

ТЕПЛОВЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ

Доктор технических наук, профессор М. А. Гурбаниязов
Туркменский государственный университет имени Магтымгулы
Туркменистан, г. Ашгабат
[gurbanniyazov @ yandex. ru](mailto:gurbanniyazov@yandex.ru)

Для осуществления беспроводной связи широко используются зеркальные антенны как наземного, так и космического базирования [1]. Большинство наземных антенных систем с диаметром раскрытия рефлектора от 10 до 100 метров, эксплуатируются на открытом воздухе и подвергаются воздействиям солнечной радиации и других климатических факторов. Космические антенные системы на орбите периодически переходят со светлой на теневую сторону Земли и в результате этого подвергаются резким и значительным изменениям солнечного излучения.

В основе конструкции зеркальных антенн (ЗА) лежат принципы, сочетающие в себе черты геометрической и волновой оптики. Необходимое условие синфазности излучения соблюдается только при наличии идеальных профилей отражающих поверхностей и геометрических соотношений размеров элементов зеркальной системы (ЗС). В этой связи выделяются основные группы механизмов, а именно, весовые, ветровые и тепловые деформации конструкций, оказывающих влияние на эффективность работы зеркальных антенн. Современные конструкции ЗА основанные на принципе гомологических деформаций, способны компенсировать искажения зеркальных систем вызываемых воздействием собственного веса, путем автоматического ввода поправок в систему управления. В тоже время, ветровые и тепловые воздействия носят сложный характер. При этом, в отличие от ветровых нагрузок, распределенных сравнительно равномерно по всей площади отражающей поверхности (ОП), тепловые воздействия, в особенности связанные с влиянием солнечной радиации, приводят не только к глобальным, но и к местным, локальным, отклонениям поверхности рефлектора антенны. Следует отметить, что тепловые воздействия оказывают влияние не только в процессе эксплуатации антенны, но при изготовлении, монтажа и юстировки ее элементов.

Под тепловым воздействием окружающей среды в элементах антенных конструкций формируются неоднородные температурные поля, вызывающие термодформации. Изменение формы отражающих поверхностей рефлектора и контррефлектора, обусловленное термоупругими деформациями элементов антенной системы, приводят к фазовым искажениям сигнала в раскрытии, снижению коэффициента усиления антенны и угловому смещению ее диаграммы направленности (рис.1). В этой связи, комплексное исследование теплового поведения и деформирования элементов конструкции ЗА под воздействием солнечной радиации и других климатических факторов, а также

разработка средств и способов сохранения заданной геометрии отражающих поверхностей их зеркальных систем, является чрезвычайно широкой и актуальной проблемой.

