

Э. В. МЕДЗМАРИАШВИЛИ

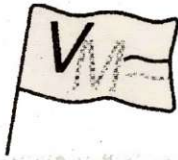
**ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ  
КОНСТРУКЦИИ  
В КОСМОСЕ  
И  
НА ЗЕМЛЕ**

**Э. В. МЕДЗМАРИАШВИЛИ**

**ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ  
КОНСТРУКЦИИ  
В КОСМОСЕ  
И  
НА ЗЕМЛЕ**

"... The book "Transformable Space and Ground Constructions" is of great scientific, technical and practical value for the progress of modern space engineering. It is written by Professor E. V. Medzmariashvili, D. of Engineering, General Director and General Designer of the Institute of Space Constructions, head of the Special-purpose Constructions Chair of Georgian Technical University. The book ranks among the pioneer published works covering the problem of space constructions and tackling successfully theoretical and applied tasks whose authenticity has been confirmed by the author's own studies..."

**Anatoli Savin**  
Academician of  
Russian Academy of Sciences,  
General Director and  
General Designer of the  
Central Research and  
Production Association  
"Kometa"



**VALEMAR S&T Ltd**



**GREGORY & Co**



**ИНСТИТУТ  
КОСМИЧЕСКИХ  
СООРУЖЕНИЙ**

# От издателей

Издание книги Э. Медзмаришвили “Трансформируемые конструкции в космосе и на земле” мы хотим расширить деятельность компаний “VALEMAR” и “GREGORY & Co” по научно-технической проблематике, еще недавно относящейся к фантастике.

Крупногабаритные и сложные космические инженерные сооружения, наземная база их сборки и испытания, соответствующий научный потенциал и все это – в Грузии. Здесь и парадокс, и закономерность.

Парадокс проявляется на фоне сегодняшних проблем Грузии, которые мы все будем преодолевать.

А закономерность обусловлена традициями нашего народа. Строительство как в прямом, так и в переносном смысле, стало определенной символикой истории Грузии.

Подтверждением этого является то, что своего самого прославленного царя народ назвал “Давидом Строителем”.

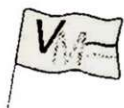
Такой “строительный” потенциал проявился и на заре эпохи – строительства в космосе.

Несмотря на определенный романтизм направления, в Институте космических сооружений, практически, сделано очень много:

- разработана теоретическая основа;
- созд. н новый класс орбитальных и наземных сооружений;
- построена и функционирует уникальная база стендовых комплексов для сборки и испытания космических крупногабаритных конструкций и радиотелескопов.

Результаты работ нашли и находят практическое применение в конкретных космических программах.

Сотрудничеству компаний “VALEMAR”, “GREGORY & Co” и Института космических сооружений посвящается издание этой книги.



Президент компании  
“VALEMAR”

Г Кинтерая

**ე. მემკარიაშვილი**

**ტრანსფორმირებადი  
კონსტრუქციები  
კოსმოსში  
და  
დედამიწაზე**

გერმანია-ლიხტენშტაინი-საქართველო  
1995

# ანოტაცია

კოსმოსურ ნაგებობათა ინსტიტუტის გენერალური დირექტორისა და გენერალური კონსტრუქტორის, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სპეციალურ ნაგებობათა კათედრის გამგის, ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორის, პროფესორ ელგუჯა ვიქტორის ძე მეძმარიაშვილის მონოგრაფია ეძღვნება კოსმოსური და მიწისზედა დიდი ტრანსფორმირებადი ნაგებობებისა და რადიოტექნიკური კომპლექსების შექმნის და გამოცდის თეორიისა და პრაქტიკის პრობლემებს.

წიგნი საინტერესოა შემდეგი დარგების სპეციალისტებისათვის:

- კონსტრუქციათა ფორმების წარმოქმნა;
- ტრანსფორმირებადი ფორმები არქიტექტურასა და მშენებლობაში;
- კოსმოსური რადიოტელესკოპები;
- ორბიტული ძალოვანი კარკასები;
- კოსმოსური მზის ბატარეები, ამრეკლავები და კონცენტრატორები;
- ორბიტალური სადგურები;
- ტექნოლოგიური ენერგეტიკული მოედნები;
- მექანიკური კონსტრუქციები;
- კოსმოსური საინჟინრო კონსტრუქციების და რადიოტელესკოპების გამოცდა და აპრობაცია მიწისზედა პირობებში;
- მიწისზედა გადაადგილებადი რადიოტექნიკური კომპლექსები;
- გასაშლელი ხიდები;
- სწრაფადაგებადი შენობები და ნაგებობები;
- ტრანსფორმირებადი დიდძალიანი შენობები;
- კონსტრუქციათა ექსპერიმენტული გამოკვლევა;
- სივრცული დიდძალიანი დახურვები;
- სამშენებლო მექანიკა;
- რთული ტრანსფორმირებადი სისტემების კინეტიკა;
- სასოფლო სამეურნეო ნაგებობები.

საზოგადოდ, წიგნი წარმოაჩენს მეცნიერებისა და ტექნიკის ახალ და პერსპექტიულ მიმართულებას – კოსმოსურ ნაგებობებს, რაც კოსმოსში მშენებლობის ეპოქას ნიშნავს.

**E. Medzmariashvili**

**Transformable  
Space and Ground  
Constructions**

Georgia–Germany–Liechtenstein  
1995



# Abstract

The monograph of Doctor of Technical Sciences, Professor Elguja V. Medzmariashvili, the General Director and General Constructor of the Institute of Space Constructions, Head of the department of Special Constructions of the Georgian Technical University is devoted to the problems of theory and practice of assembly and testing of the large space and ground-based transformable constructions and radiotechnical complexes.

The book may be interesting for specialists in the following fields:

- the shape formation of the constructions;
- the transformable shapes in architecture and engineering;
- the space radiotelescopes;
- the orbital load-bearing frameworks;
- the space solar batteries, reflectors and concentrators;
- the orbital stations;
- the technological power platforms;
- the mechanical constructions;
- the ground testing and probing of space engineering constructions and radiotelescopes;
- the ground-based restationable radiotechnical complexes;
- the unfoldable bridges;
- the quickly erectable buildings and engineering structures;
- the large-span transformable buildings;
- the experimental research of constructions;
- the spatial large-span roofs;
- the construction mechanics;
- the kinetics of complex transformable systems;
- the agricultural engineering constructions.

On the whole the book represents a new and prospective trend in science and technology – the Space Constructions, which means an epoch of constructing in the space.

## От автора

В книге “Трансформируемые конструкции в космосе и на земле” проблема космических, а также наземных сооружений рассмотрены с трех позиций, включающих разработку обобщенных теоретических основ трансформируемых систем, создание нового класса орбитальных и наземных конструкций и построение наземного стендового комплекса сборки и испытания космических сооружений, в том числе прецензионных систем – радиотелескопов.

Такая многосторонняя обработка проблемы давала возможность на всех стадиях исследований взаимопроверки и согласования полученных результатов, которые и привели к новым практическим решениям, не имеющих аналогов в мире.

Представленные в монографии материалы и результаты их реализации обеспечили продолжение работ и создание нового поколения орбитальных сооружений, в том числе разворачиваемых космических радиотелескопов повышенной точности и жесткости. Но все это предназначено уже для второй книги.

Как автор, считаю своим долгом отметить заслуги академика Российской АН Савина Анатолия Ивановича, академика АН Грузии Лоладзе Теймураза Николаевича, доктора технических наук Данилова Юрия Ивановича, доктора технических наук Заксона Михаила Борисовича и Генерал-лейтенанта Российской армии, крупного специалиста инженерных войск Самойловича Григория Федоровича, которые и определили мою научную карьеру в области космических и наземных трансформируемых систем.

С благодарностью хочу отметить, что издание данной книги является заслугой президента компании “VALEMAR” господина Г. Кинтерая и директора компании “GREGORY & Co” господина Г. Тевзадзе, которые в своей деятельности развитию науки уделяют большое место. Они сделали все, чтобы результаты и перспективы Института космических сооружений нашли свое место в практических работах и вызвали резонанс в научно-техническом обществе.

*Э. Медзмариашвили*

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга “Трансформируемые конструкции в космосе и на земле”, автором которой является Генеральный директор и Генеральный конструктор Института космических сооружений, заведующий Кафедрой специальных сооружений Грузинского технического университета, доктор технических наук, профессор Элгуджа Викторович Медзмариашвили, имеет большое научное, техническое и практическое значение для современной космической техники.

Еще в 1975 г. в ЦНПО “Комета” были начаты работы по созданию больших разворачиваемых космических антенн и спутниковых систем на их основе. Работы в этом направлении были начаты с создания космического радиотелескопа КРТ-10 с разворачиваемой в космосе зеркальной параболической антенной диаметром 10 метров. Аппаратура КРТ-10 30 июня 1979 г. была доставлена на находившуюся в полете долговременную орбитальную станцию “Салют-6”. Космонавты В.А. Ляхов и В.В. Рюмин смонтировали аппаратуру, 18 июля выдвинули и развернули 10 метровую антенну и затем провели ряд уникальных экспериментальных работ, показавших большие возможности и перспективы этого научно-технического направления. В 1980 году эта работа была удостоена Государственной премии СССР.

В 1980 году по предложению академика АН Грузии Лолладзе Теймураза Николаевича и по инициативе профессоров Данилова Юрия Ивановича и Заксона Михаила Борисовича я принял решение поручить работы по созданию инженерных конструкций космических и наземных разворачиваемых антенн с большими диаметрами зеркал (до 30 метров) и наземной базы для их испытаний руководителю молодого студенческого конструкторского бюро, доценту Грузинского политехнического института Э.В. Медзмариашвили.

За истекшие годы в результате напряженной творческой работы многих научно-исследовательских организаций, производственных предприятий и при активно растущей роли руководимого Э.В. Медзмариашвили коллектива, который к настоящему времени вырос в Институт космических сооружений, при большой помощи руководства Грузии были выполнены огромные работы, имеющие важное значение.

Были созданы новые антенны большого диаметра (до 30 метров) и экспериментальная база для испытания разворачиваемых антенн в наземных условиях.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Для проведения сборки и монтажа антенны, ее отработки в наземных условиях был создан специальный испытательный комплекс. В его состав входят:

- стенд диаметром 40 метров для прецизионной сборки и испытания зеркала антенны. Стенд оборудован безинерционной механической системой обезвешивания для осуществления развертывания зеркала в условиях имитации невесомости;
- стенд для сборки и испытания на развертывание антенны в целом в условиях имитации невесомости;
- стенд для измерения радиотехнических характеристик антенн, предназначенный для радиотехнических испытаний антенны в полноповоротном режиме, в том числе и по космическим источникам;
- гидробассейн диаметром 40 метров и высотой 21 метр для испытания развертывания антенны и ее отдельных элементов при обезвешивании в воде.

Наземный испытательный комплекс позволил провести окончательную сборку и механическую доводку конструкции развертываемой антенны диаметром 30 м, в условиях имитации невесомости и осуществить развертывание зеркала и антенны в целом.

Это самое большое из известных в мире развертываемых зеркал. Экран выполнен из трикотажного полотна, связанного из нержавеющей стальных нитей диаметром 50 мкм. Он покрыт металлом, снижающим потери при отражении.

Разносторонние испытания разработанной антенны диаметром 30 метров показали ее хорошие механические характеристики. Было выполнено большое количество развертываний зеркала. Эти испытания показали хорошую надежность развертывания антенны и высокую геометрическую точность поверхности зеркала. Среднеквадратичное отклонение не превышало 3 мм. Развертывания опор в гидробассейне позволили получить ряд важных результатов для совершенствования этих устройств.

Подробно проработаны и обоснованы новые принципы построения космических аппаратов на базе конструкции большой антенны. Разработаны проекты таких космических аппаратов с зеркалами 30 и 15 метров.

Результаты исследований и конструкторских проработок в области больших развертываемых антенн и космических аппаратов позволили разработать ряд новых проектов систем связи, в том числе спутниковую систему персональной, подвижной и фиксированной связи ЗЕРКАЛО–КС. К настоящему времени

по этому направлению проведены необходимые научно-исследовательские и поисковые работы. В ЦНПО “Комета” и смежных организациях развернута работа по практическому созданию системы связи с большой многолучевой антенной.

В системе ЗЕРКАЛО–КС применена космическая развертываемая зеркальная антенна диаметром 15 м, формирующая свыше 100 лучей с высокими коэффициентами усиления. Это позволяет уменьшить мощность излучения аппарата персональной связи, уменьшить облучение абонента, и таким образом, повысить его экологическую безопасность. Кроме того, это увеличивает срок действия аккумуляторов в ручной аппаратуре.

Космический аппарат системы ЗЕРКАЛО–КС построен на базе конструкции развернутой зеркальной антенны, на которой расположена аппаратура связи (ретрансляторы, коммутаторы свыше 10 000 каналов, антенны, средства управления связью и др.), а также солнечные батареи, средства ориентации, стабилизации и управления полетом. Масса космического аппарата около 5 тонн.

Регион обслуживания системы охватывает западную часть России, включая полярные районы и примыкающие государства, имеет форму близкую к кругу диаметром свыше пяти тыс. км. Необходимость обслуживания северных областей страны привели к выбору высокоэллиптической синхронно-суточной орбиты, по которой с 12-часовым сдвигом по времени функционируют два одинаковых космических аппарата, каждый из которых включается только во время его пребывания над обслуживаемым регионом.

Такое расположение работающих спутников в системе ЗЕРКАЛО–КС позволяет использовать в абонентских средствах персональной и подвижной связи направленных антенн с сектором излучения около 60 градусов и коэффициентом усиления равным 10. Существенно упрощена ориентация антенны – она должна быть примерно вертикальной. При этом угол между вертикальноориентированной антенной и переговорной трубкой может быть установлен абонентом в удобном для себя положении.

Вывод на указанную орбиту 5-тонного космического аппарата осуществляется ракетой-носителем “Протон” в штатном режиме.

Для связи новых абонентов системы с действующими абонентами существующих средств связи взаимовязанной сети связи России (ВСС РФ) вводятся каналы связи с фиксированными объектами ФСС. В качестве наземных средств использу-

## ПРЕДИСЛОВИЕ

ется современная аппаратура с антеннами диаметром 2,5 метра.

Обеспечена прямая дуплексная связь между всеми абонентами (каждого с каждым) при однократном прохождении через спутник-ретранслятор.

Работы в области создания больших космических развертываемых антенн и проекты систем связи с большими космическими антеннами неоднократно обсуждались на научно-технических советах и экспертных комиссиях и неизменно получали высокую оценку, в том числе, от зарубежных специалистов.

Была разработана общая теория трансформируемых систем как процесса формообразования конструкции.

Исследования и проекты ученого, изобретателя и конструктора Медзмариашвили Э.В., лежащие в основе проведенных теоретических, экспериментальных и практически работ, предложены в книге "Трансформируемые конструкции в космосе и на земле".

Книга имеет не только научную ценность, но и является учебным материалом для студентов, конструкторов и специалистов в области космических и наземных больших радиотелескопов.

Автор, кроме отмеченной проблемы, касается и других инженерных задач создания и применения развертываемых конструкций как в космосе, так и на земле, что расширяет сферу исследования трансформируемых систем.

Книга одно из первых изданий, охватывающих проблему космических сооружений, ее земных и космических, теоретических и практических задач, логика которых автором определена на основе собственных работ.

Генеральный директор,  
Генеральный конструктор  
ЦНПО "Комета"  
Академик Российской АН

*А.И. Савин*

# ВВЕДЕНИЕ

*“Человечество не останется вечно на Земле, но, в погоне за светом и пространством, сначала робко проникнет за пределы атмосферы, а затем завоюет все околосолнечное пространство”.* Эти слова К.Э. Циолковского уже не являются призывом ожидания будущего. Человечество приступило к освоению космоса и уже нет обратного пути. Уровень цивилизации, деятельность общества, производственные, технические и технологические процессы все теснее связаны с системами коммуникации, орбитальной технологии и многими научными, экономическими, энергетическими, навигационными, военными, метеорологическими, картографическими, изыскательскими, контрольно-измерительными и другими проблемами. Эффективное решение этих проблем без космоса и космической техники не только в будущем, но и сегодня становится невозможным, не говоря об освоении планет и построении суперстанций.

Исходя из этого, проблемы космоса не помещаются в сферу деятельности специалистов только летательных аппаратов. Они требуют сотрудничества представителей всех сфер человеческой деятельности.

Последовательность развития исторических процессов, как известно, часто напоминает схему винтовой спирали. Такое наблюдается и в космосе. На первом же этапе контакта человека с космосом, как это было в далеком прошлом на земле, в порядке дня стал вопрос строительства – но сейчас уже космического строительства [20], [22].

Неземное строительство пока смотрится вполне традиционным образом. Станции, т.е. помещения и здания для жизнеобеспечения и функционирования техники, аккумуляции и выдачи энергоресурсов; конструкции солнечных батарей, концентраторов, отражателей и парусов, площадки технологические, несущие каркасы, длинномерные ограждающие элементы и т.д. – вот весь тот набор инженерных сооружений, которые надо строить в весьма специфических и экстремальных условиях космоса. Это и отличает их от уже известных инженерных решений.

Степень отличия космических инженерных сооружений от наземных разная, и она уменьшается в отношении тех конструкций, которые предлагается строить в экстремальных условиях и в труднодоступных местах на земле. Так что известные приемы создания космических сооружений тоже берут

## ВВЕДЕНИЕ

истоки от наземного строительства, и это естественно, так как самую фантастическую космическую технику создает человек с присущими ему знаниями и традициями, накопленными на земле.

Поэтому понадобилось очень мало времени, всего лишь 10–15 лет, чтобы проблемами космических инженерных сооружений занялись бы строители.

Построение больших инженерных конструкций в космосе и придание им статуса “строительства” решает не только формальную, но и методическую задачу. На начальном этапе к разработкам больших инженерных конструкций в космосе по инерции приступили “профессионалы” космической техники – радисты, механики, материаловеды, энергетики, электромеханики и другие. Поэтому естественным являлось в их решениях наличие и большая перенасыщенность принципов построения сложных механических и других машин, и в то же время, отсутствие принципов построения сооружений, которые, с учетом традиции и специальной логики, резко могут упрощать решение задачи. Поэтому базовое присутствие в этой проблематике специалистов строительных конструкций в тесном сотрудничестве с широким спектром специалистов, начиная от механиков и кончая представителями бионики, обеспечивает более удобные методы проведения работ [16], [19], [27], [29], [63], [71], [79].

Именно в такой постановке вопроса и представляется логика конструирования предложенных новых систем, истоки которой начинаются от работ ученых, инженеров, конструкторов и архитекторов – Шухова, Манеля, Яверта, Фуллера, Отто, Сарже, Стрелецкого, Гибшмана, Фрица, Протасова, Сперанского, Нерви, Трофимова и др.

Функциональное разнообразие космических инженерных конструкций проявляется в полном масштабе. Энергетические, радиотехнические, оптические, технологические, силовые и другие системы ставят свои требования перед ними, среди которых весьма сложной является прецизионность конструкции и ее большие размеры. В этом отношении интерес заслуживают космические радиотелескопы, габариты которых уже сегодня практически требуются диаметром до 30 метров и более в сантиметровом и даже в миллиметровом диапазоне радиоволн. Такие радиотелескопы качественно улучшают телекоммуникационные средства для стационарных и подвижных объектов, информационно-измерительных систем, а в другом диапазоне волн решают такие военные задачи, как обнаружение и слежение ракет, авиации, кораблей, подводных



лодок и сухопутной техники.

Создание больших космических сооружений и радиотехнических комплексов многопрофильно, где проблемами являются инженерно-конструкторское обеспечение решениями задач теоретических исследований, разработки схем и конструкций, технологичности изготовления, сборки и монтажа, наземных экспериментальных исследований и натурных испытаний.

Принципиальное значение имеет соответствие конструкторских решений идеям построения космического комплекса и радиотехнических систем.

Достижения по перечисленным базовым направлениям создания инженерных конструкций космического базирования, по принципу обратной связи, обуславливают появление новых решений наземных сооружений, особенно для образцов техники, предназначенных для применения в экстремальных условиях.

