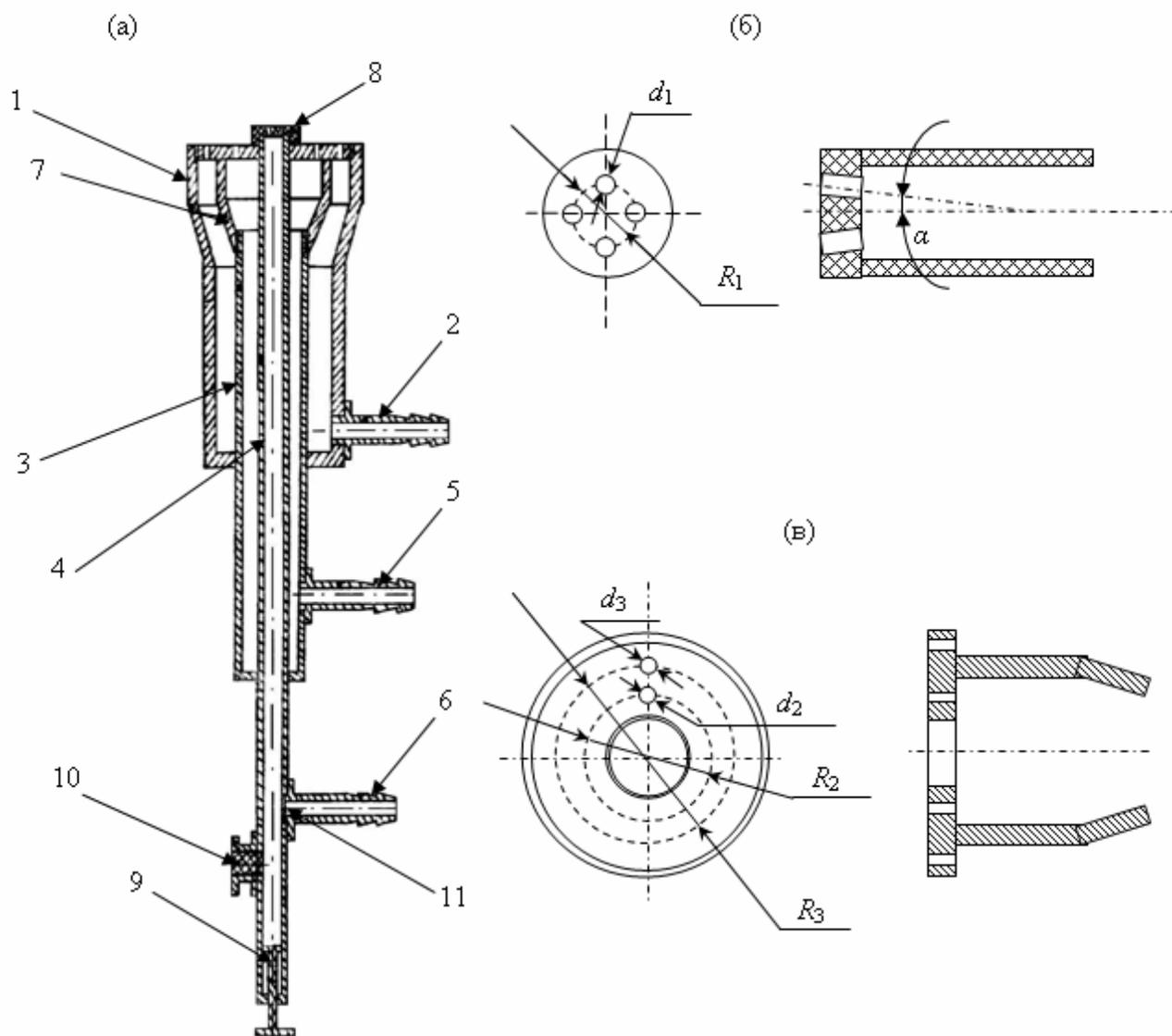


Рисунок 3 – Конструкция ИВТН (а), диэлектрической форсунки (б), соплового насадка (в).

ИВТН располагается так, чтобы его продольная ось была нормально ориентирована и направлена в фазовый центр измерительной антенны. Центральная кислородная труба с диэлектрической форсункой в составе

измерительного стенда представляет собой измерительную антенну, принимающую электромагнитное излучение. Расстояние между исследуемой и измерительной антеннами составляет порядка 50-70 см.