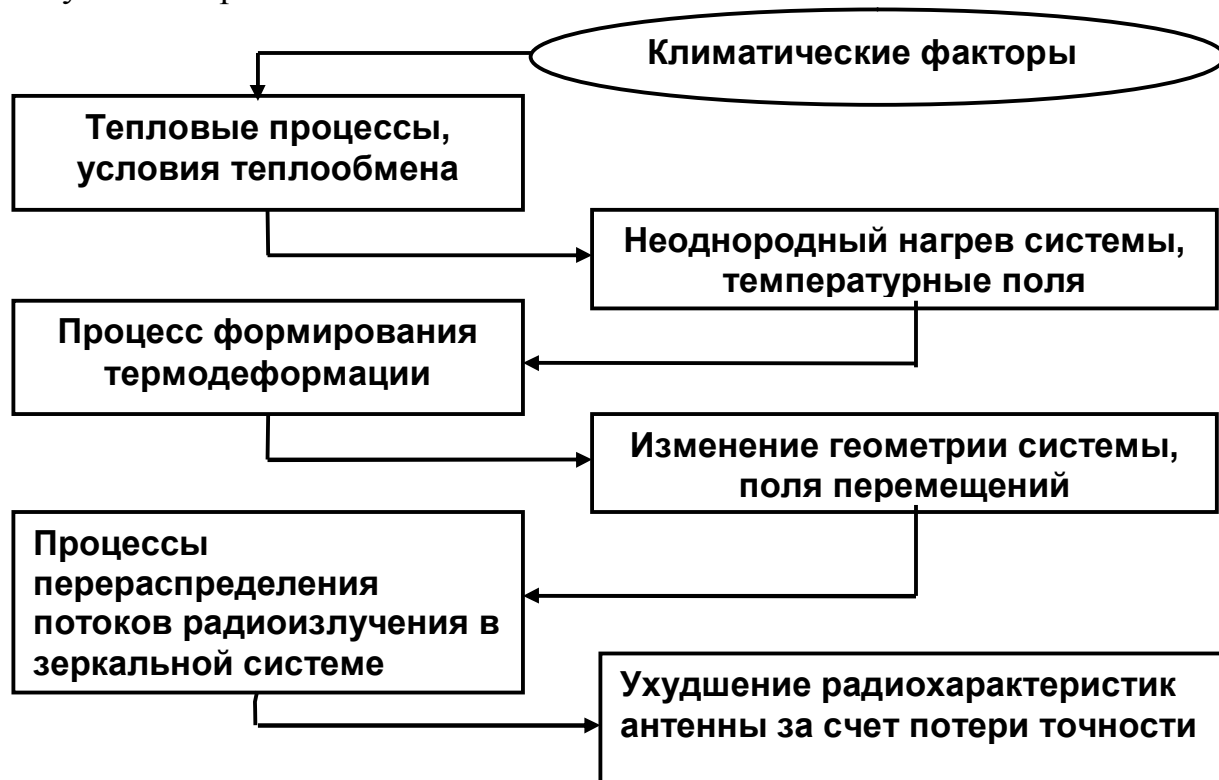


Рис.1. Схема системной модели влияния климатических факторов на радиотехнические характеристики зеркальных антенн

Несущие конструкции крупногабаритных ЗА, на которых устанавливаются элементы отражающих поверхностей, представляют, собой как правило, пространственные стержневые системы, состоящие из плоских радиальных ферм, связанных в окружном направлении стержнями, образующие правильные замкнутые многоугольники. Как правило, отражающие поверхности ЗА собираются из отдельных элементов, выполненных в виде фрагментов оболочки вращения заданной формы (фацет).

Уравнение теплопроводности для тонкостенной оболочки, имеющую форму параболоида вращения,

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} - \lambda \nabla^2 T = \frac{q}{\delta},$$

где c, ρ, λ и δ -соответственно удельная теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности и толщина оболочки, ∇^2 -оператор Лапласа, q -поверхностная плотность источников.

Вид функции источников q можно получить, рассматривая баланс потоков тепла для элемента поверхности оболочки (рис.2.). Положительные составляющие этого баланса-плотности потоков поглощаемой поверхностью оболочки прямой и рассеянной солнечной радиации, плотность потока теплового излучения