При практической реализации данной теоретической идеи по созданию космической и наземной техники, ее теоретических основ, экспериментальных исследований и построению уникальных испытательных баз свой вклад внесли ученые, специалисты и инженеры: Баничук Н.В., Благов В.А., Богомолов А.Ф., Быков В.Л., Гвамичава С.А., **Данилов Ю.И.**, Заксон М.Б., Климов Д.М., Коптев Ю.Н., Кардашов Н.С., Лоладзе Т.Н., Медлев Л.С., Глазунов Ю.Н., Савин А.И., Самоилович Г.Ф., Семенов Ю.П., Соколов А.Г., Сольтан П.С., Сыромятников В.С., Патон Б.Е., Усюкин В.И., Чернявский Г.М.

Исследования выполнены на базе совместных работ Института космических сооружений Грузинского технического университета при Комитете по науке и технологиям Республики Грузия и Центрального научно-производственного объединения "Комета" Российской Федерации и в тесном сотрудничестве с научно-производственным объединением "Энергия" по практической реализации орбитальных экспериментов.

В комплексе работ принимали участие Институт проблем механики Академии наук России, Грузинский технический университет, "Грузгоспроект", Тбилисское авиационное производственное объединение, Концерн "Грузспецмонтажстрой", Московский авиационный институт, Украинский заочный политехнический институт г. Харькова, Днепропетровский институт прикладной механики, Сыктывкарский государственный университет, Ереванский политехнический институт, Московский завод им. Хруничева, Московский науч-

## ВВЕДЕНИЕ

но-исследовательский институт кожгалантереи, институт “Гипрошахт” и ЗНИИЭП (г. Тбилиси), “Грузсельстрой”, Комитет по строительству и архитектуре республики Грузия, Руставские заводы металлоконструкций и краностроительный.

Автор с 1967 года работает над созданием пространственных комбинированных конструкций, с 1975 года над разработкой развERTываемых мостов для инженерных войск, а с 1981 года является непосредственным участником и научным руководителем теоретических и экспериментальных исследований трансформируемых космических и наземных конструкций, радиотехнических сооружений и принципов построения конструкций наземных стендовых испытательных комплексов.

Основная часть работ выполнена в Институте космических сооружений Грузинского технического университета при Комитете по науке и технологиям Республики Грузия, основоположником, Генеральным директором и Генеральным конструктором которого является автор.

Работы проводились в целях создания образцов специальной космической и наземной техники.

В книге рассмотрены:

- трансформируемые системы как геометрическая и физическая модель формообразования т.н. развERTываемых конструкций, которые на данном этапе развития космической техники и, вообще, для орбитальных автоматических режимов и в наземных экстремальных и неординарных ситуациях являются приоритетными;
- класс каркасно-опорных конструкций как конкретное направление трансформируемых систем, структура которого отвечает многим требованиям создания прецизионно-силовых больших космических конструкций;
- новые конструкции класса каркасно-опорных трансформируемых систем для больших радиотелескопов и других инженерных сооружений космического и наземного базирования;
- принципы конструкторского и технологического обеспечения и построения космических комплексов больших космических радиотелескопов;
- конструкции вариантов и базового образца трансформируемого космического радиотелескопа диаметром зеркала 30 метров, работающих в

- дециметровом и сантиметровом диапазонах радиоволн;
- результаты расчетов и теоретических исследований на динамические, статические и температурные внешние и наружные воздействия каркасно–опорных конструкций трансформируемых радиотелескопов на стадии развертывания и функционирования в космосе с установлением геометрических, силовых и временных параметров кинетических процессов, являющихся теоретической базой конструирования и проектирования системы;
  - наземный универсальный стендовый комплекс сборки, монтажа и испытаний больших космических конструкций и радиотехнических систем в составе гидробассейна, стенда прецизионной сборки, большого стенда развертывания и поворотного устройства для проверки радиотехнических параметров антенн космического базирования и принципы его построения;
  - методика наземных испытаний трансформируемых космических конструкций и проведенные экспериментальные исследования моделей вариантов конструкции и полномасштабного базового образца космического радиотелескопа диаметром зеркала 30 метров;
  - циклы экспериментальных исследований доказали сходимость теоретических исследований с практикой, надежность, прочность и жесткость конструкции на стадиях транспортировки, развертывания и функционирования, а также технологичность конструкции и правильность способов ее изготовления, сборки и монтажа;
  - новый класс космических и наземных перспективных систем космического и наземного базирования в виде радиотелескопов нового поколения, каркасов станций, солнечных батарей и концентраторов, развертываемых мостов, перебазируемых остронаправленных антенн, покрытий и других конструкций, а также база для испытания инженерных трансформируемых сооружений на климатометеорологические и специальные транспортные воздействия в целях их доставки и функционирования в труднодоступных местах.

## ВВЕДЕНИЕ

# 1 Строительство в космосе

## 1 Концептуальные вопросы построения сооружений космического базирования

Особенности строительства в космосе со временем раскрываются более многогранно. Это связано с практической деятельностью и исследованиями в этом направлении.

Но уже можно отметить, что в орбитальных сооружениях найдут внедрение не только новые концепции, но и известные конструкции, созданные на земле. И это понятно, так как тысячелетиями накопленный опыт человечество всегда использует в своей творческой деятельности. Человеческая мысль, работая по схеме “земля–космос”, не может не заметить и обратной связи – “космос–земля” – тем более, что в строительстве понятие “невесомость” появилось на земле задолго до начала космической эпохи. В качестве примера можно рассмотреть ручную ориентацию тяжелых грузов, подвешенных на подъемном кране, при перемещении или стыковке узлов. Это же и есть “обезвешивание” изделия, т.е. частичное снятие фактора гравитации, что и имитирует условия космоса.

По сравнению с другими областями техники, в инженерной практике процесс строительства, в частности, создание строительных конструкций, характеризуется определенным консерватизмом. Это касается, в основном, изменения традиционных форм системы, выбора материалов и способов возведения, хотя в этом направлении много новых и оригинальных решений.

Строительные конструкции в общем виде их применения всегда отражали время и эпоху их возведения. Необходимость изменения форм для удовлетворения функциональных и архитектурных требований, предъявляемых к строительным конструкциям, наряду с другими мотивами, зависят, в основном, и от уровня новых решений по формам, схемам, структурам, рабочим системам, выбору конструкционных материалов и способу построения конструкции.

Технический уровень производства, экономическое, материальное, научное и инженерное обеспечение и условия строительства являются основными мотивами для решения вышеуказанного вопроса.

В таких взаимоотношениях развитие строительных конструкций происходило вслед за требованиями решаемых задач, которые становились проблемами тогда, когда возникал дисбаланс как внутри основных факторов, так и между ними и разными мотивами.

В целом, развитие строительных конструкций – вопрос не только инженерный, но и гораздо более широкий, охватывающий слой социальных, экономических, исторических, политических, нравственных и других проблем.

С инженерной точки зрения, в конструкциях приоритетным вопросом является принцип формообразования. В большинстве случаев определение формы и структуры новых конструкций основывается на разработке множества новых схем с учетом материалоемкости и затрат на изготовление. Но при этом не учитываются условия возведения сооружений. Хотя эти вопросы часто становятся основным критерием подбора способа строительства, которому в большей мере и подчиняются определенные формы, структуры и вид материала. Такова реальность и это является саморегулирующим определением направления. Именно этим объясняется часто “необъяснимое” предпочтение и популярность, скажем, сборных структур по отношению к монолитным, во многих случаях на стороне которых и экономические расчеты. Порой бывает наоборот и т.д.

Сами же условия бывают разные. Часто они являются экстремальными, при которых построение инженерных конструкций, сооружений и зданий требует еще и нетрадиционных решений.

Экстремальные условия для разных отраслей и видов техники могут быть сформулированы по-разному. Для создания строительных конструкций они могут, например, представлять собой:

- резко ограниченные сроки строительства;
- наличие неординарной среды в виде космоса, воды, атмосферы и т.д.;
- строительные процессы в труднодоступных местах;
- сооружение конструкций в зонах катастроф и военных действий;
- ускоренную передислокацию сооружений и помещений;
- требования периодического изменения формы конструкции;

— необходимость многократного применения конструкций как в одном, так и в разных местах.

Создание конструкций в экстремальных условиях вносит изменение в логику оценки и выбора решений задачи.

С достижением эксплуатационных и функциональных параметров отодвигаются на второй план экономические показатели и на первый план выходят технические и технологические параметры решения проблемы.

Перечисленные и подобные условия часто до минимума доводят гарантии проведения на месте применения конструкции процессов по построению ее формы. Поэтому уровень так называемой “заводской готовности” изделия должен быть по возможности поднят максимально.

Архитектура построения структуры конструкции и процесса формообразования, несмотря на кажущееся множество вариантов, реально осуществляется двумя направлениями:

- построение и изменение формы на месте функционирования конструкции на основе сборки ее структуры из отдельных элементов;
- построение и изменение формы на месте функционирования конструкции на основе трансформации геометрии системы, имеющей заранее созданную структуру на основе ее составления из отдельных элементов.

Такое направление в процессах формообразования, наряду с такими понятиями в строительстве как “сборные” и “трансформируемые”, т.е. так называемые “развертываемые”, включает самое фундаментальное понятие – “монолитные”.

Два вышерассмотренных направления полностью охватывают все возможные геометрические и физические модели процессов формообразования. Системный подход к этому вопросу рассматриваются в главе “Трансформируемые системы”. Но для предварительной оценки надо отметить, что в процессе монолитного строительства фигурируют два компонента: это “формы” или “опалубки”, и твердеющая масса.

Если твердеющую массу мы рассмотрим на уровне составляющей компонентов, то она состоит, т.е. “собирается”, из отдельных элементов, которые между собой устанавливают химические или другого рода связи, и превращаются в единую формоизменяемую, т.н. трансформируемую систему, или остается простым сбором отдельных элементов.

В обоих подвариантах намеченное формообразование, т.е. трансформация, осуществляется с добавочными временными связями – “формами”, которые функционируют до возникно-

вения постоянных связей внутри структуры. Этим и характеризуется определенный вид трансформируемых систем.

В принципе, “трансформируемые” и “сборные” конструкции отличаются технологическими основами построения формы, так как по структуре и схеме системы они часто могут быть одинаковыми и этому ничего не может противоречить.

Поэтому желание классифицировать трансформируемые конструкции по группам и видам их схем, отдельно от единой конструктивной системы, является искусственным. Все существующие трансформируемые системы находят свое место в существующих градациях схем конструкций. Их “трансформативность” как и “сборность” является технологической особенностью разных видов конструкции, что и требует соответствующих конструктивных и энергетических обеспечений, которые также сгруппированы по типам механизмов и процессов.

Большие перспективы применения трансформируемых конструкций в космосе не выходят за пределы общей логики формообразования систем. Они только будут обогащать варианты решения, что с обратной связью будет способствовать процессу применения и развития традиционных и новых наземных трансформируемых конструкций [2], [31], [32], [36], [43].

Большие инженерные конструкции в космосе означают перемещение процесса строительства в космическое пространство, поэтому все технические решения, технологические принципы и конструктивные схемы с соответствующими изменениями могут быть применены на орбитах, так что отдавать универсальный приоритет какому-либо из них является несправедливым.

Создание на орбитах инженерных сооружений можно осуществить четырьмя основными способами или их комбинациями. Но характеристику способов надо оценить на месте создания конструкции, а не по всему циклу ее изготовления, так как в этом случае все способы доводятся до единой отметки, включающей изготовление деталей, сборку и достижение конечной формы.

На место функционирования конструкция может быть доставлена в виде готового изделия с проектной формой, собрана из готовых элементов, развернута из готовой системы и, наконец, построена с учетом технологических процессов из исходных материалов.

Доставка готовой конструкции на орбиту – способ самый надежный и, казалось бы, более простой. Но для крупногабаритных сооружений, с учетом весовых параметров и емкости грузовых отсеков ракетносителей, такой подход технически и



экономически весьма ограничен. Другое решение проблемы – доставка с одной орбиты на другую уже собранной конструкции. Но это больше относится к задачам транспортировки грузов, чем к способам формообразования систем.

Сборка конструкции на орбитах из готовых элементов после активизации деятельности космонавтов, наличие роботов и спецтехники становится все более доступным способом.

Однако, если учитывать экстремальность среды, в большинстве случаев автоматические режимы работы орбитальных комплексов, проблемы с робототехникой и ограничение маневров космонавтов, становится очевидным, что способ развертывания конструкций в космосе сохраняет приоритетные позиции.

Что же касается строительства в космосе с проведением технологических циклов изготовления элементов и изделия, то более масштабной эта перспектива представляется на последующих этапах развития космонавтики, освоения планет и создания автономных суперстанций. Вместе с этим, в комбинациях с другими способами, применение технологических процессов затвердения материала, вещества с “памятью формы”, агрегатное изготовление профилей и даже ферм и сегодня уже является актуальным.

Так что, при анализе перспективных конструктивных решений и способов их построения для строительства в космосе, искусственным является перераспределение схем и процессов в виде перспективных групп. Доказательством этого служат и история, и современное развитие строительства на земле.

Каждая конструктивная схема, каждое технологическое направление и каждый вид материала должны быть оценены для конкретной задачи с уточненными техническими требованиями, а не обобщенно, так как концепции надо строить на направлениях, а не на конкретных решениях.

В трансформируемых системах для космоса конкретные решения представляют ферменные, балочные, вантовые, вантово-стержневые, лепестковые, пластинчатые, оболочечные, комбинированные, плоские и пространственные, а также преднатяженные и другие виды известных и новых конструкций [33], [37], [42], [58], [62], [67], [73], [75], [114], [124], [126], [127].

Однако для реализации каждой схемы трансформируемых конструкций космического базирования особый интерес представляют структуры кинематики и динамики формоизменения системы, так как вышеотмеченные конкретные конструктивные схемы могут быть выполнены из разных структур трансформации. Например, ферменную конструкцию можно пос-

троить из шарниров и стержней, а также из пневматических плечатых труб с надуванием или наполнением пластической массой с последующим отверждением.

Этим подтверждается то, что трансформируемость не является приметой конструкции с точки зрения ее принадлежности к какому-нибудь схематическому классу, как это дается в большинстве классификаций, [30], [74].

Также не является конструктивной приметой для трансформируемых систем ее динамические основы. Характеристика системы независимо от того, является она механически автоматически и вручную, центробежно или по-другому развертываемой, не ограничивает класса схем для их реализации. Например, центробежно можно развертывать не только традиционно соответствующие этим решениям вантовые системы, но и длинномерные ферменные элементы.

Поэтому, при изучении трансформируемых конструкций с точки зрения их отличительных сторон, на передний план выходят реальные структуры трансформации, кинематические и динамические основы формообразования.

Космические сооружения практически, как и наземные, по своему функциональному назначению могут быть:

- силовые;
- прецизионные;
- ограждающие.

Эти функциональные качества добавляются к требованиям эксплуатации конструкции и ставят условия, жестко влияющие на принципы выбора трансформируемой конструкции. Например, при прецизионных конструкциях с большими эксплуатационными габаритами и ограниченными размерами сложного пакета затруднено применение ферменных дискретных структур трансформации, так как наличие множества механических шарниров и элементов фермы накапливает люфты и погрешности изготовления. Это осложняет достижение точной проектной геометрии, влечет за собой увеличение деформации ниже предела упругой работы материалов, что часто уменьшает надежность развертывания конструкции.

Особенно это сказывается, когда отдельные звенья, или, в целом, ферменная конструкция является статистически неопределимыми. Причиной является то, что при малейшем смещении узлов крепления, так называемые "ломающиеся" стержни, которые часто являются энергоносителями развертывания и конечными фиксаторами формы, не могут до конца выпрямляться и, в результате, не обеспечивается завершение процесса формообразования.

## 2 Проблемы создания больших космических инженерных сооружений

**П**роблемы построения на космических орбитах больших инженерных сооружений весьма разнообразны. Их изучение, закономерности развития каждого направления и определение перспектив представляют разные области исследований. Поэтому стремление к всесторонней и обобщенной систематизации проблемы не является обоснованным и носит фрагментальный характер. Однако такой подход не упрощает значение проведенных работ.

Проблема построения больших космических сооружений выдвигает на передний план функциональные вопросы, то есть цели и задачи космических инженерных конструкций. Эти конструкции находят свое применение в осуществленных, и особенно, будут применены в намеченных космических программах, которые охватывают самые разные области от телекоммуникационных систем до орбитальных электростанций.

Но каждая функциональная проблема выходит на техническое решение проблемы, где особое место занимают космические сооружения – инструменты исполнения функций. Диапазон этих инженерных конструкций весьма широк, и он включает разные решения, множество которых уже реализовано, но многие еще предстоит сделать [11], [30], [40], [66], [111], [115], [46], [122], [123].

Большие орбитальные конструкции радиотелескопов и других типов антенн, солнечные батареи, концентраторы, отражатели и паруса, технологические площадки и каркасы станции и многое другое для освоения космоса становятся такими же актуальными, как ракетоносители и космические аппараты.

Что же касается чисто инженерных задач, то они начинаются вслед за функциональными и техническими проблемами на уровне “конструкторских задач” [21], [25], [29], [68], [70], [113], [125].

Однако, с учетом основных эксплуатационных, транспортных, геометрических, весовых и силовых параметров, определение формы конструкции и ее структуры должно решаться в процессе определения общей картины и идеологии космического комплекса, т.е. во взаимосвязи с космическим аппаратом

и технологическим оборудованием или как автономной космической системы, построенной на силовой базе самой конструкции.

Такая постановка вопроса не только готовит процесс разработки конструкции к эффективной работе с аппаратом, но и может влиять на процесс выбора самой формы и структуры конструкции, а порой и на характер построения космического комплекса, что весьма повышает степень оптимальности инженерного решения задачи.

Для трансформируемых сооружений форма и структура системы не только является средством достижения эксплуатационных требований, но и представляет собой базу для обеспечения процесса формообразования и соответствия габаритных и весовых показателей сложенного транспортного пакета изделия с грузовыми характеристиками ракетносителей.

Поэтому определение формы и структуры трансформируемой конструкции и элементной базы ее построения представляет первостепенную проблему создания разворачиваемых космических сооружений, так как при неправильном подходе к этому вопросу последующие старания по доводке конструкции, оснащению ее удачными механизмами и элементами, применению прогрессивных материалов и другие, к осязательному успеху не приводят.

Повышение технического уровня решения формы и структуры системы и построение космического комплекса для этапов транспортировки, вывода на орбиту, разворачивания и функционирования требует разработки математических моделей механики в целях теоретического анализа процессов и оценки конструкции [1], [28].

В этом направлении накоплен значительный опыт. Но проблемы оптимизации геометрических и весовых параметров, оценки устойчивости, изучения нелинейных процессов, кинетики разворачивания сложных систем и получения динамических изображений работы конструкции и космического комплекса на экранах с учетом моделирования аномальных и нештатных ситуаций, космических воздействий и еще многие другие задачи требуют решения на более высоком уровне [3], [5], [6], [7], [18], [39], [41], [60], [61], [66], [77], [78], [81], [82], [83], [112], [117].

В этом направлении особо надо подчеркнуть возможность теоретических основ определения надежности конструкции, так как имеем дело, с одной стороны, с дорогостоящей и ответственной системой в виде космической техники, а с другой стороны, со сложными синтезами механизмов и сооружений,

которые, как правило, объединены в трансформируемых системах.

Эксплуатационные параметры на основе сохранения жесткости и точной геометрии, наряду с конструктивной схемой, значительно зависят от вида применяемого материала. Акцент конструкционного материала усиливается космической средой, в основном, в виде резкого нарастания диапазона величин температурных перепадов, а также вакуумом и радиационным воздействием. К этому добавляются ограничения по электростатическим разрядам и т.д.

Наряду с особыми "космическими" требованиями, усилены традиционные стремления к повышению прочности и жесткости и уменьшению веса материала. Однако при их подборе на передний план могут выйти повышенные качества погашения колебаний, которые для космических больших конструкций всегда являются актуальными.

Интенсивно ведутся работы по созданию новых конструкционных материалов для космических систем с применением металлических, керамических, пластических, силикатных, углевых и других основ и соединений [12].

Особое значение имеет не только получение материала как вещества или композита, но и освоение способов его обработки и получения на их основе технологических полуфабрикатов или готовых элементов и даже узлов.