Реализация процесса проведения измерений параметров нагревостойких антенн с ТЗП на таком измерительном стенде достаточно проста: сигнал с СВЧ генератора поступает в модулятор, где модулируется низкой частотой и излучается исследуемой антенной в свободное пространство. Сигнал, принятый измерительной антенной ИВТН, поступает на вход блока регистрации, в котором он разделяется на две части. Первая часть разветвленной мощности сигнала используется для измерения ДН антенны, а другая часть – для измерений диэлектрической проницаемости ТЗП.

На опорный вход измерителя ДП поступает также часть мощности, отводимой от СВЧ генератора с помощью направленного ответвителя. Диэлектрическая проницаемость ТЗП при действующей температуре ( $t$ ) определяется по набегу фаз в диэлектрике

$$\varepsilon(t) = \left[ \frac{\Delta\varphi(t)\lambda_0}{2\pi d(t)} \right]^2,$$

где  $\Delta\varphi(t)$  – набег фазы в диэлектрике, зависящий от температуры,  $\lambda_0$  – рабочая длина волны,  $d(t)$  – толщина ТЗП, зависящая от температуры по соотношению

$$d(t) = d(1 + k_{\pi}(t - t_0)).$$

Здесь  $d$  – исходная толщина ТЗП, измеренная при температуре  $t_0$ , а  $k_{\pi}$  – коэффициент температурного расширения материала ТЗП. Некоторые коэффициенты температурного расширения для нагревостойких материалов представлены в [5].

В измерителе ДН антенны сигнал детектируется, усиливается, оцифровывается и заносится в память совместно с температурой и углом поворота исследуемой антенны ( $\theta$ )

$$T(\theta) = f(\theta, t).$$

Температура на поверхности ТЗП меняется в соответствии с программой исследования путем регулировки расхода топлива и кислорода в блоке управления тепловым режимом. Изменение соотношения кислорода и ацетилена на выходе ИВТН в пределах  $1 \div 1,5$  позволяет регулировать длину факела, а дает возможность варьировать температуру поверхности ТЗП в широких пределах при постоянном расстоянии между антеннами. В основу работы ИВТН заложен принцип интенсивного внешнего смешивания, позволяющего исключить в пламени свободный углерод, получить пламя максимально возможной температуры и отдалить пламя от внешней поверхности соплового насадка. Это позволяет избежать необходимости водяного охлаждения. Исключение свободного углерода необходимо из-за того, что тот, осажаясь на поверхности ТЗП, изменяет эффективную диэлектрическую проницаемость покрытия. Это приводит как к ошибкам измерения ДП ТЗП, так и ДН антенны. При сгорании интенсивно смешиваемых кислорода и ацетилена возникает высокотемпературное окислительное пламя, которое в отличие от струи плазмотрона является радиопрозрачным [6].

Представленная выше конструкция измерительного стенда позволяет повысить тонкость определения положения максимума ДН и ДП покрытия.

Было проведено экспериментальное измерение ДН исследуемой антенны при использовании указанного стенда измерений и разогрева ТЗП до температуры порядка  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Результат экспериментального измерения ДН исследуемой антенны представлен на рисунке 4. Сравнение его с ДН, полученной ранее в схеме с боковым размещением ИВТН (рис.1), показывает, какое негативное влияние может оказать боковой нагрев на результат измерения ДН антенны.

Это объясняется тем, что в отличие от бокового размещения ИВТН при данной реализации сильно снижаются переотражения и, кроме того, формируется симметричная, достаточно большого размера зона натурального моделирования аэродинамического нагрева на поверхности ТЗП антенны.