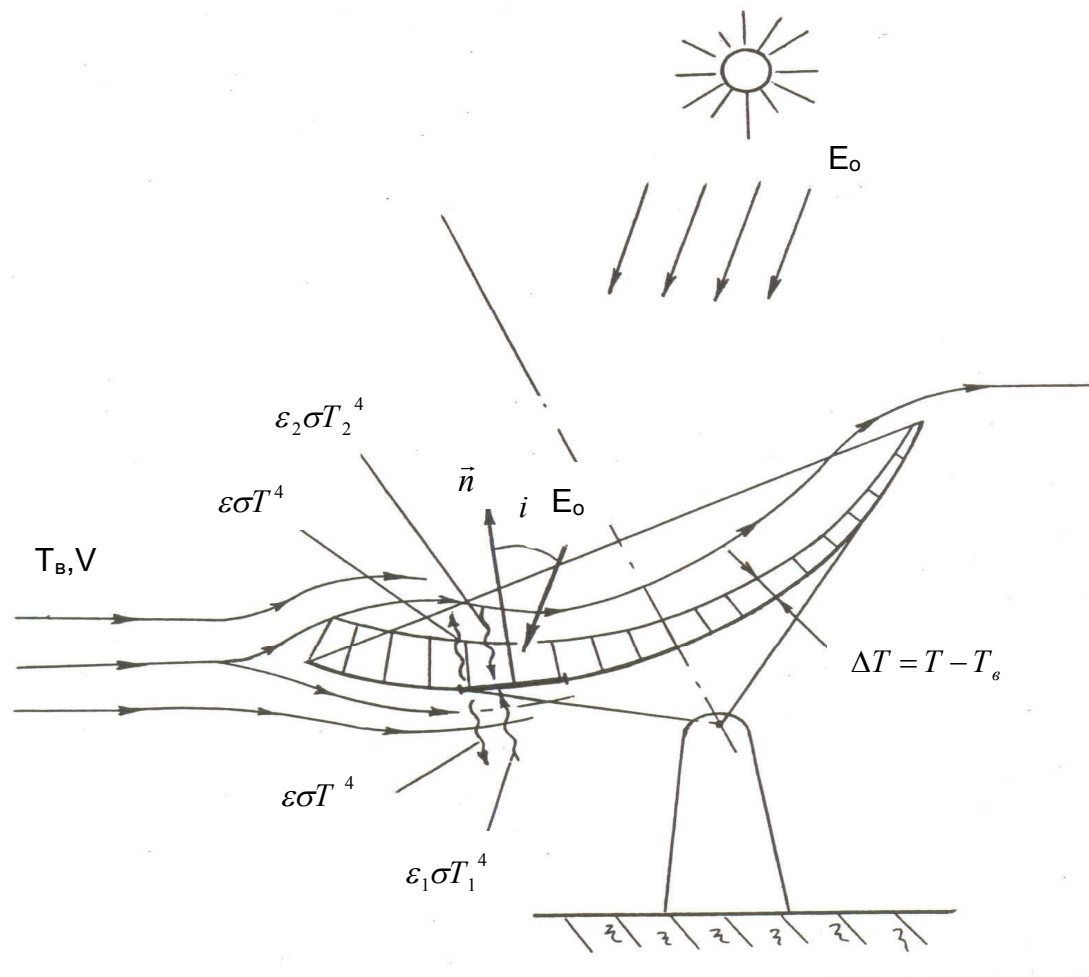


Рис. 2. Схема теплообмена тонкостенной протяженной оболочки зеркальных антенн с окружающей средой

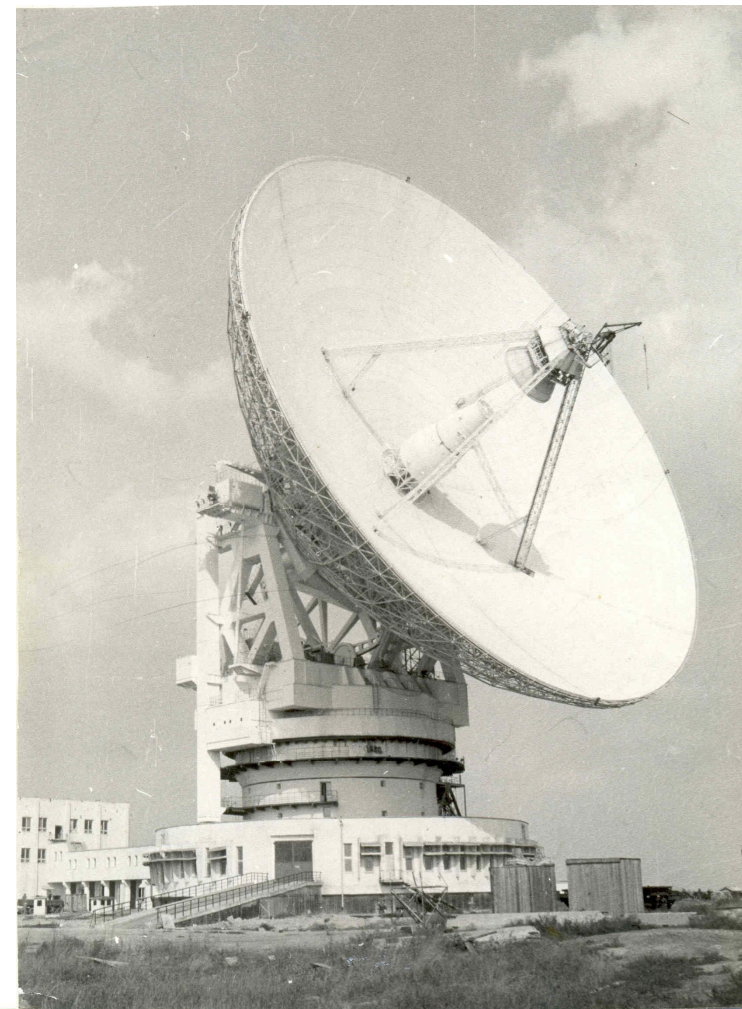


Рис. 3. Общий вид 70-метровой зеркальной антенны РТ-70

окружающих предметов и небосвода. Отрицательными составляющими этого баланса являются плотность потока собственного теплового излучения оболочки и плотность конвективного потока тепла, отводимого от оболочки в окружающую среду. Учет всех этих составляющих теплового баланса приводит к следующему выражению для поверхностной плотности источников

$$q = A_s(E_0 \cos i + E_p) + A_s^T \sigma (\varepsilon_1 T_1^4 + \varepsilon_2 T_2^4) - 2\varepsilon \sigma T^4 - 2\alpha_k (T - T_B),$$