Достижение и сохранение формы космических конструкций часто опирается на существование материалов с "памятью формы", свойством затвердевания от космических воздействий, с нарастанием объема и т.д.

Капризным вопросом в "космических" конструкциях являются скользящие поверхности, т.е., в основном, применение механических узлов в виде скользящих пар. Поэтому предпочтительным является сокращение их количества, а в лучшем случае отказ от них, несмотря на то, что разработаны подшипники качения, втулки, прокладки, смазки и другие средства, облегчающие "космические" ограничения.

Наличие механических узлов особенно отрицательно влияет на жесткость и точность прецизионных конструкций как на этапах функционирования, так и на стадиях монтажа и трансформации, где еще добавляются проблемы по надежности развертывания. Поэтому в космических конструкциях, особенно в прецизионных трансформируемых системах для формообразования, желательна обеспечение кинематических процессов на узлах и элементах с применением деформационных свойств материалов.

В трансформируемых конструкциях наличие синтеза схем сооружений и механических систем особо подчеркивает технологические проблемы, которые ставят свои требования на разных этапах процессов создания и функционирования космических инженерных развертываемых конструкций [4].

Понятие "технология создания орбитальных инженерных трансформируемых сооружений" объединяет в себя: технологичность конструкционных материалов, технологические процессы изготовления элементов, узлов и деталей, технологическое оборудование и технологию собственно сборки и монтажа изделия, технологию экспериментальных исследований и штатных испытаний, технологию транспортировки, вывод на орбиту и развертывание трансформируемой системы, технологию функционирования и обслуживания изделия и, наконец, в целом, технологичность самой конструкции.

Многие технологические процессы космических конструкций являются идентичными по отношению к наземным системам. Однако существуют процессы, в том числе и наземная сборка и испытание больших конструкций космического базирования, которые, являясь весьма своеобразными, сложными и ответственными, ввиду оригинальности, требуют рассмотрения как отдельной проблемы [15], [23], [59], [64], [65], [83], [128].

Со временем появление на орбитах самых разнообразных больших инженерных конструкций станет обычным явлением [14], [91]. Но до этого придется решать множество теоретических, экспериментальных и технических задач, которым и посвящается предложенная книга, ориентиром которой в свое время послужил космический эксперимент над развертываемым впервые в мировой космонавтике 10-метровым радиотелескопом КРТ-10.

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУМОВИЧ ✧ ТЕХНОЛОГИИ СЪЕДИНЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

## 2 Трансформируемые системы

### 1 Общие признаки трансформируемых конструкций

Слово “трансформация” происходит от позднелатинского “transformatico” и означает превращение, преобразование, видоизменение и т.д.

Диапазон значимости этого слова довольно широк, термин этот используется практически во всех областях науки, техники и искусства.

Трансформируемость в инженерных сооружениях определяется следующими терминами: “трансформируемые системы”, “трансформируемые конструкции”. “трансформируемые покрытия” и т.д. Однако на практике, в литературе, в разных сферах быта и техники еще пользуются терминами: “раскрываемые”, “раскладные”, “опрокидные”, “раздвижные”, “надувные”, “всемерные”, “гармонсообразные”, “пантографические” и т.д.

Между тем все они представляют собой единую – трансформируемую систему, так как то общее и принципиальное, что объединяет перечисленные конструкции – это их трансформативность.

Трансформируемая конструкция применялась уже в древние времена в виде надувных кожаных подушек как средства для индивидуальной переправки по воде. Такими конструкциями являлись также и гибкие раскрываемые лестницы, используемые для различных целей.

Примерами трансформируемых конструкций служат зонты, подъемные паруса кораблей, портативные веера, опрокидные дверные и оконные тенты и многое другое.

Классический пример трансформируемой конструкции – широко распространенные раскладные кровати – “раскладушки”, которые в сложенном виде весьма компактны, малогабаритны и легко транспортируются. Однако транспортабельность не является обязательным и достаточным признаком трансформируемости конструкций.

Например, раздвижные мосты на Неве представляют собой стационарные крупные трансформируемые инженерные сооружения, которые при необходимости раздвигаются, однако при этом они нетранспортабельны.

Таким образом, есть трансформируемые конструкции транспортируемые и нетранспортируемые, однако все они обладают способностью менять форму.

Изменение формы конструкции означает относительное взаимоперемещение отдельных ее элементов. Однако не все изменения общей формы конструкции обуславливают трансформируемость системы.

Множество кубиков образуют разные формы при их разном расположении одного относительно другого (рис. 2.1).

Между тем, это множество элементов будет представлять собой трансформируемую систему только тогда, когда элементы определенным образом связаны между собой и образуют некоторую целостность. Без этих условий подобное множество

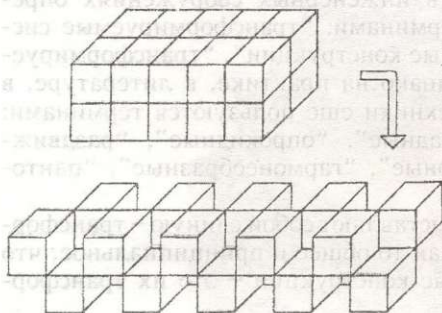


рис. 2.1

элементов определяет скорее всего сущность сборных конструкций, которые не следует смешивать с трансформируемыми.

Система элементов, способная менять форму, также многообразна, как и значимость слова “трансформация”. Поэтому системы, в которых составляющие элементы, связанные между

собой, могут перемещаться один относительно другого, можно разделить на две основные группы.

Системы первой группы в процессе своего функционирования трансформируются, т.е. в каждом промежутке времени последовательность всех элементов один относительно другого разная. Подобная система в основном представляет собой механизмы, т.е. “систему тел, предназначенных для преобразования движения одного или нескольких тел в требуемые движения других тел”. Пример такой системы – часы, элементы которых в разные промежутки времени расположены один относительно другого по-разному.

Э. В. МЕДЗМАРИАНЬВИЛИ \* ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



Системы второй группы функционируют в стадии фиксированной геометрической формы, возникшей вследствие трансформации. Например, опускаемые шторы после трансформации выполняют свои функции, ограждая помещение от внешнего пространства.

Под функционированием системы в обоих случаях подразумевается процесс выполнения ею своего прямого назначения.

Есть системы, совмещающие признаки обеих групп, т.е. являющиеся одновременно и механизмами, и трансформируемыми системами.

Надувной аэростат (рис. 2.2) представляет собой трансформируемую систему. Эластичный шар, возникающий после вздутия состоит из множества элементов А, связанных между собой постоянным расположением относительно точки О на расстоянии  $r$  под внутренним давлением  $P$  на высоте  $H$ . Шар держит груз весом  $G$  таким образом, что взаиморасположение элементов А не меняется.

Если, в целях маневрирования, кран открыт в промежутке времени  $\Delta t$  (рис. 2.3), элементы А перемещаются на расстояние  $\Delta r$  к точке О, вследствие падения внутреннего давления на величину  $\Delta P$ , за счет чего груз  $G$  опускается ниже на высоту  $\Delta H$ .

В этом промежутке времени трансформируемая система аэростата содержит признаки механизма. После закрытия крана, с помощью внутреннего постоянного давления  $P - \Delta P$ , элементы А по отношению к точке О фиксируются на расстоянии  $r - \Delta r$ , а шар держит груз  $G$  на высоте  $H - \Delta H$  от уровня земли (рис. 2.4). На этом этапе аэростат обладает признаками только трансформируемой конструкции.

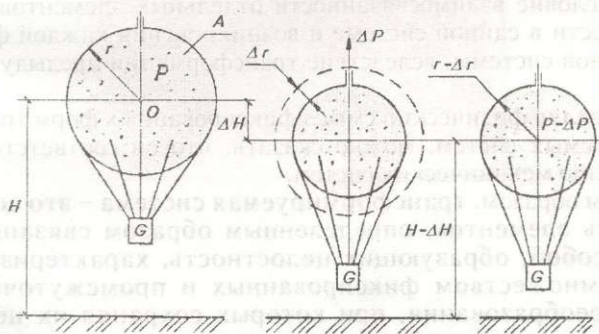


рис. 2.2

рис. 2.3

рис. 2.4

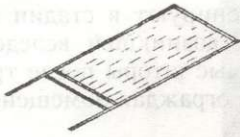


рис. 2.5

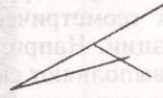


рис. 2.7

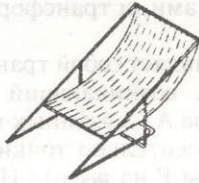


рис. 2.6

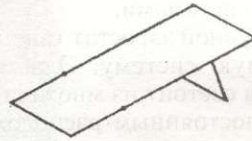


рис. 2.8

Трансформируемые системы в конкретных случаях могут иметь разные формы. Например, раскладное кресло (рис.2.5) в сложенном виде удобно хранится и легко переносится благодаря малогабаритности.

В раскрытом виде (рис.2.6), т.е. после трансформации, кресло принимает функциональную форму, тогда в него можно сесть. В зависимости от расположения элементов, по желанию можно придавать ему разные функциональные формы (рис.2.7). Фиксированное состояние формы кресла соблюдается не только в процессе функционирования, но и при другом расположении элементов (рис.2.8).

Во всех формах трансформации конструкции кресла соблюдается условие взаимосвязанности отдельных элементов, их целостности в единой системе и возникновения каждой фиксированной системы, вследствие трансформации предыдущей формы.

Определяя физический смысл фиксированных форм трансформируемых систем, можно сказать, что он соответствует равновесию механических систем.

Таким образом, трансформируемая система – это совокупность элементов, определенным образом связанных между собой, образующих целостность, характеризующуюся множеством фиксированных и промежуточных форм преобразования, при которых сохраняя их целостность взаимосвязей, взаиморасположения элементов меняется в пространстве и во времени.

В книге последовательно будут рассмотрены трансформируемые системы как сложноорганизованные объекты, так как многозначность понятия "transformatico" обуславливает многообразие подходов к их изучению и оценке, прогнозают создания и перспективам применения.

В работе, посвященной трансформируемым конструкциям, рассмотрены общие признаки трансформируемых конструкций, их классификация, а также рассмотрены вопросы проектирования трансформируемых конструкций, их эксплуатации и обслуживания.

Среди основных признаков трансформируемых конструкций можно выделить следующие: возможность изменения формы, объема, массы, жесткости, прочности, жесткости, устойчивости, надежности, долговечности, ремонтопригодности, экологичности, безопасности, экономичности, простоты и удобства эксплуатации.

Классификация трансформируемых конструкций может быть проведена по различным признакам: по виду трансформации (геометрической, функциональной, структурной), по месту трансформации (внутри конструкции, снаружи, в процессе эксплуатации), по типу трансформации (электрической, гидравлической, пневматической, механической, тепловой, химической, биологической).

Необходимо отметить, что трансформируемые конструкции являются одним из перспективных направлений развития современной техники, особенно в области космических аппаратов, станций, обитаемых модулей и т.д.

Важным преимуществом трансформируемых конструкций является возможность их компактного хранения и транспортировки, а также возможность их быстрого развертывания и демонтажа.

Наряду с рассмотрением общих признаков трансформируемых конструкций, в работе будут рассмотрены вопросы проектирования трансформируемых конструкций, их эксплуатации и обслуживания.

## 2 Процессы формообразования

**Б**ыстрые темпы возведения, большие объемы намеченных работ, высокое качество и надежность, экономичность и индустриальность, эстетичность и другие требования, предъявляемые к конструкциям, обуславливают необходимость создания эффективных строительных материалов, разработки новой технологии изготовления и сборки конструкции, обеспечения транспортировки, максимальной заводской готовности изделия, высокой степени организации, механизации и автоматизации всего процесса от проектирования конструкции до ее воплощения.

Среди множества вопросов, связанных с эффективным решением технической задачи, одним из основных является форма конструктивной схемы сооружения. Вся история развития строительства, с инженерной и архитектурной точек зрения, находится в прямой закономерной связи с развитием форм конструкции.

Поиски и изучения новых форм конструкции сегодня охватывает не только разные области техники, но и живую природу.

Процессы формообразования вызывают одинаковый интерес у исследователей как в области техники, так и живой природы.

Не углубляясь в вопросы применения бионического метода, отметим, что на данном этапе с его помощью в основном решаются задачи формы с точки зрения разработки конструкции с повышенными эксплуатационными и физико-механическими свойствами и усовершенствованной архитектурой.

Задачи конструкторов заключаются в определении не только оптимальной формы конструкций, но и способов их воплощения, т.е. достижения собственной формы конструкции.

Именно эта сторона, выявление реально возможных и доступных способов формирования конструкции, в большинстве случаев оказывается основным критерием оценки уровня технического решения всей проблемы создания конструкции.

Наряду с разъяснением закономерностей формообразования, взаимосвязей явлений, генетики, механизмов процесса создания форм представляет интерес и суть основных способов воплощения формы. В частности, более конкретно ставится

вопрос: какими способами создается конструкция, т. е. как может происходить формирование ее собственной формы?

Инженерная конструкция – это система взаиморасположенных элементов. Как система элементов она имеет структуру – “совокупность устойчивых связей объекта, обеспечивающих его целостность и тождественность самому себе”.

Исходными для создания конструкции любой формы являются ее составные элементы и связи для их взаимного закрепления.

В реальных условиях часто нет четкой границы между отдельно представленным элементом и отдельно образованными связями, так как функционально они слиты воедино. Несмотря на это, для четкой систематизации решения задачи удобным представляется функциональное разграничение элементов системы от характера их взаимоотношения – связей.

Процесс формирования конструкции происходит от исходной позиции – существования элементов и связей или их добавочного создания или возникновения как и бывает в живой природе – до воплощения в нужную форму.

В любом случае форма – внешнее строение, наружный вид конструкции – является конкретной системой множества элементов, которые, как уже отмечалось, находятся в определенных отношениях и связях один с другим, образуя определенную целостность, единство.

Изменение формы – суть то же, что и изменение геометрии конфигурации. Поэтому при каждом изменении формы или возникновения новой меняется или возникает новое множество составных элементов, так как каждое из них имеет свое частное геометрическое расположение составных элементов.

Так как форма конструкции является конкретной системой множества элементов, изменение последнего означает и изменение системы.

Если возникновение или изменение формы конструкции всегда означает возникновение или изменение конструктивной системы, структура при этом остается либо неизменяемой, постоянной, либо меняется.

Рассмотрим пример формы в виде конструкции, построенной квадратичной системой из множества элементов  $m$  с совокупностью устойчивых стержневых связей  $n$ , заземленных шарнирно (рис.2.9).

Как видно из рис.2.9, без изменения типа и длины устойчивых связей с помощью разных возможных воздействий с

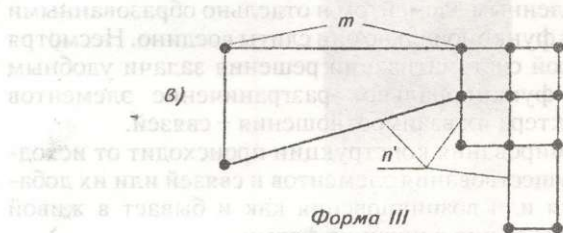
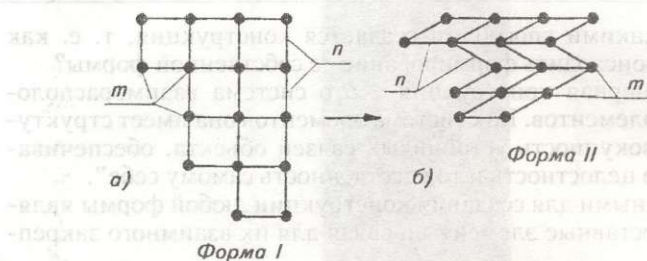


рис. 2.9

переводом квадратичной системы (рис.2.9,а) в ромбическую (рис.2.9,б), форма I преобразовалась в форму II, т.е. произошло формообразование без изменения структуры.

Для иллюстрации изменения формы с изменением ее структуры рассмотрим ту же форму (рис.2.9,а). Сохраняя в множестве элементов неизменным их количество, новое множество  $m$  элементов, т.е. новую систему из этих элементов, имеющую форму III (рис.2.9,г), получаем путем изменения структуры – укорочения и удлинения совокупности связей, т.е. форма III возникла вследствие “неустойчивости” связей, поменявших структуру, в отличие от отмеченного выше формообразования (рис.2.9,б), когда связи оставались устойчивыми.

Распространенным случаем создания новых форм является изменение количества составных элементов множества конструктивной системы. Такие процессы формообразования происходят добавлением новых элементов и возникновением новых связей или их уменьшением (рис.2.10).

Во всех видах формообразования элементы конструкции могут быть как одинаковыми, так и разными.

Все возможные процессы формообразования опираются на два компонента: 1) на элементы системы  $N$  и 2) на структуру  $S$ .

Новые формы могут создаваться во всех случаях, когда

Э. В. МЕДВЕДЕВА И А. В. МЕДВЕДЕВА ✧ ПЕРЕНЕСЕНИЕ ФОРМЫ НА КООРДИНАТЫ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ И Д. В. АНДРОПОВ. МИРОВОЕ КОНСТРУКЦИОННОЕ КОСМОС И НА ЗЕМЛЕ

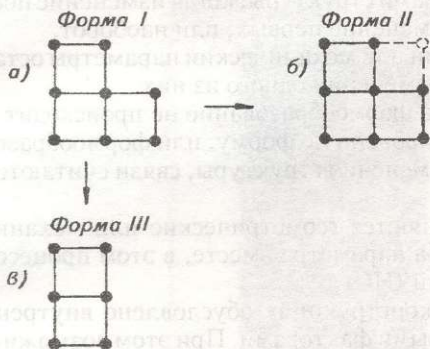


рис. 2.10

количество элементов меняется ( $N^{\sim}$ ) или остается постоянным ( $N^{\bar{}}$ ). В каждом случае структура С также меняется ( $C^{\sim}$ ), либо остается постоянной ( $C^{\bar{}}$ ). Это означает, что при формообразовании могут наблюдаться следующие четыре комбинации.

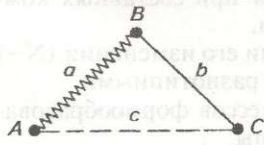
$N^{\bar{}}$	$C^{\bar{}}$
$N^{\sim}$	$C^{\sim}$
$N^{\bar{}}$	$C^{\sim}$
$N^{\sim}$	$C^{\bar{}}$

В аспекте процессов формообразования конструкции следует отдельно рассмотреть ее структуру – совокупность устойчивых связей.

Каждая связь характеризуется двумя основными параметрами: 1) геометрическим –  $\Gamma^c$  и 2) механическим –  $M^c$ .

Геометрический параметр связи определяет взаиморасположение только непосредственно связанных элементов, а механический – их силовую взаимосвязь и степень свободы. Для наглядности рассмотрим структуру взаимосвязанных трех элементов А, В и С (рис.2.11).

Геометрические параметры структуры подразумевают длину связей – а, b и с, а механические – связи: пружинчатую (упругую) между элементами А и В; стержневую (двухстороннюю) – между элементами В и С и гибкую (одностороннюю) – между элементами С и А.



Если у связей меняются геометрические или механические параметры, или оба параметра вместе, то это значит, что меняется структура конструктивной системы С.

Часто наблюдается определенная связь между геометрическими и

рис. 2.11

механическими параметрами структуры, когда изменение последних обуславливает изменение первых, или наоборот.

Иногда геометрический или механический параметры остаются неизменными при изменении одного из них.

Во всех случаях, когда формообразование не происходит и конструкция имеет фиксированную форму, или формообразование совершается без изменения структуры, связи считаются устойчивыми (УС).

Связи, у которых меняются геометрические или механические параметры или оба параметра вместе, в этом процессе считаются неустойчивыми (НС).

Формообразование в конструкциях обусловлено внутренними и наружными силовыми факторами. При этом возможны следующие варианты комбинаций состояния количества элементов  $N$  с геометрическими и механическими характеристиками структуры:

$N -$	$\Gamma C -$	$M C -$
$N -$	$\Gamma C -$	$M C \sim$
$N -$	$\Gamma C \sim$	$M C -$
$N -$	$\Gamma C \sim$	$M C \sim$
$N \sim$	$\Gamma C -$	$M C -$
$N \sim$	$\Gamma C -$	$M C \sim$
$N \sim$	$\Gamma C \sim$	$M C -$
$N \sim$	$\Gamma C \sim$	$M C \sim$

Перечисленные комбинации являются разными случаями формообразования. В реальных условиях эти процессы могут происходить при наличии нескольких комбинаций.