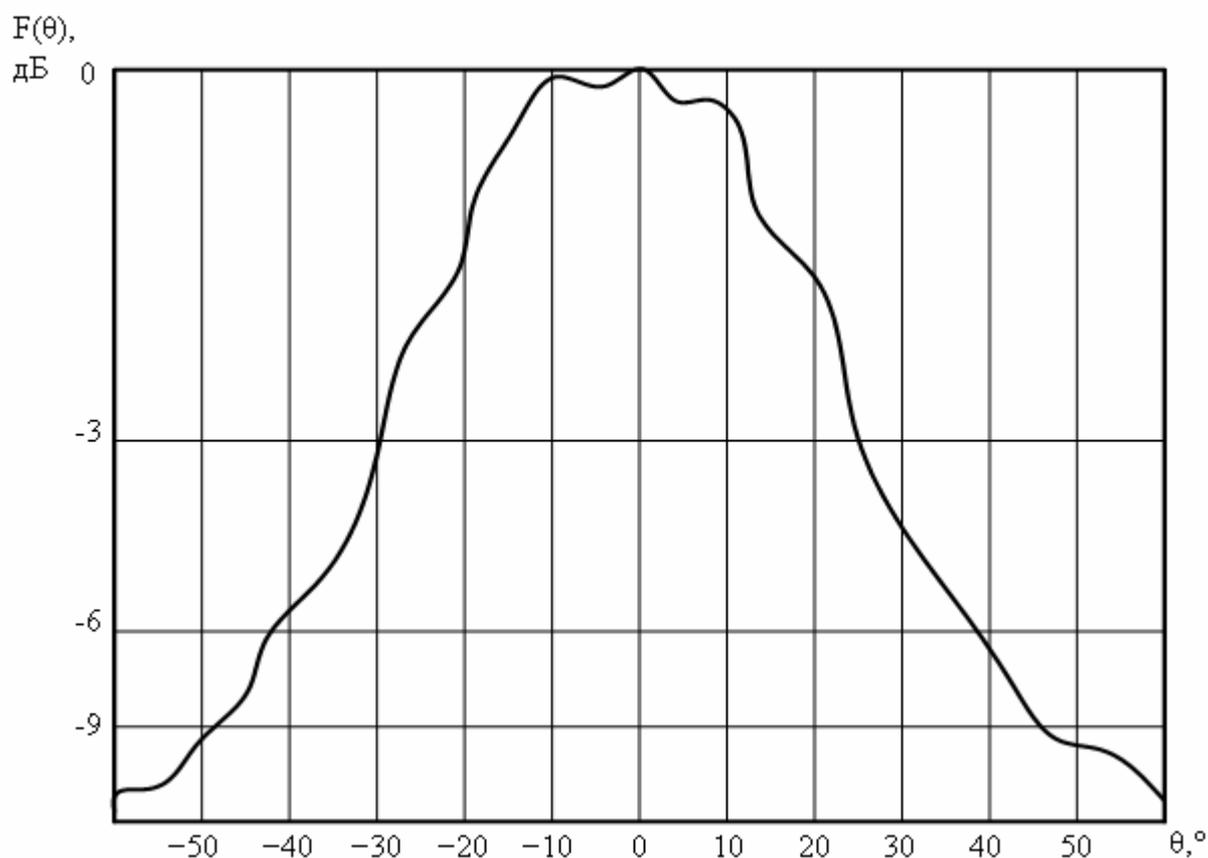


Рисунок 4 – Измеренная ДН антенны при ИВТН, совмещенном в едином корпусе с измерительной антенной.

Подобный нагрев всегда возникает при полетах летательного аппарата на гиперзвуковых скоростях, при этом температура на поверхности ТЗП антенны зависит от скорости полета, высоты и местоположения антенны на корпусе ЛА. Пример распределения температуры на поверхности ГЛА представлен в [7]. Таким образом, при проектировании антенн для ГЛА одним из вариантов исполнения измерительного стенда, может стать тот, в котором источник высокотемпературного нагрева и измерительная антенна объединены в едином корпусе. В качестве источника высокотемпературного нагрева при моделировании определенных участков траектории полете целесообразно использовать газокислородную горелку. Это позволит повысить точность

измерения ДН антенны и диэлектрической проницаемости теплозащитного покрытия.

### Литература

1. *Красюк, В.Н.* Бортовые антенны гиперзвуковых летательных аппаратов/ В.Н. Красюк, В.Ф. Михайлов. СПбГААП. Спб., 1995. 216 с.
2. *Воробьев, Е.А.* СВЧ диэлектрики в условиях высоких температур/Е.А. Воробьев, В.Ф. Михайлов, А.А.Харитонов. М.: Сов. радио, 1977. 208с.
3. *Иссерлин, А.С.* Газовые горелки/ А.С. Иссерлин. М.: Недра, 1966, 234 с.
4. *Кобак, В.О.* Радиолокационные отражатели/В.О. Кобак. М.: Сов. радио, 1975. 348 с.
5. *Кожитов, Л.В.* Технологическое вакуумное оборудование/ Л.В. Кожитов, А. Ю. Зарапин, Н. А. Чиченев . М.: Руда и металлы. 2011. 416 с.
6. *Голант, В.Е* Основы физики плазмы/В.Е Голант, А.П. Жилинский, И.Е. Сахаров. М.: Атомиздат, 1977. 384 с
7. *Оводенко, А.А.* Радиозаметность антенных окон гиперзвуковых летательных аппаратов / А.А. Оводенко, В.Н. Красюк, А.Р. Бестугин, М.Б. Рыжиков// Известия вузов. Приборостроение. Санкт-Петербург. Т.54 . №8. 2011. С. 5-11.