где A_s, ε -поглощательная и излучательная способности лакокрасочного покрытия поверхности оболочки: A_s^T - поглощательная способность лакокрасочного покрытия по отношению к тепловому излучению окружающих предметов; E_0, E_p -прямая и рассеянная составляющие плотности потока солнечной радиации; i -угол падения лучей на элемент поверхности оболочки; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, T_1, T_2$ -эквивалентная степень черноты и эквивалентная радиационная температура теплового излучения окружающих предметов и небосвода; α_k -коэффициент конвективной теплоотдачи; T, T_B - соответственно температура конструкции и окружающего воздуха; σ - постоянная Стефана-Больцмана.

Коэффициенты лучистой α_L и конвективной α_K теплоотдачи заранее неизвестны. Оценки показывают, что α_L сравнительно стабильная величина и равна $5,6 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ для рассматриваемых условий теплообмена. В тоже время α_K сложным образом зависит от условий обтекания внешним потоком рассматриваемых элементов конструкции антенной установки и теоретически рассчитать ее практически невозможно. Это потребовало проведения большого экспериментального исследования зависимостей формирования температурных полей конструкции от метеорологических параметров. Эксперименты проведены на уникальной 70-метровой зеркальной антенне РТ-70 (рис.3) , построенной по схеме Грегори [1,2,3]. Отражающая поверхности ЗС антенны имеет белое покрытие марки КО-1158 , а ферменная конструкция - КО-1157. Для примера на рис. 4 представлены графики суточного изменения температуры некоторых элементов металлоконструкции антенны РТ-70. Перепад температуры по конструкции антенны составляет днем более 10°C , а ночью- 4°C . В утренние и вечерние часы наблюдается выравнивание температуры конструкции . Днем температура отражающей поверхности рассматриваемой facets достигает $36,4^\circ\text{C}$ (в 13.00ч.) в то время как температура элемента ферменной конструкции , находящегося под этой facets , составляет всего $29,5^\circ\text{C}$. В ночное время наблюдается обратная картина. Температура элемента ферменной конструкции на $2,1^\circ\text{C}$ выше (в 24.00ч.) , чем температура отражающей поверхности facets. Резкое снижение скорости ветра (в 5 ч.) приводит к соответствующему снижению температуры элементов конструкции.