Рассмотрим, к примеру, процесс изменения формы конструкции, когда изменяются геометрические и механические параметры структуры элементов и кроме того, образуются и новые элементы с постоянной характеристикой структуры (рис. 2.12).

Когда формообразование происходит при составных комбинациях, процесс называется сложным.

При постоянном количестве ( $N -$ ) или его изменении ( $N \sim$ ) элементы могут быть однотипными или разнотипными.

Из всевозможных комбинаций процессов формообразования можно выделить две основные группы.

Если в комбинации формообразования меняется количество элементов, такой процесс будет называться "количествен-



Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУКОВИЧИ ПЕРАНФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

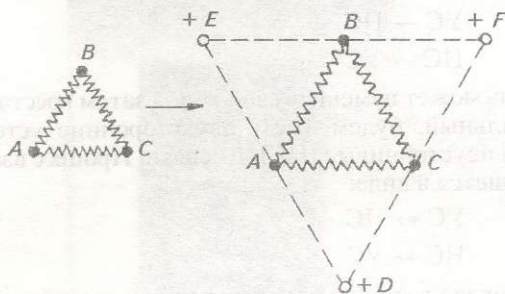


рис. 2.12

ным”.

Если в комбинации процесса количество составных элементов конструктивной системы не меняется, такой процесс будет называться “качественным”.

Соответственно символика группируется следующим образом:

$N \sim$ ; $\Gamma^{C-}$ ; $M^{C-}$	$N^-$ ; $\Gamma^{C-}$ ; $M^{C-}$
$N \sim$ ; $\Gamma^{C\sim}$ ; $M^{C-}$	$N^-$ ; $\Gamma^{C\sim}$ ; $M^{C\sim}$
$N \sim$ ; $\Gamma^{C-}$ ; $M^{C\sim}$	$N^-$ ; $\Gamma^{C\sim}$ ; $M^{C-}$
$N \sim$ ; $\Gamma^{C\sim}$ ; $M^{C\sim}$	$N^-$ ; $\Gamma^{C\sim}$ ; $M^{C\sim}$

В сложных комбинациях соблюдаются совместно как качественные, так и количественные процессы формообразования.

На фоне количественных и качественных процессов различают: формоустойчивые, формонеустойчивые и формоуточненные типы формообразования.

Основным критерием определения типа формообразования является состояние связей.

В конструкциях могут быть такие связи, которые в определенном интервале времени будут устойчивыми, а в определенном – неустойчивыми. Это означает, что как устойчивые, так и неустойчивые связи могут быть соответственно постоянными (УСП), (НСП) и непостоянными (УСН), (НСН).

Если связь обладает способностью превращаться только в связь другого типа без восстановления первоначального, такая связь будет односторонней непостоянной устойчивой (УСНО) или неустойчивой (НСНО).

Символически процессы непостоянства и односторонности связей можно записать так:

$УС \rightarrow НС$

$НС \rightarrow УС$

Если связь может изменить свой тип, а затем восстановится в первоначальный, будем иметь двухсторонние устойчивые (УСНД) или неустойчивые (НСНД) связи. Процесс взаимоперехода запишется в виде:

$УС \leftrightarrow НС$

$НС \leftrightarrow УС$

Если переход устойчивых непостоянных связей в неустойчивые и обратно происходит 1 раз, связи называют "одноразовыми".

$УСНДО$  и  $НСНДО$

$УСНОО$  и  $НСНОО$

Если же эти процессы происходят более одного раза, связи называют "многообразовыми"

$УСНДМ$  и  $НСНДМ$

Процесс многообразовости перехода устойчивых связей в неустойчивости и обратно символично можно записать следующим образом:

$УС \rightarrow НС \rightarrow УС \rightarrow НС \rightarrow УС$

Заметим, что непостоянные односторонние связи не могут быть многообразовыми.

Анализируя основные типы формообразования, следует отметить, что формоустойчивые процессы в прямом смысле этого понимания означают устойчивость формы в каждом промежутке времени всего процесса по отношению к разным воздействиям. При этом любая конструктивная система может быть подвержена такому воздействию, при котором она потеряет свою формоустойчивость. Поэтому, когда говорят об устойчивости формы, подразумевают только то условие, при котором она сохраняется.

В формоустойчивых процессах меняется количество устойчивых связей ( $УС \sim$ ). При этом отсутствуют неустойчивые связи ( $НС=0$ ), т.е. в неустойчивых процессах форма возникает вследствие нанесения (снятия) устойчивых связей на соответственно нанесенные (снятые) элементы. Количество устойчивых связей в процессе может меняться последовательно (рис. 2.13,а) или мгновенно (рис. 2.13,б):

Таким образом, формоустойчивость характеризует процесс

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУКОВИЧ ✦ ПЕРМАНЕНТНО-МИРЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

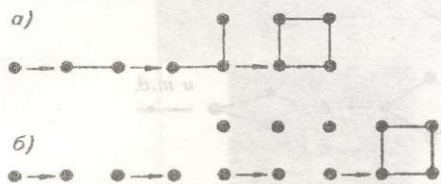


рис. 2.13

возведения как при последовательном (рис.2.13,а), так и одновременном закреплении или замоналичивании заранее расставленных сборных элементов (рис.2.13,б) одного с другим.

В формонеустойчивых процессах образования формы весь процесс с сохранением постоянного количества элементов  $N^-$  опирается на неустойчивые связи с постоянным количеством элементов или с его изменением.

Наглядным примером формонеустойчивости является формирование бетонной смеси до ее затвердения в специальных формах. Неустойчивость связей между элементами обуславливает неустойчивость формы смеси в процессе формирования. Поэтому бетону можно придать любую форму, которая до затвердения смеси (т.е. до превращения неустойчивых связей в устойчивые) достигается с помощью добавочных устойчивых связей в виде опалубки или специальной формы.

Схематически формонеустойчивые процессы формообразования можно представить в следующем виде (рис.2.14):

В формоустойчивых и формонеустойчивых процессах конструктивной системе можно придать разные формы. В первом случае это достигается разной группировкой сборных элементов, а во втором – изменением формы временных связей, поддерживающих форму самой системы в фиксированном положении.

Формоуточненные процессы происходят при постоянном количестве устойчивых связей (УС<sup>+</sup>) и элементов  $N^-$ . При

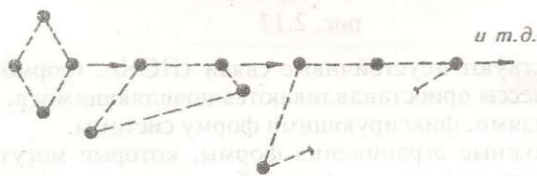


рис. 2.14

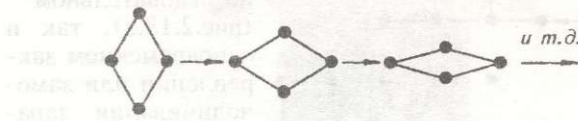


рис. 2.15

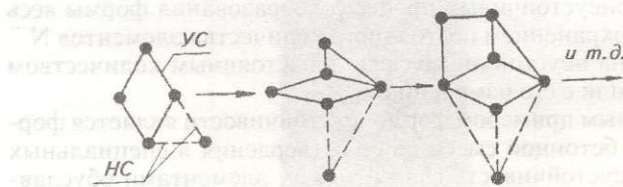


рис. 2.16

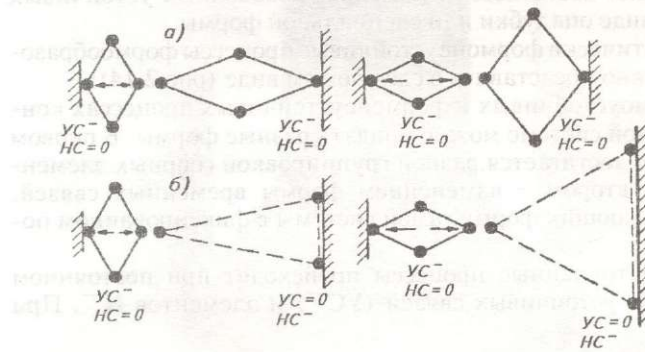


рис. 2.17

этом, отсутствуют неустойчивые связи ( $НС=0$ ). Формоуточненные процессы приостанавливаются появляющимися, добавочными связями, фиксирующими форму системы.

Все возможные ограничения формы, которые могут возникнуть в процессе такого формообразования, уже заранее закономерно в нем заложены (рис.2.15).

Наглядным примером формоуточненных процессов формо-

образования являются механизмы, которые в процессе работы обуславливают закономерные изменения своей формы.

В реальных условиях перечисленные типы формообразования, являющиеся основными, соблюдаются как в отдельности, так и совмещенно (рис.2.16).

Заранее оговорим, что при взаимодействии разных систем, формообразование каждой из них может быть как одинаковым, так и разным. Рассмотрим для иллюстрации конкретные системы (рис.2.17).

## 3

## Трансформируемые структуры

Процессы формообразования, происходящие без изменения устойчивых связей ( $УС^-$ ) и взаимосвязанных элементов ( $N^-$ ), при отсутствии ( $НС=0$ ) или наличии неустойчивых связей без изменения или с изменением их количества, называются трансформацией формы, или просто – трансформацией. Соответственно системы, способные трансформироваться, будут трансформируемыми.

Под неизменяемостью устойчивых связей подразумевается, что в стадии трансформации определенное или нулевое количество их сохраняется без изменения.

Из этого следует, что трансформируемые процессы формообразования объединяют формоуточненные и формонеустойчивые процессы в разных комбинациях, т.е. подразумевается их существование как в отдельности, так и совмещенно.

Особое условие трансформируемых систем заключается в том, что целостность системы УС не должна нарушаться при аннулировании всех неустойчивых связей, если они в ней есть.

В общем виде трансформируемые системы с учетом существования стадий фиксированной формы и трансформации являются синтезом инженерных сооружений и механизмов.

При преобразовании системы может меняться как внутреннее строение конструктивной структуры, так и внешнее очертание. Конкретной систематизации трансформации системы будет подвергаться геометрия формы, так как рассматриваются принципы процессов образования формы, являющейся внешним очертанием системы. Здесь внутреннее строение конструкции не следует смешивать с очертаниями внутренних конфигураций форм, характерных для многих систем.

Из рассмотренных реальных конструктивных систем следует, что каждый из взаимосвязанных элементов в отдельности, без исключения, при разных воздействиях может деформироваться. Это означает, что так называемый исходный элемент, являющийся базовым и теоретически принятый абсолютно твердым, в реальных условиях вследствие упругости и пластичности при разных воздействиях сам меняет форму и превращается в систему с неустойчивыми связями.

При такой постановке вопроса аннулируются все границы классификации систем по способностям формообразования,

так как исчезает понятие “устойчивые связи”. Поэтому надо учитывать тот факт, что элементы системы будут считаться недеформируемыми – абсолютно твердыми. В конструкциях из реальных материалов, в зависимости от их вида, схемы, ожидаемых воздействий и деформации для соблюдения условий “абсолютной недеформативности составных элементов” система может быть рассмотрена на уровне как членения ее на отдельные простые конструктивные элементы, так и на уровне молекулярных связей.

Исходя из сказанного, если рассматривается формообразование вследствие деформации геометрически неизменяемой ферменной конструкции как системы с постоянным числом устойчивых связей и составных элементов, представляющих на уровне молекулярных связей систему с неустойчивыми связями, то геометрически неизменяемая форма будет иметь вид трансформируемой системы.

С точки зрения теоретического обобщения принципов формообразования, здесь противоречий нет: Однако, с точки зрения конструктивной классификации, где принято понятие “малых” и “больших” перемещений, для геометрически изменяемых и неизменяемых систем необходимо разграничить обобщенное понятие “трансформируемые системы” от его конкретного проявления – “трансформируемые конструкции”.

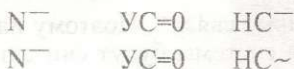
На этом уровне, на котором рассматривается конструкция как состоящая из отдельных элементов единой системы, элементы приняты абсолютно недеформируемым твердым телом.

Трансформируемая конструкция, в отличие от обобщенной трансформируемой системы при отсутствии в ней устойчивых связей по кинетическому анализу соотношения и расстановки элементов и их взаимосвязывающих устойчивых связей, должна представлять геометрически изменяемую систему.

Таким образом, трансформируемыми могут быть конструкции, содержащие постоянное количество составных элементов и постоянное или нулевое количество их устойчивых связей, удовлетворяющих условиям геометрической изменяемости системы с постоянным или непостоянным количеством неустойчивых связей или без них.

Символически трансформируемую конструкцию можно представить в следующем виде:

$$\begin{array}{lll} N^- & UC^- & HC=0 \\ N^- & UC^- & HC^- \\ N^- & UC^- & HC^- \end{array}$$



Рассмотрим конкретные примеры (рис.2.18).

Перспектива создания и применения инженерных конструкций в космосе все чаще связывается с технологическими конструктивными системами. С точки зрения формообразования, технологические системы образуют свою форму вследствие трансформации и формоустойчивости процесса, т.е. изменения количества устойчивых связей и составных элементов.

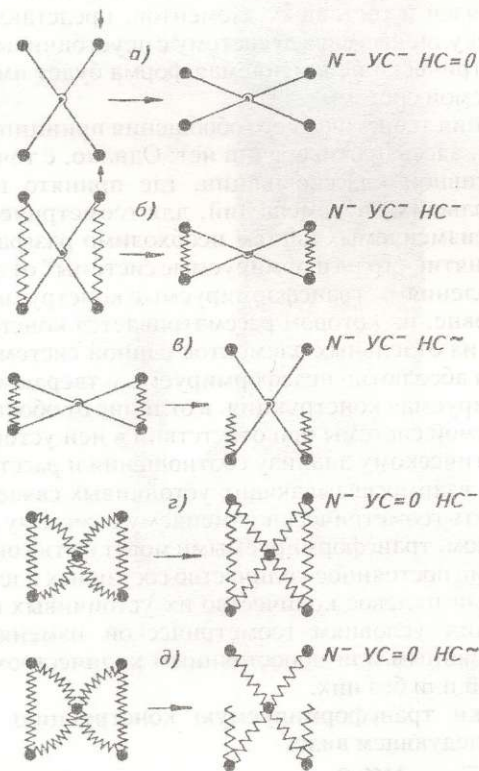


рис. 2.18

Э.В. МЕДВЕДЕВИЧУМ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



Э.В. МЕДВЕДЕВА И В.В. ШИШОВЫ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

## 4 Геометрия трансформируемых систем

Трансформируемые системы имеют фиксированные формы и формы преобразования. Последние возникают в процессе трансформации и реализуются линейными, плоскими, оболочечными и объемными формообразованиями.

Такие преобразования обуславливают различные комбинации одномерных, двумерных и трехмерных фиксированных форм.

Для классификации возможных преобразований введем соответствующую символику:

одномерная форма –	$F=f(x)$ ,
двумерная форма –	$F=f(x;y)$ ,
трехмерная форма –	$F=f(x;y;z)$ .

Более конкретно, вводя символику представим:

линейная форма –	
плоская форма –	◆
криволинейная форма –	∩
оболочечная форма –	⊕
пространственно-криволинейная форма –	∫
объемная форма –	□

С применением символики комбинации преобразований основных геометрических форм можно выразить таким образом:

I. Одномерная форма в одномерную и обратно:

$$F'=f'(x) \leftrightarrow F''=f''(x)$$

1) линейная форма в линейную

$$| \leftrightarrow |$$

II. Одномерная форма в двумерную и обратно:

$$F'=f'(x) \leftrightarrow F''=f''(x;y)$$

1) линейная форма в плоскую

$$| \leftrightarrow \blacklozenge$$

2) линейная форма в криволинейную

$$| \leftrightarrow \cap$$

### III. Одномерная форма в трехмерную и обратно:

$$F' = f'(x) \leftrightarrow F'' = f''(x; y; z)$$

- 1) линейная форма в объемную

$$| \leftrightarrow \square$$

- 2) линейная форма в пространственно-криволинейную

$$| \leftrightarrow \int$$

- 3) линейная форма в оболочечную

$$| \leftrightarrow \star$$

### IV. Двумерная форма в двумерную и обратно:

$$F' = f'(x; y) \leftrightarrow F'' = f''(x; y)$$

- 1) плоская форма в плоскую

$$\diamond \leftrightarrow \diamond$$

- 2) криволинейная форма в криволинейную

$$\cap \leftrightarrow \cap$$

- 3) криволинейная форма в плоскую

$$\cap \leftrightarrow \diamond$$

### V. Двумерная форма в трехмерную и обратно:

$$F' = f'(x; y) \leftrightarrow F'' = f''(x; y; z)$$

- 1) плоская форма в пространственно-линейную

$$\diamond \leftrightarrow \int$$

- 2) плоская форма в оболочечную

$$\diamond \leftrightarrow \star$$

- 3) плоская форма в объемную

$$\diamond \leftrightarrow \square$$

- 4) криволинейная форма в пространственно-криволинейную

$$\cap \leftrightarrow \int$$

- 5) криволинейная форма в объемную

$$\cap \leftrightarrow \square$$

### VI. Трехмерная форма в трехмерную и обратно:

$$F' = f'(x; y; z) \leftrightarrow F'' = f''(x; y; z)$$

- 1) пространственно-криволинейная форма в оболочечную

Э. В. МЕДЗ.МАРИНИВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ *◇* ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

- $f \leftrightarrow \star$
- 2) пространственно-криволинейная форма в объемную  
 $f \leftrightarrow \square$
- 3) пространственно-криволинейная форма в пространственно-криволинейную  
 $f \leftrightarrow f$
- 4) оболочечная форма в оболочечную  
 $\star \leftrightarrow \star$
- 5) оболочечная форма в объемную  
 $\star \leftrightarrow \square$
- 6) объемная форма в объемную  
 $\square \leftrightarrow \square$

Из рассмотренных групп комбинаций следует, что, с точки зрения общей геометрии форм, при их образовании возможны разнообразные переходы в отношении как размерности, так и типа (линейной, плоской, криволинейной, пространственно-криволинейной, оболочечной и объемной).

С обратными преобразованиями число возможных комбинаций достигает  $2! \times 2 = 42$ .

Если трансформируемые системы при преобразовании формы обладают свойством трансформироваться лишь в "одно направлении" (например, после трансформации линейной формы в объемную система не может обратно трансформироваться в линейную), такие системы называют "односторонне трансформируемыми". В других случаях они будут "двухсторонне трансформируемыми".

Символически "одностороннюю" и "двухстороннюю" трансформацию можно записать в следующем виде:

односторонняя:  $| \rightarrow \cap$

двухсторонняя:  $| \leftrightarrow \cap$

Системы, способные трансформироваться в одно направление (один) раз, будут называться "одноэтапными", а способные соответственно продолжать формообразование – "многоэтапными":

одноэтапные:  $| \rightarrow \cap$

многоэтапные:  $| \rightarrow \cap \rightarrow \star \rightarrow \square$

Если трансформируемая система односторонняя и одно-

этапная, это означает, что она одноразово-трансформируемая.

В других случаях такие системы будут многократно-трансформируемыми.

Если в многократно трансформируемых системах преобразование происходит лишь между двумя формами с последовательной очередностью возникновения каждой из них, такая система будет однотипно трансформируемой:



или

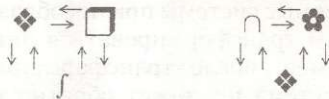


и т.д.

Если же преобразования обуславливают возникновение разных форм, система будет многотипно трансформируемой:



Если в одном случае порядок возникновения каждой конкретной формы многотипно трансформируемой системы не зависит от последовательности образования других форм, система называется произвольно трансформируемой:



Если же порядок возникновения каждой конкретной формы зависит от последовательности образования других конкретных форм, система будет произвольно трансформируемой:



Если последовательность возникновения определенных форм периодически повторяется, система будет периодически трансформируемой:



Э. В. МЕДЗМАРЦАНЬШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

## 5 Основные параметры трансформируемых систем

Независимо от типа формы – линейной, плоской или объемной – в реальных условиях трансформируемая система имеет три измерения и представляется в виде трехмерного тела, состоящего из множества взаимосвязанных элементов со своей областью определения  $F(x;y;z)$ . Область определения характеризует собственную геометрию каждой системы и занимает определенный объем в пространстве – объем определения  $V_{\text{опр.}}$ . Объем определения не учитывает никаких пустот и проемов в системе, т. е. является суммарным объемом материальной части элементов, связей и других составных частей трансформируемой конструкции.