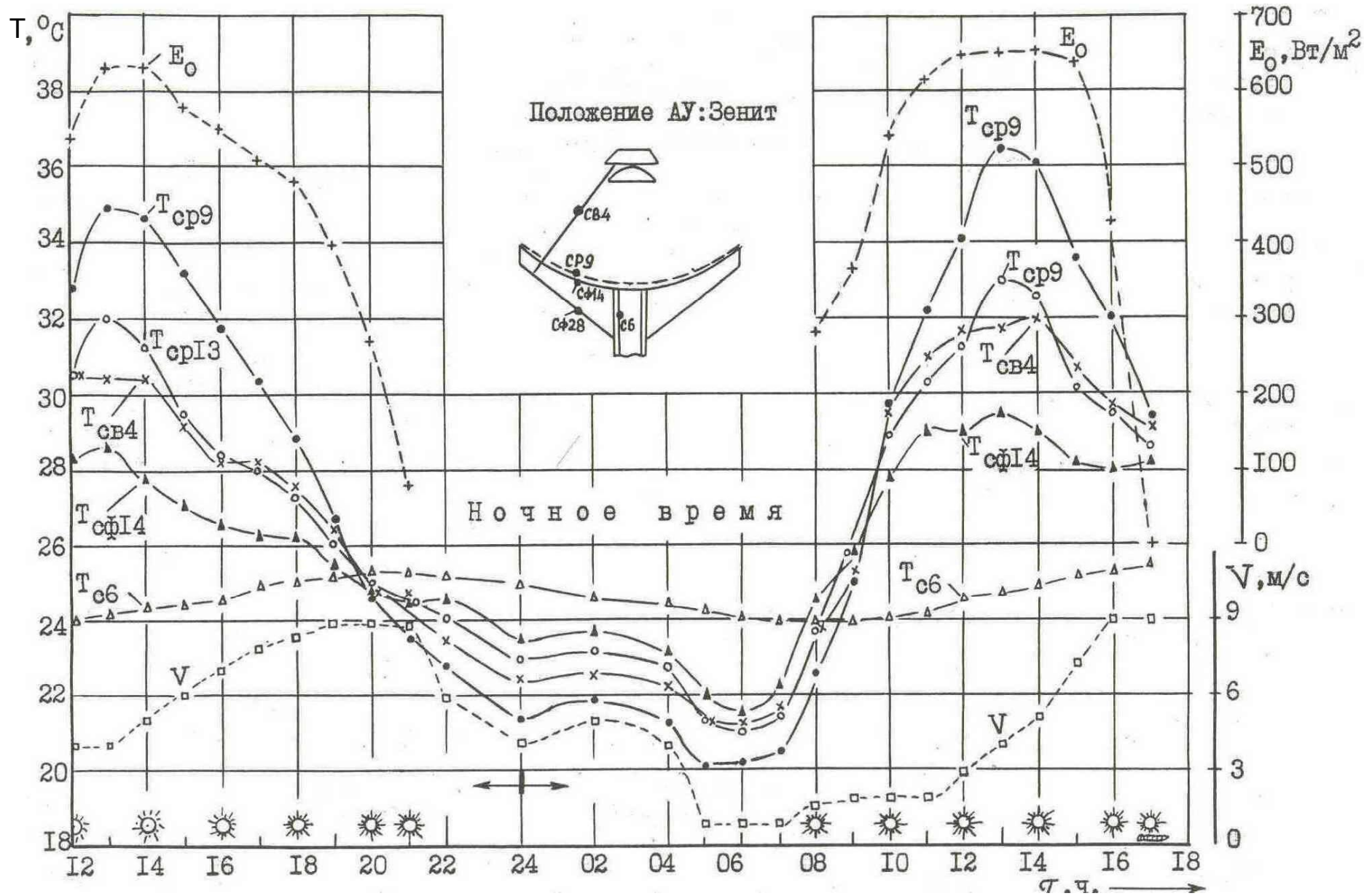


Рис.4 Суточный ход температуры элементов конструкции зеркальной антенны РТ-70

Аппроксимация массива экспериментальных данных показала, что средний коэффициент конвективной теплоотдачи по всей отражающей поверхности рефлектора антенны РТ-70 имеет линейную зависимость от скорости ветра.

$$\alpha_K = 0,8V + 2,4 \quad , \quad Bm/m^2 * K$$

В результате обработки массива экспериментальных данных (N*M=3232 точек) получено критериальное соотношение $Nu=1,86 Re^{0,56}$, справедливое в интервале чисел Рейнольдса $3*10^6 \leq Re \leq 10^8$.