Для трансформируемых систем особое значение имеет объем габаритной упаковки  $V_{\text{г.у.}}$ , т.е. тот минимальный объем, в котором она помещается.

В пространстве объем габаритной упаковки описывается ее поверхностью  $S_{\text{упак.}}$ , которая из всех возможных поверхностей, примыкающих к выступам и поверхностям самой трансформируемой системы и отделяющих ее от пространства, имеет минимальную площадь.

В объем габаритной упаковки входит и объем сквозных и внутренних проемов.

Габаритами трансформируемой системы называют длину ребер  $\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z$  правильной четырехугольной призмы с минимальным для призмы объемом, в которую помещается трансформируемая система, плотно примыкающая к ребрам и граням без выступа.

Область определения  $F(x;y;z)$ , объем габаритной упаковки  $V_{\text{г.у.}}$  и габариты  $\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z$  являются основными геометрическими параметрами трансформируемой системы. Именно от них зависят другие ее характеристики, играющие также важную роль для оценки каждой системы.

Часто достоинством трансформируемой системы считается высокая степень плотности ее упаковки  $\rho_{\text{п.у.}}$ , которая определяется отношением объемов области определения и габаритной упаковки:

$$\rho_{\text{п.у.}} = \frac{V_{\text{опр.}}}{V_{\text{г.у.}}} \leq 1$$

Более усовершенствованные конструктивные системы почти всегда отличаются тенденцией нарастания коэффициента плотности упаковки.

В стадиях трансформации при каждой конкретной форме системы постоянным остается объем области определения  $V_{\text{опр.}} = \text{const}$ , остальные же параметры объема габаритной упаковки и сами габариты могут меняться или оставаться постоянными. Но во всех случаях, как правило, будет меняться область определения системы, так как из комбинаций расположения одних и тех же элементов происходит преобразование одного множества в другое, т.е. изменение области определения множества.

Изменением габаритов  $\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z$  считается и тот случай, когда в каждом из них меняется хотя бы один параметр. Перегруппировка же их значений не будет означать, что габариты изменились. Например, рассмотрим систему, габариты которой  $\Gamma_x=5, \Gamma_y=6, \Gamma_z=7$ . Если после трансформации они примут соответственно значения 7, 6 и 5, будем считать, что система сохранила свои габариты.

Рассмотрим параметры  $F(x;y;z), V_{\text{опр.}}, V_{\Gamma.y.}$  и  $\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z$ . С учетом вышеизложенного, трансформации будут соответствовать следующие состояния процессов:

1.  $F(x;y;z) \sim V_{\text{опр.}} \sim V_{\Gamma.y.} \sim (\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z) \sim$
2.  $F(x;y;z) \sim V_{\text{опр.}} \sim V_{\Gamma.y.} \sim (\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z) \sim$
3.  $F(x;y;z) \sim V_{\text{опр.}} \sim V_{\Gamma.y.} \sim (\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z) \sim$
4.  $F(x;y;z) \sim V_{\text{опр.}} \sim V_{\Gamma.y.} \sim (\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z) \sim$

Проанализируем каждый случай в отдельности.

1.  $F(x;y;z) \sim V_{\text{опр.}} \sim V_{\Gamma.y.} \sim (\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z) \sim$

Множество элементов трансформируемой системы имеет область определения  $F_1(x;y;z)$  и образует при этом определенную форму с характерными точками  $A_1(X_{A_1}; Y_{A_1}; Z_{A_1}), B_1(X_{B_1}; Y_{B_1}; Z_{B_1}), C_1(X_{C_1}; Y_{C_1}; Z_{C_1}), D_1(X_{D_1}; Y_{D_1}; Z_{D_1})$ , (рис. 2.19,а).

После трансформации множество  $F_1(X_1; Y_1; Z_1)$  преобразовалось в другое множество  $F_2(X_2; Y_2; Z_2)$ , которое стало определителем формы (рис. 2.19,б). При этом, расположение точки  $O(X; Y; Z)$  в пространстве сохранилось, все характерные точки изменили свое взаиморасположение и приняли координаты  $A_2(X_{A_2}; Y_{A_2}; Z_{A_2}), B_2(X_{B_2}; Y_{B_2}; Z_{B_2}), C_2(X_{C_2}; Y_{C_2}; Z_{C_2}), D_2(X_{D_2}; Y_{D_2}; Z_{D_2})$ .

Э.В. МЕДВЕДЕВИЧУКИМ ✦ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

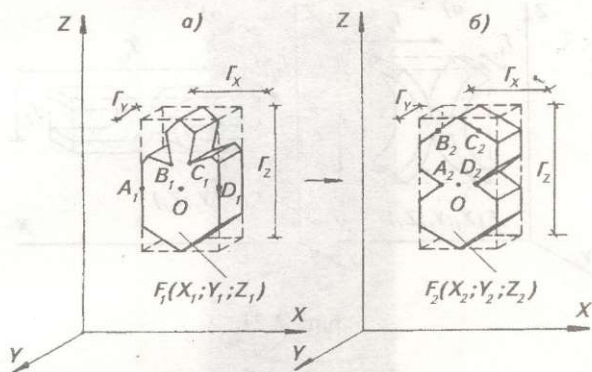


рис. 2.19

Как видно из рис.2.19, объем габаритной упаковки и габариты остались неизменными, т.е.  $V_{г.у.}^-$  и  $(\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z)^-$ .

$$2. F(x;y;z) \sim V_{опр.}^- \quad V_{г.у.} \sim (\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z)^-$$

Пример такой трансформации показан на рис.2.20.

При сохранении в пространстве расположения точки  $O(X;Y;Z)$  габариты  $\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z$  остались неизменными. Изменился только объем габаритной упаковки, т.е.  $V_{г.у.} \sim$  и  $(\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z)^-$ .

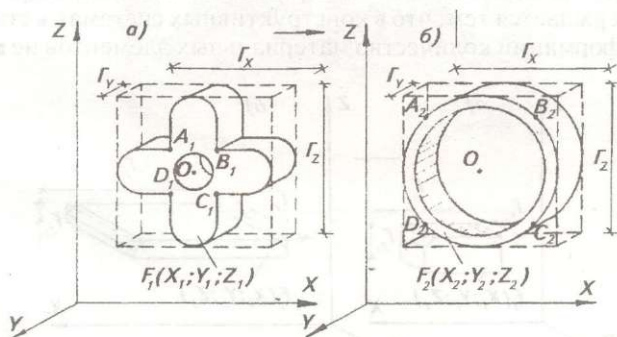


рис. 2.20

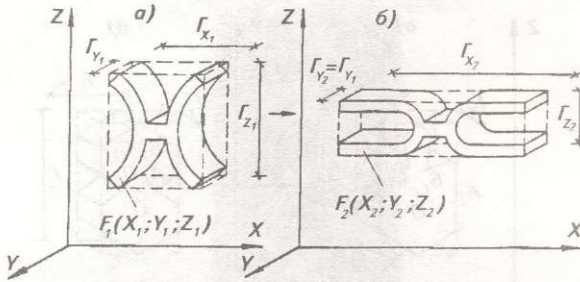


рис. 2.21

$$3. F(x;y;z) \sim V_{\text{опр.}} \sim V_{\text{г.у.}} \sim (\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z) \sim$$

Пример такой трансформации показан на рис.2.21.

Как видно, сохранился постоянным объем габаритной упаковки, изменились только габариты:

$$\Gamma_{X_1}; \Gamma_{Y_1}; \Gamma_{Z_1} \rightarrow \Gamma_{X_2}; \Gamma_{Y_2}; \Gamma_{Z_2}$$

т.е.  $V_{\text{г.у.}} \sim (\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z) \sim$ .

$$4. F(x;y;z) \sim V_{\text{опр.}} \sim V_{\text{г.у.}} \sim (\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z) \sim$$

Условия изменения объема габаритной упаковки  $V_{\text{г.у.}}$  и габаритов  $\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z$  соблюдаются в примере трансформации системы, показанной на рис.2.22.

Во всех четырех рассмотренных комбинациях сохранение неизменного объема области определения системы  $V_{\text{опр.}} = \text{const}$  подтверждается тем, что в конструктивных системах в стадиях трансформации количество материальных элементов не меня-

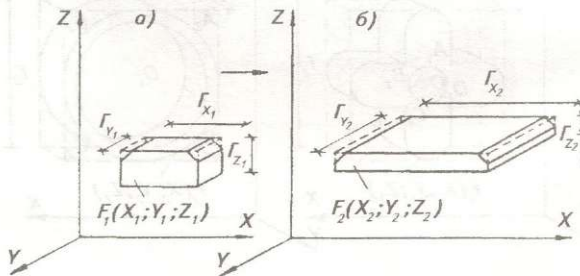


рис. 2.22



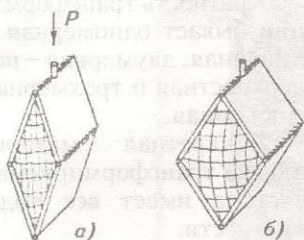


рис. 2.23

ется, так как система остается целостной.

Такое утверждение всегда остается в силе, если при рассмотрении конструкции на уровне молекулярных связей деформация материала будет объясняться удлинением или укорочением длины связей. Такая идеализация соответствует именно основной схеме трансформируемых систем, состоящих из материальных веществ элементов и связей.

Это суждение может оспариваться примерами многих трансформируемых систем, однако достоверность его всегда подтверждается тщательным анализом процесса.

Рассмотрим пример герметичной трансформируемой системы, состоящей из плоских четырех граней и прикрепленной к ним с двух сторон эластичной оболочкой (рис.2.23,а).

Вначале может показаться, что объем области определения пустотелой герметичной системы до наполнения газом был меньше, чем после наполнения (рис.2.23,б). Между тем это не так. Газ здесь представляет другую систему, не являющуюся составным элементом трансформируемой системы. Поэтому, объем материальной части, т.е. области определения до и после трансформации, остается постоянным.

Трансформация системы характеризуется величиной трансформации –  $V_{тр.}$ , представляющей разность объемов габаритной упаковки вторичной и первичной формы трансформируемой системы:

$$V_{тр.} = V''_{г.у.} - V'_{г.у.}$$

В процессах трансформации она может быть больше, меньше нуля или равна ему:

$$0 < V_{тр.} \leq 0$$

Трансформация системы при  $0 < V_{тр.} \leq 0$  легко осмысливается, однако случай  $V_{тр.} = 0$  требует некоторого разъяснения.

Если объем, в которой помещаются системы с учетом ее внутренних и сквозных проемов при трансформации не меняется, будем иметь  $V_{тр.} = 0$  (рис.2.24).

Именно тогда  $V_{тр.} = V''_{г.у.} - V'_{г.у.} = 0$ .

Важным параметром трансформации является ее кратность.

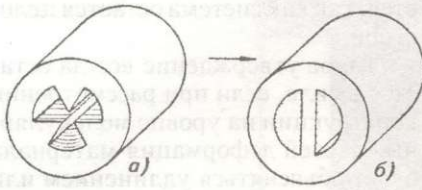


рис. 2.24

Кратность трансформации бывает одномерная – линейная, двумерная – поверхностная и трехмерная – объемная.

Конкретная материальная трансформируемая система имеет все виды кратности.

Одномерная – линейная кратность трансформации –  $n_{л}$  обозначает отношение габаритов объема упаковки вторичной формы  $\Gamma_{x''}, \Gamma_{y''}, \Gamma_{z''}$  к таковым габаритам первичной формы  $\Gamma_{x'}, \Gamma_{y'}, \Gamma_{z}'$ .

$$n_{л}^x = \frac{\Gamma''_x}{\Gamma'_x}; \quad n_{л}^y = \frac{\Gamma''_y}{\Gamma'_y}; \quad n_{л}^z = \frac{\Gamma''_z}{\Gamma'_z}$$

Двумерная – поверхностная кратность трансформации –  $n_{п}$  обозначает отношение описывающей поверхности объема габаритной упаковки вторичной формы  $S_{уп.}''$  к таковой первичной формы  $S_{уп.}'$ :

$$n_{п} = \frac{S''_{уп.}}{S'_{уп.}}$$

Трехмерная – объемная кратность трансформации –  $n_{об.}$  обозначает отношение объема габаритной упаковки вторичной формы  $V_{г.у.}''$  к таковому первичной формы  $V_{г.у.}'$ :

$$n_{об.} = \frac{V''_{г.у.}}{V'_{г.у.}}$$

Для оценки степени трансформации системы в зависимости от того, на какое значение может изменяться единица длины, площади или объема, введем степень кратности  $n^{степ.}$ , которая также может быть степенью линейной  $n_{л}^{степ.}$ , поверхностной  $n_{п}^{степ.}$  и объемной  $n_{об.}^{степ.}$  кратностей трансформации системы.

Они выразатся следующими формулами:

$$n_{л}^{X, степ.} = \frac{\Gamma''_x - \Gamma'_x}{\Gamma'_x}$$

$$n_{л}^{Y, степ.} = \frac{\Gamma''_y - \Gamma'_y}{\Gamma'_y}$$

Э. В. МЕДВЕДЕВА И ДРУГИЕ. ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

$$n_{л}^{z, \text{степ.}} = \frac{\Gamma'z - \Gamma'z}{\Gamma'z}$$

$$n_{п}^{\text{степ.}} = \frac{S'_{п} - S_{п}}{S_{п}}$$

$$n_{об.}^{\text{степ.}} = \frac{V'_{об.} - V_{об.}}{V_{об.}}$$

Трансформация системы как формообразования множества взаимосвязанных материальных элементов происходит в пространстве и во времени.

Время трансформации  $t_{тр.}$  – это промежуток времени от первых признаков преобразования области определения первичной формы до момента возникновения такой вторичной формы. Как первичная, так и вторичная и последующие формы трансформируемых систем является их фиксированными формами.

Особое практическое значение имеют массовые характеристики трансформируемых систем. Как и в других системах, в последних остается в силе критерий приведенной массы на единицу погонной длины приведенной массы на единицу площади и на единицу объема.

Для определения приведенной массы на единицу длины масса системы делится на длину максимального габарита:

$$g_l = \frac{G}{L_{max}}$$

Приведенная масса на единицу площади определяется делением массы на описывающую поверхность габаритной упаковки:

$$g_s = \frac{G}{S_{уп.}}$$

Приведенная масса на единицу объема определяется делением массы на объем габаритной упаковки:

$$g_v = \frac{G}{V_{г.у.}}$$

Множество элементов трансформируемой системы имеют теоретический центр тяжести, при определении которого, в отличие от реального, не учитывается разность соответствующих объемистых масс конструктивного материала, из которого построена каждая конкретная система.

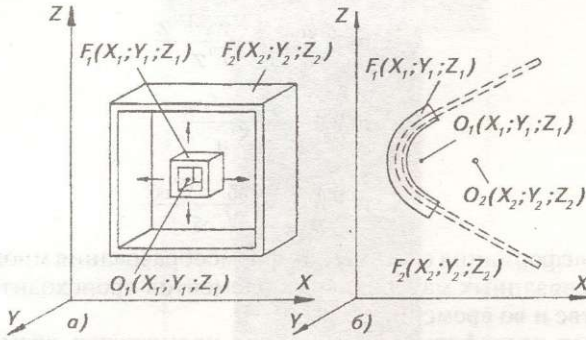


рис. 2.25

В процессе трансформации без учета переносного движения всей системы, обусловленного не трансформацией, а только взаимоперераспределением элементов системы, центр тяжести в пространстве может остаться неподвижным или передвигаться (рис.2.25).

В первом случае (рис.2.25,а) центр тяжести  $O_1(X_1; Y_1; Z_1)$  первичной формы с областью определения  $F_1(X_1; Y_1; Z_1)$  является таковыми и вторичной формы трансформируемой системы с областью определения  $F_2(X_2; Y_2; Z_2)$ , т.е. в процессе трансформации он не передвигается. Такая трансформация будет ненаправленной.

Во втором случае (рис.2.25,б) центр тяжести первичной формы системы, расположенный в точке  $O_1(X_1; Y_1; Z_1)$ , после

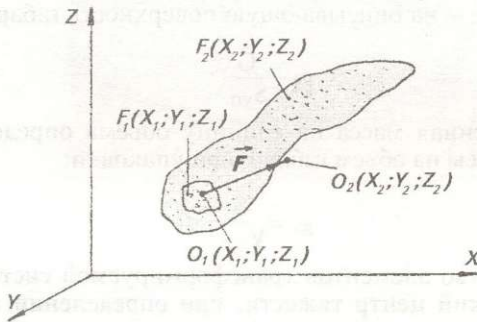


рис. 2.26

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУКИ И А. В. ПЕТРОВИЧУКИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

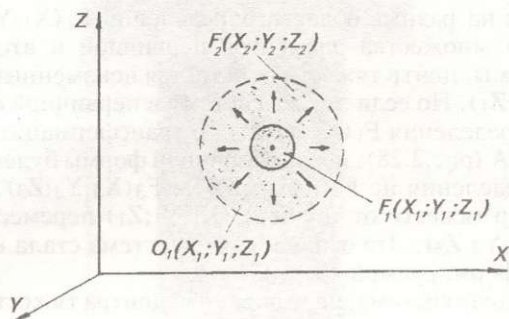


рис. 2.27

трансформации во вторичную форму смещается в точку  $O_2(X_2; Y_2; Z_2)$ .

Соответственно и трансформация будет направленной.

Вектор  $\vec{F}$ , направленный из центра тяжести первичной формы трансформируемой системы к центру тяжести вторичной формы, без учета переносного движения всей системы в пространстве, называется “направлением трансформации”, а сама система – “направленно трансформируемой” (рис.2.26).

Направленно трансформируемые системы сами по себе могут быть собственно направленными и собственно ненаправленными.

Рассмотрим ненаправленную трансформируемую систему (рис.2.27), свободно, без закрепления расположенную в пространстве.

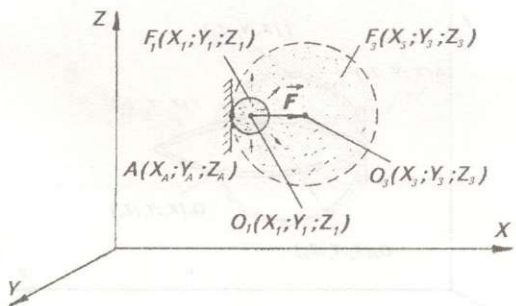


рис. 2.28

Несмотря на разные области определения  $F_1(X_1; Y_1; Z_1)$  и  $F_2(X_2; Y_2; Z_2)$  множества элементов первичной и вторичной формы системы, центр тяжести ее остается неизменным в точке  $O_1(X_1; Y_1; Z_1)$ . Но если эту же систему в первичной форме с областью определения  $F_1(X_1; Y_1; Z_1)$  до трансформации закрепить в точке  $A$  (рис. 2.28), после вторичной формы будем иметь область определения не  $F_2(X_2; Y_2; Z_2)$ , а  $F_3(X_3; Y_3; Z_3)$ , и, тем самым, центр тяжести от точки  $O_1(X_1; Y_1; Z_1)$  переместится в точку  $O_3(X_3; Y_3; Z_3)$ . Это означает, что система стала направленно трансформируемой.

Именно такая система, передвижение центра тяжести которой обусловлено переносным движением системы вследствие трансформации, несмотря на ненаправленность самого процесса, называется собственноравнонаправленной.

Подобные системы тогда становятся направленными, когда их закрепят в такой точке неподвижной базы, координаты которой не совпадают с координатами центра тяжести системы, или в такой точке, которая не меняет своего расположения в пространстве при трансформации. (рис. 2.29).

Картина собственно направленных трансформируемых систем более четкая (рис. 2.30). Критерием оценки таких систем служит то, что при фиксации из центра тяжести первичной формы в процессе трансформации возникновения вторичной формы сопровождается переносным движением всей системы в пространстве.

Направленность можно рассмотреть как в целом для системы, так и для ее отдельных фрагментов. В зависимости от этого различают общую  $\vec{F}$  и фрагментальную  $\vec{F}^{Фр}$  направленности.

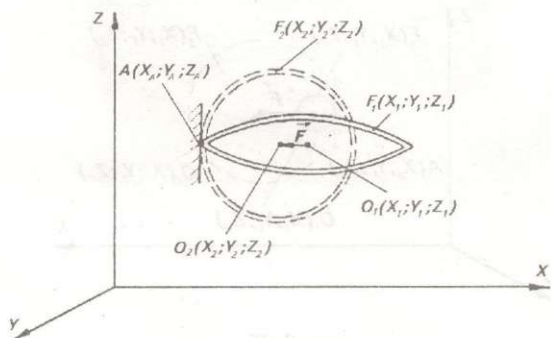


рис. 2.29

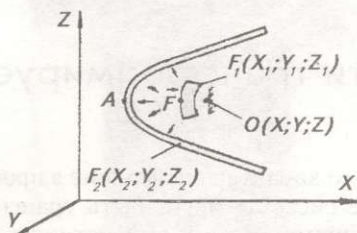


рис. 2.30

Общая направленность – это сумма векторов фрагментальных направленностей:

$$\vec{F} = \vec{F}_1^{\text{Фр.}} + \vec{F}_2^{\text{Фр.}} + \dots + \vec{F}_n^{\text{Фр.}}$$

Если система ненаправленна ( $\vec{F} = 0$ ), в ней всегда найдутся фрагментальные направленности, отличающиеся от нуля ( $\vec{F}^{\text{Фр.}} \neq 0$ ).

В зависимости от перемещения центра тяжести различают симметричную и несимметричную трансформацию.

Когда центр тяжести вторичной формы остается на линии симметрии первичной формы, трансформацию называют “симметричной”, а систему, способную трансформироваться симметрично – “симметрично трансформируемой”. В других случаях имеем несимметричные системы с несимметричными процессами трансформации.

При трансформации форм преобразования разных фрагментов может происходить с разными скоростями. Однако скорость трансформации целой системы характеризуется приведенной скоростью трансформации

$$V_{\text{тр.}}^{\text{пр.}} = \frac{|\vec{F}|}{t_{\text{тр.}}}$$

где  $|\vec{F}|$  – направленность, а  $t_{\text{тр.}}$  – скорость трансформации.

Системы, в которых в рамках каких-то закономерностей направления скорости трансформации фрагментов равны между собой, называются “равноскоростными”. В обратном случае они будут “разноскоростными”.

В конкретных конструктивных системах разноскоростная трансформация обуславливает своеобразное перераспределение силовых факторов.

## 6

## Разновидности трансформируемых систем

С точки зрения общего характера поведения в пространстве, трансформируемые системы могут быть транспортбельными, мобильными, динамическими, статистическими, сборно-трансформируемыми и трансформируемо-сборными. Рассмотрим каждый случай в отдельности.

Если объем габаритной упаковки какой-то фиксированной формы трансформируемой системы  $V_{г.у.}$ , габариты  $G_x, G_y, G_z$  и масса  $G$  обуславливают возможность ее передвижения – система транспортбельна.

Если максимальный объем габаритной упаковки и габариты одной из всех фиксированных форм системы обуславливают ее транспортировку – система мобильна.

Например, если сложенный пакет развернутой конструкции транспортируется, – система транспортбельна, если же развернутая конструкция передвигается, – система мобильна.

Если после трансформации вторичная форма множества систем способна маневрировать на месте, сохраняя при этом определенную степень привязки к местности (рис.2.31), то в отличие от мобильных, они являются динамическими. Динамическими будут и такие системы, составные части вторичной формы которых перемещаются одна относительно другой (рис.2.32).

В других случаях они считаются статистическими.

Особое внимание надо обратить на сущность отличия сборно-трансформируемых от трансформируемо-сборных систем.

Если в стадии формообразования вначале отдельные пер-

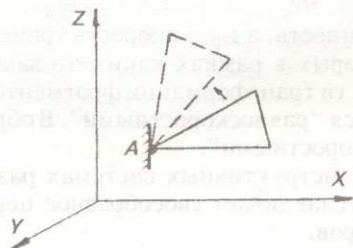


рис. 2.31



Э. В. МЕДЗМАРЦАНЬШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

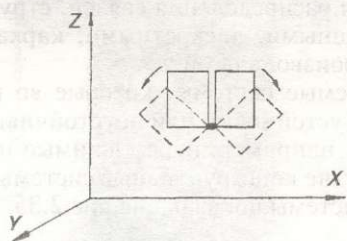


рис. 2.32

вичные, т.н. составные трансформируемые формы собираются в одну единую, а затем происходит трансформация, такая система будет сборно-трансформируемой (рис.2.33).

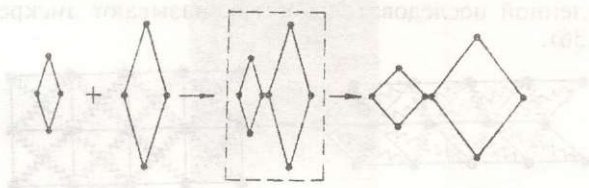


рис. 2.33

Если же вначале происходит трансформация отдельных систем, а затем их вторичные формы собираются в единую, система будет трансформируемо-сборной (рис.2.34).

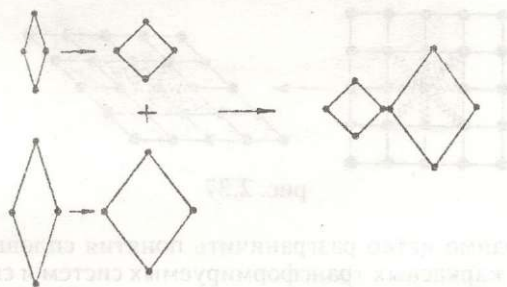


рис. 2.34

С точки зрения распределения связей, структуры системы могут быть: сплошными, дискретными, каркасными (сгруппированными), произвольными.

Трансформируемые системы, которые во всех направлениях имеют лишь устойчивые или неустойчивые связи, называют сплошными, например: нерастяжимые пленки, велосипедные цепи и другие конструктивные системы.

Схема такой системы показана на рис.2.35.

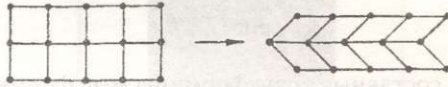


рис. 2.35

Трансформируемые системы, в которых во всех направлениях устойчивые и неустойчивые связи расположены с определенной последовательностью, называют дискретными (рис.2.36).

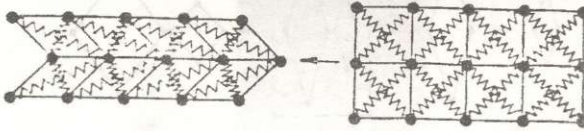


рис. 2.36

В таких взаимосвязях устойчивых и неустойчивых связей, когда в трансформируемой системе образуются сплошные группировки или каркасы устойчивых и неустойчивых связей, имеем каркасную трансформируемую систему (рис.2.37).

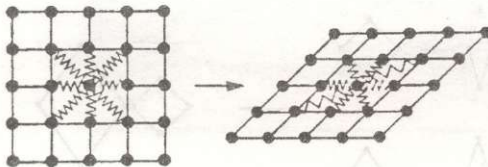


рис. 2.37

Необходимо четко разграничить понятия сплошных, дискретных и каркасных трансформируемых систем и сплошных, дискретных и каркасных сред и конструкций. Отмеченные названия не определяют конструктивных особенностей транс-

Э. В. МЕДЗМАРЬАНЬВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДВЕДЕВА И ДРУГИЕ. ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

формируемых систем, так как даже сквозная конструкция такой системы может быть сплошной трансформируемой. Такая же постановка лежит в основе определения однородных и неоднородных, изотропных и анизотропных трансформируемых систем.

Если в трансформируемой системе во всех направлениях имеются только одинаковые виды устойчивых и неустойчивых связей, она называется "однородной". В противном случае, она будет "неоднородной".

В разных направлениях система может обладать способностью качественно одинаково или по-разному трансформироваться. В первом случае она будет изотропной, во втором — анизотропной.

Здесь же надо отметить, что система одновременно может трансформироваться лишь в одном, в двух, в трех или в нескольких направлениях. В соответствии с этим различают односторонне, двусторонне, трехсторонне или многосторонне направленные трансформируемые системы.

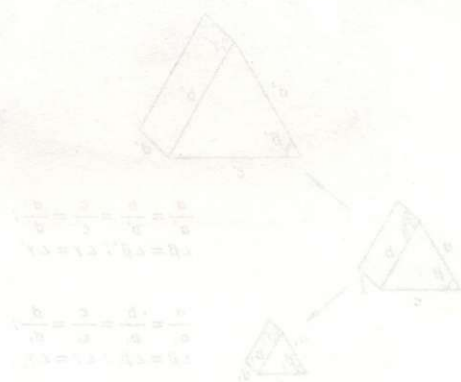


рис. 2.38

## 7 Типы и виды трансформации формы

Несмотря на все разнообразие процессов трансформации и формообразования, общие принципы их классификации по типам и видам едины.

Различают органический и неорганический тип трансформации формы.

В первом случае трансформация происходит лишь за счет взаимоперемещения элементов внутреннего строения конструктивных материалов. Например: формоизменение растянутых резин, надувных нерастяжимых и растяжимых баллонов пленки, изгиб упругих пластин. Такие системы называют органически трансформируемыми.

Во втором случае, т.е. при неорганическом типе, трансформация происходит вследствие взаимоперемещения элементов, которые сами являются деталями конструктивной системы, и их собственные деформации из-за внутреннего строения не учитываются. Пример такого типа – шарнирные механизмы разных видов. Соответственно и системы называют неорганическими.

В реальных условиях встречаются как органические и неорганические, так и смешанные типы трансформации формы, когда процесс содержит оба типа вместе.

Рассмотрим типы трансформируемых систем.

В процессе трансформации может наблюдаться случай, когда в относительном понятии форма не меняется, а происходит

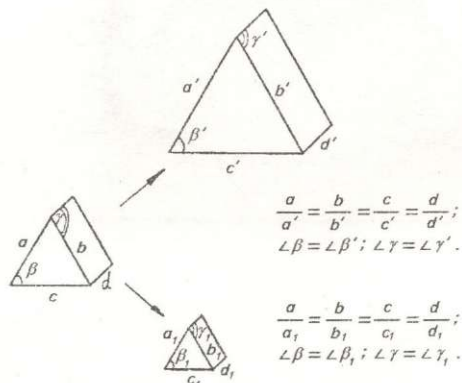


рис. 2.38

Э. В. МЕДЗМАРИАШВИЛИ ✦ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

масштабное, пропорциональное ее нарастание или уменьшение (рис. 2.38).

Такой процесс может быть обусловлен органической трансформацией.

Масштабно-пропорциональное изменение формы вследствие органической трансформации считается внутренним ее видом.

Во всех остальных случаях, независимо от типа и оттого, как распространяется формообразование – на всю систему в целом или на ее внутреннюю или периферийную части – будем иметь наружный вид трансформации.

Каждый вид трансформации имеет свою форму.

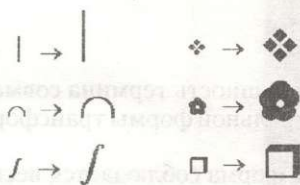


рис. 2.39

При внутренней трансформации могут масштабно меняться линейные, плоскостные, поверхностные и объемные системы (рис. 2.39).

В соответствии с этим, формы внутреннего вида трансформаций могут быть: 1) линейные; 2) плоско-поверхностные; 3) объемные (массивные).

При наружных видах трансформации формы основным фактором является поведение в пространстве множества элементов, образующих очертание системы, т.е. ее фигуру.

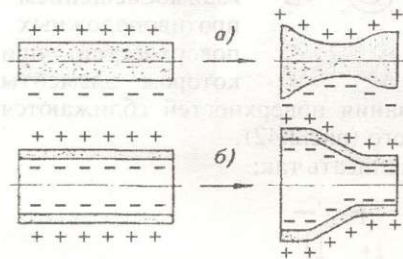


рис. 2.40

По направлению трансформации всегда найдется такое активное множество элементов, которые будут размещаться не на нейтральных осях происходящих процессов, а на противоположных, внутренних или наружных сторонах и описывать очертаение фигуры (рис. 2.40).

Обозначим противоположные точки, являющиеся элементами множества, и соответственно наружные и внутренние точки пустотелых форм знаками “плюс” и “минус” (рис. 2.40, а, б).

Все эти формы опираются на три основные формы наружной трансформации: спиральную, складчатую и слоевинтовую.

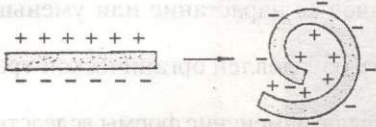
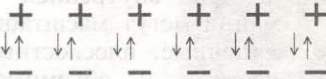


рис. 2.41

1. Спиральная форма (продольно совмещенная) определяется взаимосближением или расхождением по всей длине системы элементов множества “противоположных поверхностей” (рис.2.41).

Если продолжить спиральную намотку, район сближения охватит всю длину трансформируемой системы.

Символически спиральную форму можно записать в виде:



из которого наглядно усматривается сущность термина совмещения, являющегося синонимом спиральной формы трансформации.

В реальных условиях спиральная форма соблюдается весьма часто. Именно к такому виду относятся наматываемые конструкции.

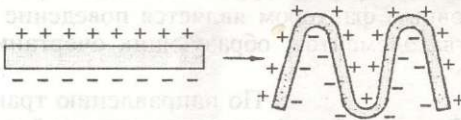
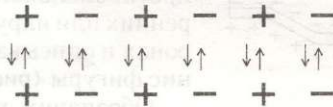


рис. 2.42

2. Складчатая форма (поперечное совмещение) определяется таким взаимосмещением противоположных поверхностей, при котором элементы

множества одного наименования поверхностей сближаются или отдаляются один от другого (рис.2.42).

Символически ее можно записать так:



Как видно из схемы, совмещение происходит поперечно направлению трансформации, т.е. плюсовые и минусовые элементы группируются поперечно.

Способность огромного количества трансформируемых конструкций складываться обусловлена поперечным совмещением, т.е. складчатой формой трансформации.

Э.В. МЕДВЕДЕВА И В.А. ПЕТУХОВ. МЕДИЦИНСКИЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

3. Слоисто-винтовая форма (крестообразное совмещение) определяется прерывистым сближением или отдалением элементов множества противлежащих или внутренних и наружных поверхностей.

Здесь необходимо рассматривать два типа систем, которые имеют противоположные (см. рис.2.40,а), или внутренние и наружные поверхности (см. рис.2.40,б).

Для первого типа схема слоисто-винтовой формы трансформации может быть представлена в виде (рис.2.43).

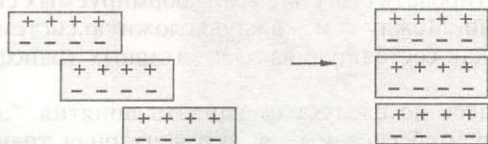


рис. 2.43

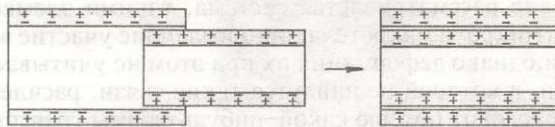


рис. 2.44

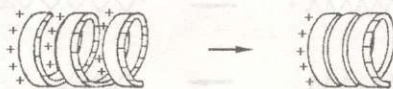


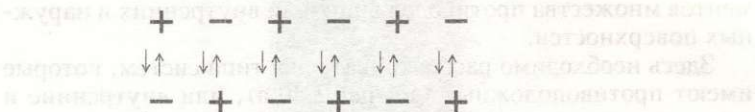
рис. 2.45

Для второго типа аналогичная схема представлена так (рис.2.44, 2.45):

Несмотря на определенное разнообразие, основной принцип трансформации как для первого, так и для второго типов слоисто-винтовой формы одинаков.

Трансформируемым системам (рис.2.44, 2.45) по всей схеме соответствуют телескопически складываемые конструкции, которые можно построить как из прерывистых частей (рис.2.44), так и из цельных винтообразных систем (рис.2.45).

Слоисто-винтовую форму символически можно представить так:



Как видно из схематического изображения, в основе такой трансформации лежит крестообразное совмещение поверхностей.

Интерпретировать строение трансформируемых систем довольно сложно. Между тем, каждую сложную систему можно представить как состоящую из элементарных трансформируемых систем.

Однако здесь не следует смешивать понятия “элементы трансформируемой системы” и “элементарная трансформируемая система”, между ними большая разница.

Элементарная трансформируемая система сама включает в себя взаимосвязанные элементы. В зависимости от того, на каком уровне рассматривается система, такими элементами могут быть микро- и макротела, принимающие участие в трансформации, однако деформация их при этом не учитывается.

Система, в которой не найдутся такие связи, расчленение которых обусловит потерю какой-нибудь формы трансформации, называется элементарной трансформируемой системой.

Пример такой системы – обыкновенная упругая пружина (рис.2.46).



рис. 2.46

На элементарную трансформируемую систему как на целостную единицу распространяются все отмеченные выше закономерности в отношении как однородности и неоднородности, изотропности и анизотропности, так и других свойств.

Если трансформация содержит несколько форм, она является составной (рис.2.47):

При этом форма трансформации отдельных участков таких систем разная. Но в реальных условиях часто соблюдается более сложный вид формы трансформации – ярусный – когда

Э.В. МЕДЗМАРЦАНЯНИ  $\diamond$  ЛЕГКОТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ





рис. 2.47



рис. 2.48

одна форма уже содержит в себе другую (рис.2.48).

На рис.2.49 показана ярусная форма трансформации. Первым ярусом считается складчатая, а вторым – спиральная форма.

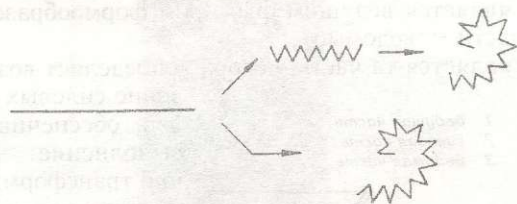
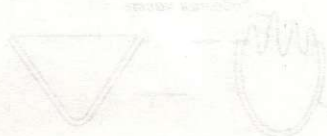


рис. 2.49

Таким образом, можно сказать, что форма трансформации может быть одноярусной и многоярусной, причем процесс может проходить отдельно по каждому ярусу или одновременно по всем ярусам.



8

Динамическая структура трансформируемых систем

С точки зрения динамического анализа, трансформируемые конструктивные системы состоят из ведущих, ведомых и силовых частей. Трансформируемая часть, имеющая структуру с меньшей степенью, называется "ведущей", так как она в основном и является ведущим фактором формообразования. Остальные части – "ведомые".

Силовой является та часть, которая определяет возникновение силовых факторов, обеспечивающих выполнение работы при трансформации, а иногда и усилий в элементах в фиксированной форме.

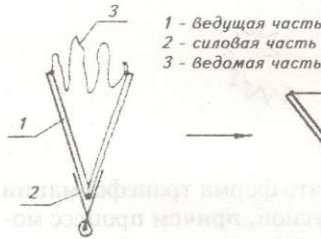


рис. 2.50



рис. 2.51



рис. 2.52

Пример трансформируемой системы, состоящей из основных трех частей, иллюстрируется на рис.2.50.

Система из двух стержней является ведущей, при этом одни концы стержней шарнирно соединены между собой, а другие связаны тросом, который представляет собой ведомую часть.

Вся эта система трансформируется силовой частью с помощью пружины кручения.

С точки зрения

Э.В. МЕДЗМАРШАВИЦАМИ ♦ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

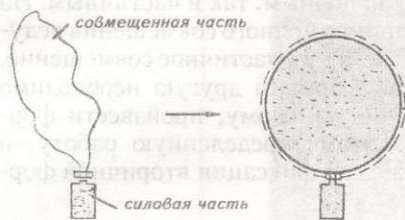


рис. 2.53

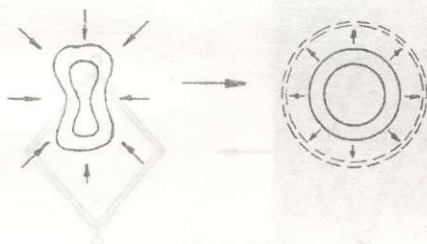


рис. 2.54

ния – надувной эластично-упругий шар (рис.2.53).