Для расчета стержневых систем получены следующие выражения

$$\alpha_{k1} = 5,6 + 1,16 V, \quad \alpha_{k2} = 2,13 + 0,5 V$$

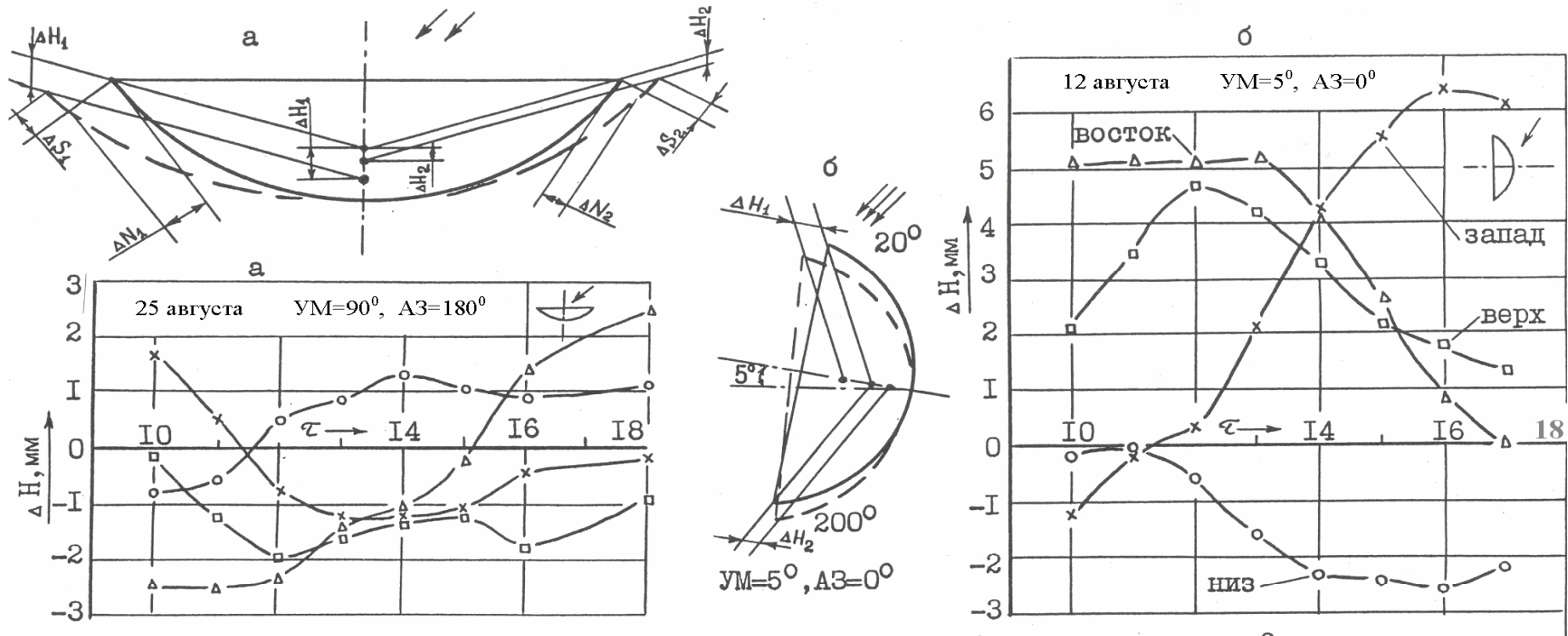
где α_{k1} , - коэффициент конвективной теплоотдачи для стержня в положении антенны «Зенит» с наветренной стороны внешней поверхности ЗС и α_{k2} для стороны закрытой от ветра.

В результате обработки массива экспериментальных данных (NM=1020 точек), получено критериальное соотношение $Nu=0,06 Re^{0,68}$, справедливое в интервале чисел Рейнольдса $10^4 \leq Re \leq 3*10^6$

Проверка адекватности представленных моделей, формул и выражений реальному процессу конвективного теплообмена проведена путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными, которые хорошо согласуются между собой.

Точность отражающих поверхностей, набираемых из отдельных facets, зависит как от точности их изготовления и сборки на силовой конструкции, так и от некомпенсируемых отклонений, обусловленных деформациями силовой конструкции и facets в процессе эксплуатации под воздействием климатических факторов. При этом на деформацию контролируемых точек ОП рефлектора значительное влияние оказывают соотношения нагрева внутренних и внешних радиальных стержней ферменной конструкции. Для примера на рис.5 показаны схемы и графики тепловых деформаций рефлектора в зависимости от пространственного положения антенны РТ-70. Здесь же приводятся метеопараметры и СКО поверхностей facets 1-го пояса ОП рефлектора в моменты измерений перемещений. Измерения перемещений 4-х точек ОП 1-го пояса facets, расположенных в сечениях 20° , 90° , 200° и 280° рефлектора, выявили значительные отличия величин перемещений контролируемых точек ОП вдоль фокальной оси ЗС. На графиках четко видны пики суточных перемещений точек, совпадающие по времени с моментами, когда ферменные конструкции контролируемых сечений освещаются солнечными лучами. В зенитальном положении (УМ= 90°), в ясные дни большой нагрев имеют внутренние радиальные стержни, что приводит к смещению реперных точек ОП от контррефлектора КР (рис.5а). При положении антенны УМ= 5° в верхней части рефлектора нагреваются в основном внешние стержни и контролируемые точки ОП смещаются в сторону контррефлектора (рис. 5б).