В трансформируемых системах необязательно одновременное существование ведомых и ведущих частей.

Иногда все три части совмещаются одновременно в единую, как, например, при трансформации резинового тора (рис.2.54).

На этом рисунке непрерывными линиями показана трансформация, обусловленная ведущей долей системы, а прерывистыми – нарастание торца за счет ведомой доли. В целом форма возникает от действия упругих сил, яв-

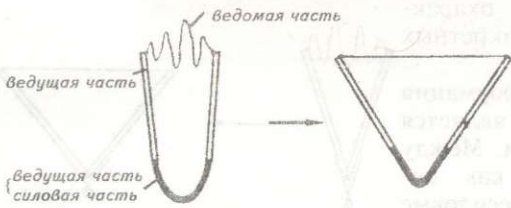


рис. 2.55

технического решения, стационарные силовые части могут быть съемными или несъемными, однако это не меняет сущности определения силовых частей в общем.

Наряду с понятиями “стационарная” и “несовмещенная”, приняты также понятия “совмещенная” и “несовмещенная” силовые части.

Когда силовая часть представлена в виде ведущей (рис.2.51) – как упругие стержни – или ведомой (рис.2.52) – как упругая пружина – она считается совмещенной.

Часто наблюдается совмещение ведущих и ведомых частей, т.е. имеем совмещенную систему. Пример такого совмеще-

ляющихся силовой долей единой системы.

Совмещение может быть как полным, так и частичным. На рис. 2.51 проиллюстрирован пример полного совмещения ведущей части с силовой, а на рис. 2.55 – их частичное совмещение.

Для преобразования одной формы в другую необходимо вывести из равновесия первичную форму, произвести формоизменение, выполняя при этом определенную работу, и вновь привести ее в равновесие для фиксации вторичной формы.

Фиксация вторичной формы обеспечивается внутренним самоуравновешиванием системы силовых факторов или добавочными фиксаторами.

Работа по трансформации системы связана с энергетическими ресурсами. Они могут быть аккумулированы в силовой части или, при надобности, подключены к ней. Исходя из этого, различают энергоаккумулированные и энергоподключенные силовые части.

В особых случаях, если для силовой части требуется преобразование потребляемых энергоресурсов, системы оснащаются энергопреобразующими машинами.

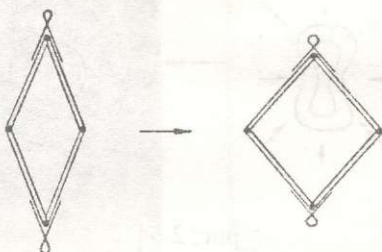


рис. 2.56

Трансформация системы – динамический процесс, при котором возникают инерционные силы, обуславливающие, особенно в конце трансформации, с одной стороны, динамический удар, а с другой, – накопление кинематической энергии и за счет этого – достаточную энергоемкость ситемы.

Эти особенности более подробно можно охарактеризовать на конкретных примерах.

Каждая трансформация по своей природе является силовым фактором. Между тем, различают как силовые, так и несиловые трансформации системы.

Если после трансформа-

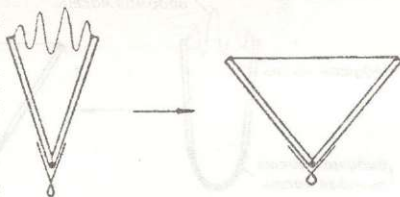


рис. 2.57

Э. В. МЕДЗМЯРИШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

ции в элементах системы отсутствуют все силовые факторы в виде изгиба, сжатия, растяжения и кручения, трансформацию называют "несиловой" (рис.2.56).

Если же после завершения процесса в элементах подобные силы остаются, трансформацию называют "силовой" (рис.2.57). В таких случаях трос растянут и стержни изогнуты.

## 9 Вопросы классификации трансформируемых систем

**В** последнее время в широком диапазоне ведутся работы по созданию и применению разных типов трансформируемых конструктивных систем. Уделяется все больше внимание их теоретическому анализу, в том числе и вопросам классификации.

Однако в части классификации основным недостатком является смещение органических вопросов возможностей формообразования и конструктивных признаков системы, что обуславливает определенное разногласие в вопросах о принятых вариантах классификации.

Классифицировать трансформируемые системы следует раздельно по трем основным направлениям:

- 1) по геометрическим признакам процессов формообразования;
- 2) по силовым системам развертывания;
- 3) по конструктивным признакам.

По сравнению с принятой классификацией статистических инженерных сооружений, в предложенной нами классификации первое и второе направления являются новыми. Суть этих направлений уже была рассмотрена.

В третьем направлении – классификации по конструктивным признакам – градация конструкций распространяется и на традиционные системы (ферменные, ребристые, комбинированные, пневмо-вантовые и др.) в зависимости от того, какую из них представляет собой трансформируемая система в функциональном, фиксированном положении.

Формообразование конструктивных систем с помощью трансформации должны удовлетворять тем особым требованиям, которые предъявляются к созданию новых форм практически везде – как на земле, так и в космическом пространстве.

К этим требованиям относятся:

1. Создание конструктивной формы в кратчайшие сроки.
2. Возможность быстрой передислокации конструктивной системы.

3. Возможность многократного использования конструктивной формы.
4. Разнообразие конструктивных форм.

Но даже при соблюдении этих требований формобразование трансформацией – процесс непростой, чем для формобразования формоустойчивых или формонеустойчивых конструкций, к которым, практически, относятся сборные или создаваемые, например, бетонированием конструкции.

Время, необходимое для создания трансформируемой системы, в зависимости от технического решения, иногда даже превышает время на изготовление аналогичных нетрансформируемых систем. При этом нередко требуется использование рабочей силы высокой квалификации, дорогостоящих материалов, сложных механизмов и оборудования. Однако аккумуляция труда и затрат происходит до старта трансформации, функционирование системы обуславливается либо процессом трансформации, либо транспортировкой, а затем – трансформацией готовой системы из заранее взаимосвязанных элементов.

При нетрансформируемых решениях по мере надобности изготавливаются или транспортируются на место доставки отдельные части, либо создается целая система, для чего требуется несравнимо больше времени.

С дальнейшим развитием науки и техники, освоением космоса, будут ставиться задачи создания инженерных конструкций в экстремальных условиях. Именно в этом направлении представляется перспективным широкое применение трансформируемых систем.

2/2

3. Возможность применения трансформируемых систем в космосе и на Земле.

4. Разнообразие форм трансформируемых систем.

Но даже при рассмотрении трансформируемых систем в космосе и на Земле, мы должны учитывать, что трансформируемые системы являются сложными системами, которые могут быть использованы в различных условиях. Например, трансформируемые системы могут быть использованы в космосе для создания искусственных систем, которые могут быть использованы для различных целей. Например, трансформируемые системы могут быть использованы для создания искусственных систем, которые могут быть использованы для различных целей.

При рассмотрении трансформируемых систем, мы должны учитывать, что трансформируемые системы являются сложными системами, которые могут быть использованы в различных условиях. Например, трансформируемые системы могут быть использованы в космосе для создания искусственных систем, которые могут быть использованы для различных целей.

Э.В. МЕДЗМАРИАШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



### 3

## Каркасно-опорные трансформируемые системы

### 1

## Общие принципы строения каркасно-опорных трансформируемых систем

Каркасно-опорными являются такие трансформируемые системы, в области трансформации которых определенные зоны структур имеют меньшую степень формообразования. Именно эти зоны будут называться опорным каркасом.

Такое определение обуславливает принадлежность к каркасно-опорным системам большого диапазона и множества схем трансформируемых конструкций [43].

Систему совместно с опорным каркасом создают дополнительные зоны, которые связываются с опорным каркасом с помощью контактных зон.

С самого начала надо определиться в том, что под каркасно-опорными трансформируемыми системами в прямом понятии не подразумеваются такие сооружения, которые по классификации строительных конструкций относятся к каркасным системам. Хотя каркасно-опорные трансформируемые системы во многих случаях после разворачивания трансформируемых систем в статическом положении представляют собой именно каркасные конструкции.

Как отмечалось, при анализе трансформируемых систем, все логические выводы характеризуют процессы трансформации системы, а не конструкции достигнутой статической формы, систематизация которых довольно всесторонне уже формулировалась по исследованиям традиционных конструкций.

Если структуры зон каркаса типичных каркасных конструкций в процессе разворачивания не имеют меньшей степени свободы формообразования, по сравнению с другими зонами, то эти каркасные конструкции не принадлежат к каркасно-опорным трансформируемым системам. Это служит для более четкого разграничения характеров каркасно-опорных транс-

формируемых систем от обыкновенных каркасных конструкций.

Каркасно-опорные трансформируемые системы обладают большой разнообразностью по геометрическим, кинематическим, силовым и энергетическим показателям.

В единой системе каркасы могут быть как ведомыми, так и ведущими элементами. После завершения формообразования они могут выполнять повышенные несущие функции, т.е., оставаясь каркасом, могут работать равносильно или с меньшей нагрузкой по сравнению с заполнительной зоной и могут даже не участвовать в работе, т.е. быть пассивными элементами или вообще сниматься от развернутой конструкции. Процесс трансформации каркаса, как и зоны заполнения, может быть первичным источником энерговыделения, но это не является обязательным и постоянным свойством отдельных зон. Вообще энергоносителем на определенном этапе формообразования с большой эффективностью могут быть структуры контактных зон, но об этом более подробно будет отмечено в дальнейшем.

Единственным постоянным признаком каркасных опор является их приоритет в процессе формообразования по обеспечению параметров "направленности трансформации" для достижения общей формы конструкции и управления процессами формообразования в целом.

Если формообразование происходит без соблюдения этих признаков, то зоны, элементы и конструкции, по своим внешним очертаниям претендующие на позиции опорных каркасов, не могут считаться ими. Они, в большинстве, представляют собой энергоносительные конструкции, имеющие общее очертание каркасов или систем, которые не в процессе трансформации, а после развертывания конструкции будут иметь функции каркасных опор.

Каркасно-опорные трансформируемые системы имеют разные формы силового и геометрического построения, которые свои разъяснения получают при оценке каркаса, зон заполнения и контактных зон как единой системы.

Исходя из этого каркасно-опорные трансформируемые системы бывают силовые, несиловые и комбинированной структуры.

Силовые каркасно-опорные трансформируемые системы подразумевают множество комбинаций структурного состояния разных зон конструкции. Но во всех случаях ее принцип заключается в том, что сохранение формы достигается за счет постоянного напряжения элементов опорных каркасов и зон заполнения, обусловленных равновесием силовых факторов в

контактной зоне.

В несиловых каркасно-опорных трансформируемых системах при отсутствии внешних возбуждений контактные зоны имеют нулевое нагружение. Вследствие этого элементы опорных каркасов и заполняющих зон не нагружены от постоянного силового взаимодействия. Если имеются признаки силовых каркасно-опорных трансформируемых систем, но при этом на определенном этапе нарастание сил преднапряжения происходит не за счет трансформации отдельного каркаса, зоны заполнения или продолжения процессов трансформации в обеих зонах, а за счет энергетики контактной зоны, то по силовым оценкам такая каркасно-опорная трансформируемая система называется "комбинированной".

В перечисленных случаях процессы развертывания осуществляются силовым, несиловым и комбинированным развертыванием. Наличие такого выбора создает удачные ситуации технического обеспечения реализации конструкции.

В зависимости от расположения зон опорных каркасов и зон заполнения различают трансформируемые системы открытой, закрытой и смешанной схем опорных каркасов. Если зоны заполнения по всему контуру ограничены зоной каркаса, то такая система закрыта, а в остальных случаях имеются открытые или смешанные схемы каркасно-опорных конструкций.

## 2 Структура опорных каркасов

**В** общих случаях в каркасно-опорных трансформируемых системах опорные каркасы могут быть прямолинейной, ломаной и криволинейной формы, расположенные в плоскости или в пространстве. В системе не являются обязательными непрерывные контакты между зонами опор и заполнения.

В процессе трансформации опор, наряду с обязательным изменением длины, могут соблюдаться разные случаи изменения или даже сохранения геометрии сечения.

Касаясь геометрии опорных каркасов, надо отметить три конкретных случая формоизменения контура:

- замкнутый контур на всех стадиях трансформации остается замкнутым;
- открытый контур замыкается или наоборот;
- открытый контур остается открытым.

Конкретизация геометрической и физической модели опорных каркасов полностью определяется разработанной теорией трансформируемых систем. Несмотря на это, некоторые нюансы требуют усиления акцента с точки зрения конструктивных особенностей структуры.

По внутренней структуре различают две разновидности опорных каркасов:

- каркасы, в которых в процессе трансформации и после ее завершения количество и степень свободы связей не меняется;
- каркасы, в которых в процессе трансформации и после ее завершения количество и степень свободы связей меняется.

Эти структурные качества опор обуславливают возникновение множества вариантов равновесных состояний единой системы в зависимости от структуры зон заполнения и зон контакта.

Перечисляя ожидаемые варианты, можно отметить сохранение формы всей системы за счет преднапряжения структуры, фиксацию формы фактором добавления связей и т.д.

Преднапряжение системы заслуживает отдельного рассмотрения на уровне конкретных классов конструкций, но в обобщенной постановке для каркасно-опорных трансформируемых систем надо отметить, что оно достигается:

- за счет силового развертывания опорных каркасов;

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУКИ ✧ ПЕРЕНЕСЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

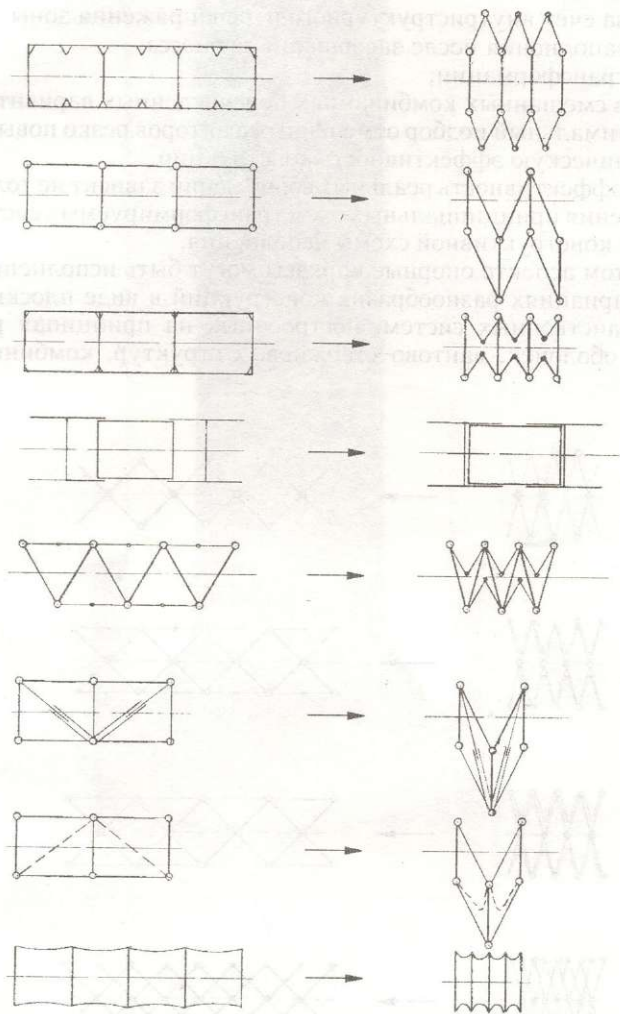


рис. 3.1

## Каркасно-опорные трансформируемые системы

- за счет несилового разворачивания опорных каркасов и в конце трансформации—напряжения контактной зоны;
- за счет внутрискрутного перенапряжения зоны заполнения после завершения процесса трансформации;
- в смешанных комбинациях перечисленных вариантов.

Оптимальный подбор отмеченных факторов резко повышает техническую эффективность конструкции.

Но эффективность реальных сооружений зависит не только от решения принципиальных схем трансформируемых систем, но и от конструктивной схемы исполнения.

В этом аспекте опорные каркасы могут быть исполнены во всех вариациях разнообразия конструкций в виде плоских и пространственных систем, построенных на принципах рам, ферм, оболочек, вантово-стержневых структур, комбиниру-

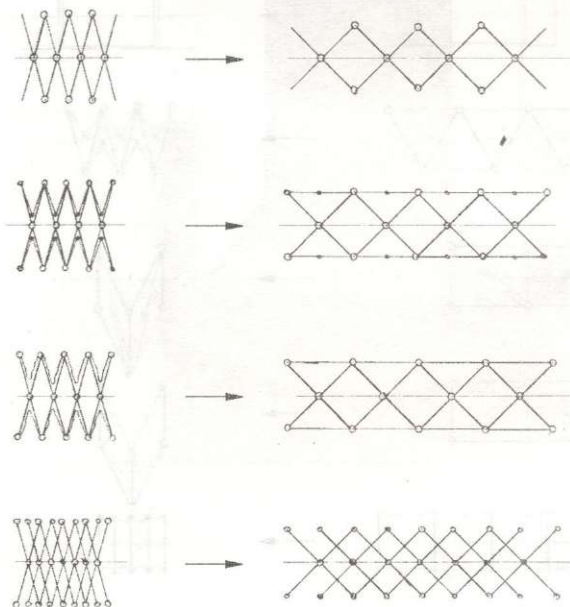


рис. 3.2

ванных и комплексных систем и т.д. (рис.3.1).

При любом выборе вариантов конструктивного исполнения опорных каркасов особое место надо уделить возможности управления процессами трансформации по контролю направленности формообразования, динамики и надежной фиксации геометрии всей каркасно-опорной трансформируемой системы.

Это возможно, когда опоры как трансформируемые системы имеют минимальное число степеней свободы и то по ориентирам направленности трансформации.

Классическим примером такой длинномерной структуры являются крестообразно расположенные с цилиндрическими шарнирами взаимосвязанные регулярные системы, т.е. "пантографические конструкции", которые называются еще и "нюрнбергскими ножницами".

Одно из преимуществ таких схем в том, что кроме направления трансформации системы, по форме рисунка развертывания она является устойчивой, что и соответствует вышеставленным задачам. Они могут встречаться с добавочными жесткими или гибкими связями или усложненными схемами (рис.3.2). Подобный эффект могут обеспечить и иные другие конструктивные решения, оптимальность которых зависит от конкретной задачи.

### 3 Структура заполняющей и контактной зоны

Заполняющие зоны в большинстве конструкций по контурам каркасных опор являются основной формообразующей структурой. По принципам построения они могут быть самыми разными: лепестковыми, стержневыми, однослойными многослойными, ферменными, вантовыми и вантово-стержневыми, комбинированными и комплексными, сплошными и дискретными, пластинчатыми и пневматическими с самой разнообразной геометрией как плоских, так и пространственных систем.

Однако, несмотря на столь большой диапазон построения заполняющей зоны, с точки зрения процессов трансформации, все-таки удается определенная систематизация.

Как для любых трансформируемых систем и здесь встречаются три варианта связей структуры:

- зона из неустойчивых связей;
- зона из устойчивых и неустойчивых связей;
- зона из устойчивых связей.

У каждого варианта есть свои конструктивные и функциональные особенности, отражающиеся на технико-экономических показателях конструкции.

Также многообразна кинематическая картина заполняющей зоны на стадии завершения процесса трансформации и фиксации геометрической формы. Геометрически изменяемые и неизменяемые, статистически определяемые и неопределяемые, а также мгновенно жесткие системы с предварительным напряжением и без напряжения в разных вариациях создают самые разнообразные варианты конструкционной схемы.

После четкого разграничения по типам зон можно сделать разграничение по энерго-силовым факторам, обеспечивающим процессы трансформации.

По этим факторам зоны часто являются чисто ведомыми системами, и практически до завершения трансформации, в них не возникают никакие силы, способствующие формообразованию. Такими являются, к примеру, вантовые заполняющие зоны.

Есть много конкретных вариантов решений, когда силы трансформации появляются на протяжении всего процесса трансформации или на его определенной фазе. Для каркасно-опорных систем в типичных случаях отмеченные эффекты яв-



ляются желательными на начальном этапе трансформации в целях вывода опорных каркасов из самого себя, т.е. из инерции покоя и придания кинетической энергии элементам механизмов разворачивания.