Результаты исследований показывают, что максимальные неравномерные перемещения вдоль фокальной оси точек ОП 1-го пояса в диаметральном



□ - сечение 20°; × - сечение 90°; ○ - сечение 200°; △ - сечение 280°

Время, час	10	11	12	13	14	15	16	17	18
СКО, мм	1,7	1,3	1,3	1,2	1,2	1,0	1,4	-	1,5
$E_0, \text{Вт/м}^2$	506	600	648	695	679	695	521	-	411
$T_в, ^\circ\text{C}$	20,1	21,6	21,7	22,1	22,4	23,1	23,4	-	23,5
$V, \text{м/с}$	1	0	3	5	5	6	6	-	7

10	11	12	13	14	15	16	17
2,8	2,7	2,9	3,1	3,1	3,2	3,3	3,2
615	710	773	805	836	836	789	726
22,3	22,9	23,7	23,4	23,8	23,4	23,5	23,4
3	4	4	3	3	4	5	6

Рис.5 Перемещение контролируемых точек отражающей поверхности вдоль фокальной оси ЗС РТ-70 при тепловом воздействии окружающей среды

противоположных сечениях наблюдаются в ясные солнечные дни и достигают 4 мм при зенитальном и 7 мм- при горизонтальном ($УМ=5^\circ$ $АЗ=0^\circ$) положениях антенны. Соответствующие среднеквадратичные отклонения поверхности facets, вызываемые деформациями ферменной конструкции рефлектора при $УМ=5^\circ$ в 2-3 раза больше отклонений при $УМ=90^\circ$. Максимальные деформации конструкции при горизонтальном положении антенны ($УМ=5^\circ$ $АЗ=0^\circ$), происходят в диаметральной сечении восток-запад, что приводит к изменению оси рефлектора относительно ее начального положения от +18" до -18" в зависимости от времени суток. Результаты экспериментов показали, что максимальное суточное смещение контролируемой точки 1-го пояса по нормали к отражающей поверхности рефлектора РТ-70 достигает до 5,2 мм.

На расфокусировку зеркальной системы антенны влияет также односторонний нагрев опорных стоек КР, который приводит к взаимным угловым смещениям фокальных осей рефлектора и контррефлектора. Проведенные эксперименты на 70- метровой зеркальной антенне при $УМ=90^\circ$ и $АЗ=180^\circ$ показали, что угловое смещение фокальной оси КР составляет $45 \div 50$ угловых секунд. Такое рассогласование осей рефлектора и контррефлектора ЗС может значительно ухудшить выходные радиохарактеристики антенн при работе в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн.

Результаты исследований термодформаций металлоконструкции антенны РТ-70 показывают, что они содержат составляющие, изменяющиеся на участках металлоконструкций, имеющих размеры, соизмеримые с радиусом рефлектора.

Влияние таких крупномасштабных деформаций на радиотехнические характеристики антенны главным образом сказывается на угловом смещении максимума диаграммы направленности и снижения коэффициента усиления.

Полученные результаты позволяют наметить следующее направление для уменьшения влияния крупномасштабных тепловых деформаций на радиотехнические характеристики зеркальных антенн. Сущность его заключается в следующем:

- на основе проведенных систематических экспериментальных исследований температурных полей и вызванных ими деформаций формы и положения функциональных элементов зеркальной системы строится математическая модель, входными данными которой является климатические параметры, а выходными - деформированное состояние зеркальной системы;

- деформированные состояния элементов зеркальной системы обрабатываются по алгоритмам метода фазовой компенсации деформации и вычисляются величины перемещений контррефлектора и облучателя для оптимизации коэффициента усиления антенны в максимуме диаграммы направленности, а также величины поправок для коррекции пространственного положения антенны. Предлагаемое направление, не исключая возможность использования активных методов регулирования и термостабилизаций элементов конструкций, позволяет улучшить радиотехнические характеристики зеркальных антенн.

Литература

1. Гурбанниязов М.А., Козлов А.Н., Тарасов В.Б. Современные проблемы построения зеркальных антенн. Ашгабат: Ылым-1992, 416 с.
2. Гурбанниязов М.А. Термомеханические процессы, формирующиеся в антенных конструкциях // В кн.: Образование, наука, спорт и туризм в эпоху Великого Возрождения. Материалы Международной научной конференции, 1-й том (24-26 ноября 2010 года). Ашгабат : Ылым, 2010 г.- с. 396 -398.
3. Гурбанниязов М.А. Тепловая инерционность антенных конструкций // В кн.: Наука, техника и инновационные технологии в эпоху Великого Возрождения. Материалы Международной научно-практической конференции (3-5 июня 2011 года) -Туркменистан. Ашгабат : Ылым, 2011- с. 298-300.