В зависимости от типа конструкций в завершающих этапах порой становится эффективным возникновение противоположных силовых факторов для демпфирования динамического удара.

Перераспределение энерго-силовых эффектов между опорными каркасами, зоной заполнения и зоной контакта является особенно эффективным для таких конструкций зоны заполнения, которые на завершающем этапе поглощают большие доли энергии. К таким системам относятся, в первую очередь, преднапряженные структуры, но не только они.

Особенно своеобразно в этом направлении обстоят дела в таких заполняющих зонах, в которых в конце трансформации происходит появление добавочных связей фиксации или формируется статистически неопределимая система.

Для нахождения энергии, обеспечивающей отмеченные процессы, удачно применяются инерционные силы опорных каркасов и напряжение контактной зоны после завершения процесса трансформации опорных каркасов.

Контактная зона, кроме перечисленных функций, имеет и многие другие значения.

В зависимости от принятых конструктивных решений регулируются динамические параметры колебательных процессов зон заполнения, снимаются температурные и другие перенапряжения элементов, погашаются геометрические неточности изготовления конструкции, достигаются заданные усилия преднапряжения и решаются многие другие задачи, связанные с построением работоспособных сложных систем.

Во многих конструкциях разного назначения после завершения основного этапа трансформации требуется сохранение свойств корректировки формы, т.е. добавочной трансформации как опорных каркасов и зоны контакта, так и, в первую очередь, заполняющей зоны. Такие требования ставятся в прецизионных системах, особенно с регулируемыми поверхностями, воплощение которых, как правило, требует высокого уровня техники и создания сложных конструкций.

## 4 Каркасно-опорные трансформируемые конструкции

Каркасно-опорные трансформируемые конструкции являются конкретными инженерными решениями, обоснованными принципами построения структур каркасно-опорных трансформируемых систем.

Вариации схем, варианты и подварианты составных элементов и узлов, свойства материалов, энергетические параметры, условия и требования функционирования, обстоятельства транспортировки, возможности и среда экспериментальных исследований и другие факторы определяют превосходящие множества конкретных конструкций по сравнению с принципиальными схемами системы.

Степень правильного определения основных направлений в решении инженерной задачи для построения оптимального варианта конструкции, с учетом реальных возможностей и требований резко понижается при отсутствии аналитической логики конструирования каркасно-опорных трансформируемых конструкций.

Исходя из этого, на базе разработанных новых схем предполагается анализ в области каркасно-опорных трансформируемых конструкций для создания высокоэффективных инженерных трансформируемых сооружений наземного и космического базирования.

Частное решение зависит не только от эффективных схем с точки зрения желаемого перераспределения усилий, жесткости и большой несущеспособности, но и реальной возможности изготовления изделия, технологичности конструкции, доступности материала, простотой монтажа и от многих практических проблем. Именно из этих соображений, наряду с другими системами, одной из самых доступных конструкций является так называемые кольцевые системы.

Кольцевыми называются такие каркасно-опорные трансформируемые системы, в которых опорные каркасы имеют форму кольца. При такой постановке вопроса, независимо от конструктивных зон заполнения и контакта, самыми простыми являются однокольцевые конструкции.

При создании штатных конструкций космического радиотелескопа особое место займет разработка однокольцевых конструкций. Здесь упрощенно можно разъяснить, что такие конструкции состоят из кольца, к которому по внутреннему

контуру с помощью контактных конструкций прикреплена заполняющая – так называемая конструкция центра.

По сравнению с однокольцевыми, ступенью выше по сложности находятся многокольцевые конструкции.

Для оценки признаков каркасно-опорных конструкций предлагается класс новых решений, в том числе и два варианта многокольцевой конструкции.

### Многокольцевая концентрическая трансформируемая конструкция

Трансформируемые кольца (рис.3.3), построенные из “нюрнбергских ножниц”, взаимосвязанных между собой шарнирами, имеют разные диаметры, и по отношению к перпендикулярной оси плоскости кольца расположены концентрично друг к другу. В отличие от предложенного, построение колец допустимо по любым принципам конструирования, не исключая как механические, так и пневматические формообразования опорных каркасов.

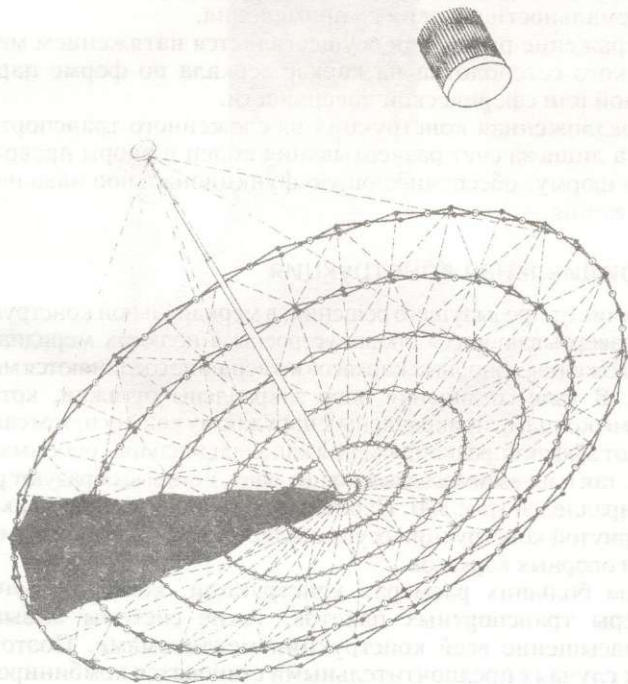


рис. 3.3

Расположенные по соседству кольца взаимосвязаны вантовыми элементами, образующими треугольные схемы.

Перпендикулярно плоскостям расположения круговых колец в центральной точке устроена развертывающаяся длиномерная опора.

К одному концу опоры прикреплены радиальные ванты, фиксирующие центр кольца минимального диаметра, а к другому концу – ванты-оттяжки, фиксирующие в пространстве заданную геометрию наружного кольца.

Преднапряжение оттяжек обуславливает постоянные натяжения межкольцевых вант, которые, совместно с кольцами и центральной опорой, создают геометрически неизменяемую пространственную систему.

Такие структуры могут иметь самые разные назначения и разные области применения, но с учетом постановки задачи, новые конструкции, будут представлены в целях построения больших остроуправленных космических развертывающихся антенн. При такой постановке вопроса разработчикам ставятся повышенные требования с учетом прецизионности системы и экстремальности условий ее применения.

Отражение радиоволн осуществляется натяжением металлического сетеполотна на каркас зеркала по форме параболической или сферической поверхности.

Предложенная конструкция из сложного транспортного пакета лишь за счет развертывания колец и опоры превращается в форму, обеспечивающую функциональное назначение сооружения.

### Меридиальная конструкция

В отличие от предыдущего решения, в меридиальной конструкции две развертывающиеся опоры устроены в полюсах меридиально расположенных опорных каркасов и в вершине соединяются между собой. В узле соединения опор закреплены оттяжки, которые другими концами прикреплены к наружному кольцу и, тем самым, создают эффект преднапряжения как меридиальных опорных каркасов, так и их взаимосвязывающих вант, которые образуют рисунок параллелей (рис.3.4). Переход формы от сложного пакета к развернутой конструкции осуществляется за счет трансформации опор и опорных каркасов.

При больших размерах конструкции, когда ограничены размеры транспортных пакетов, такие системы вызывают перенасыщение всей конструкции механизмами. Поэтому в таких случаях предпочтительными становятся комбинированные-кольцевые системы. Однако здесь надо отметить, что ука-

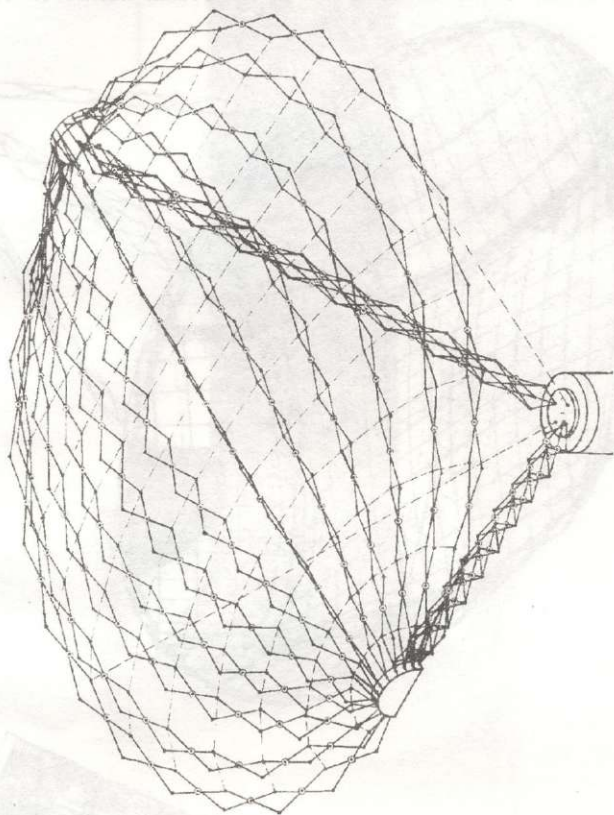
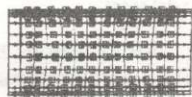


рис. 3.4

занные недостатки практически исчезают, если конструкции опорных каркасов решаются не из многозвенных механизмов, а из сплошнородных пневмосистем или конструкций, формирование которых происходит не за счет устройства узла, а с помощью другого вида технологии.

Комбинированно-кольцевая конструкция

К основному круговому кольцу по схеме, показанной на рис.3.5, прикреплены четыре взаимопересекающиеся опорные арки, которые в системе образуют каркасные опоры для крепления вантовой сетки несущей поверхности сложной двойкой кривизны. Отмеченная вантовая система является силовым

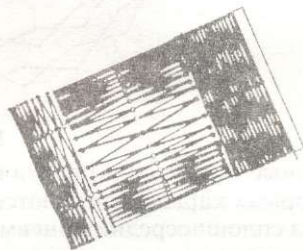
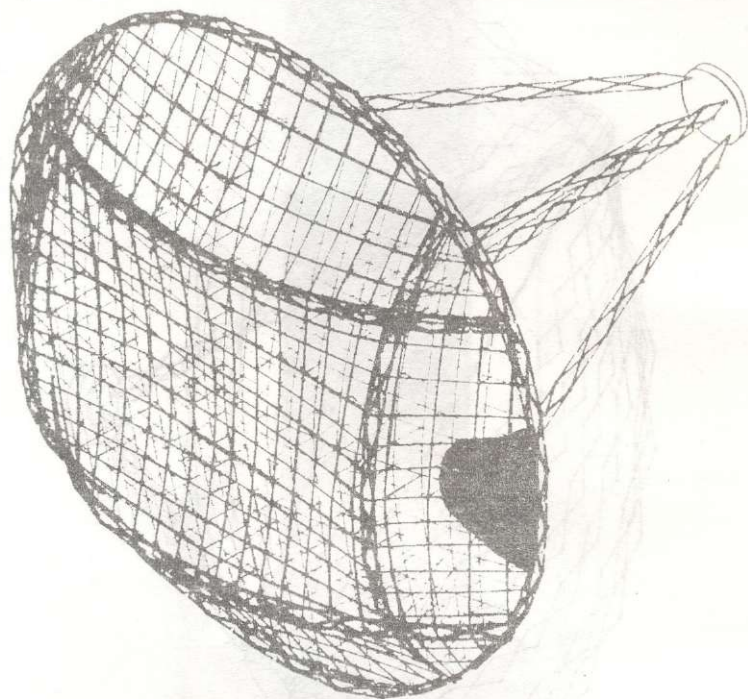


рис. 3.5

Э. В. МЕДЗМАРИАНИШИЛИ ✧ ЛЕГКОТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

стапелем для образования параболической формы другой вантовой функциональной сетки, которая закреплена по контуру большого кольца и принимает проектную форму за счет гибких распорок, устроенных между соответствующим узлом стапельной силовой и функциональной вантовой сетки.

К функциональной вантовой сетке прикреплен отражатель, облучатель которого закреплен на вершине четырех развернутых опор, которые опираются в узлах пересечения арок.

Несмотря на большую жесткость, подобные системы, как и другие многокольцевые решения в прецизионных конструкциях, создают большие трудности достижения точных поверхностей. Это объясняется появлением ведущих шарнирных механизмов и других силовых элементов в зоне функциональных структур, что и вызывает отмеченные трудности.

В этом отношении предпочтительными являются однокольцевые системы. Однако при этом очень часто ограничиваются размеры конструкции. Для преодоления такой трудности с успехом применяется спаренно-кольцевые системы.

### Спаренно-кольцевая конструкция

Два трансформирующихся кольца расположены в пространстве так, что их контуры совпадают по линиям пересечения параллельными плоскостями ортогонально расположенной цилиндрической поверхности. На каждом кольце растянута сетка из шестиугольных ячеек, которые образованы или из вант, или из шарнирно-взаимосвязанных стержней.

Проектное взаиморасположение спаренных колец обеспечивается соединяющей структурой. Геометрические координаты поверхностей центра фиксируются стержневыми или вантовыми распорками, которые закреплены в соответствующих узлах разных сеток, натянутых на спаренных кольцах (рис. 3.6).

Такие конструкции весьма технологичны. Они имеют множество положительных сторон, среди которых особенно можно отметить унификацию и типизацию элементов и узлов, а также возможности корректировки координат функциональных поверхностей конструкции за счет регулирования длины распорок. Такие системы дают возможность построения сверхбольших конструкций и применение метода наращивания укрупненных типовых блоков, что является весьма приемлемой формой при проведении работ в экстремальных условиях.

При рассмотрении каркасно-опорных трансформируемых систем не затрагиваются многие параметральные вопросы, в

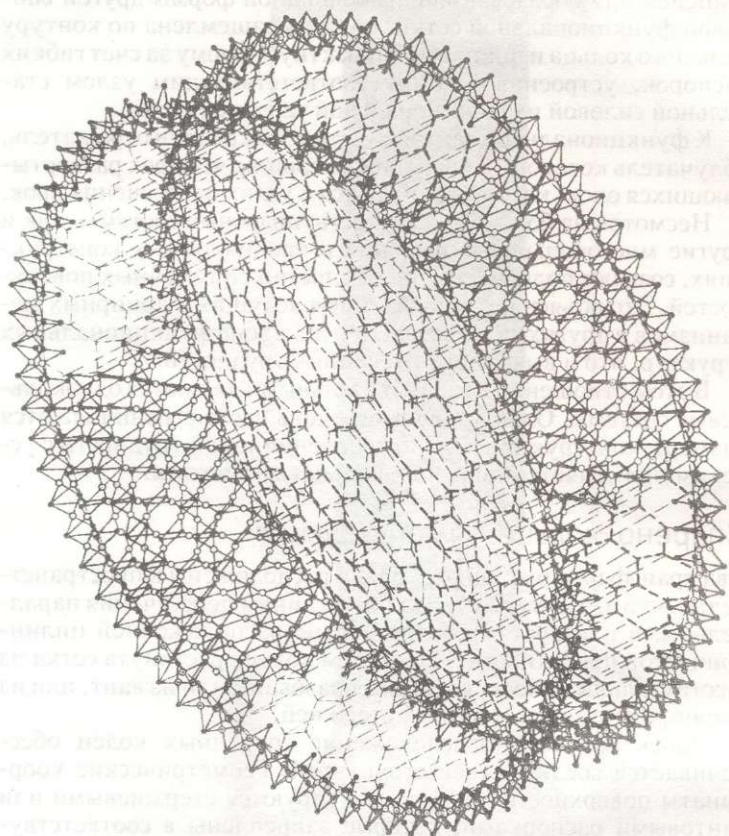


рис. 3.6

том числе и изменение формы от температурных воздействий. Об этом более подробно будет сказано при разработке космической антенны. Однако при оснащении предложенной конструкции длинорегулирующими простейшими приспособлениями в узлах центральной части снимаются многие проблемы сохранения формы и снятия концентрации напряжения от температурных воздействий.

Возвращаясь к спаренно-кольцевым конструкциям, надо отметить, что здесь возможны множества вариантов взаимосвязи колец, колец и опор облучателя, соотношение размеров колец и, что главное, присутствие или отсутствие трансфор-

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИНЫ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



Э. В. МЕДЗМАРИШВИЛИ \* ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

мативности связывающих элементов колец и разнообразности их структурного исполнения.

В этом направлении проработана определенная систематизация, варианты схем которых приводятся на рис.3.7.1.+3.7.4.

Несмотря на множество вариантов по количеству и взаиморасположению колец, интерес представляет общая форма конфигурации самих опорных каркасов, в том числе и колец. В этом аспекте они могут быть построены из:

- прямолнейных участков;
- криволинейных участков;
- из прямолнейных и криволинейных участков.

Многообразие конфигураций опорных каркасов отражается практически во многих предложенных конструкциях. Однако для иллюстрации сложных схем опорных каркасов рассматривается опорно-циклическая конструкция.

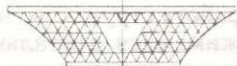
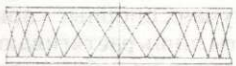
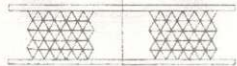
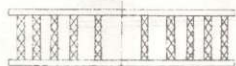
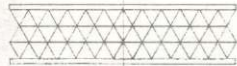
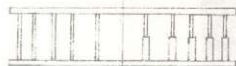


рис. 3.7.1

рис. 3.7.2

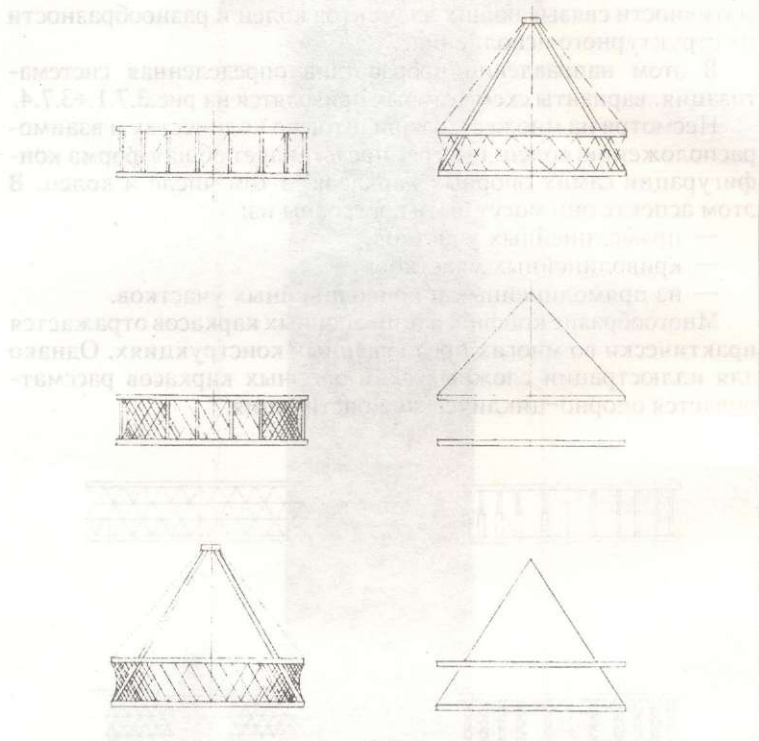


рис. 3.7.3

### Опорно-циклическая конструкция

Данная конструкция весьма своеобразна. Во-первых, сразу же надо ограничить ее ориентацию в пространстве и условие применения, так как обязательным является фактор собственного веса и совпадение направления основных внешних нагрузок к направлению воздействия веса, то есть существование гравитационных воздействий и приложение сил опорных реакций на крайние наружные точки опорных каркасов наподобие ребристо-купольных покрытий. В других случаях требуются усложненные схемы.

Реализация конструкции допускает разные варианты отсутствия в схеме концентричных круговых вантов, что резко меняет работу структуры, но во всех случаях опорные каркасы всегда сжимаются, а остальные элементы лишь растягиваются, что и создает возможность их изготовления из гибких стержней. Такая компоновка системы с учетом складывания эле-

Э. В. МЕДЗМАРЯНИШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

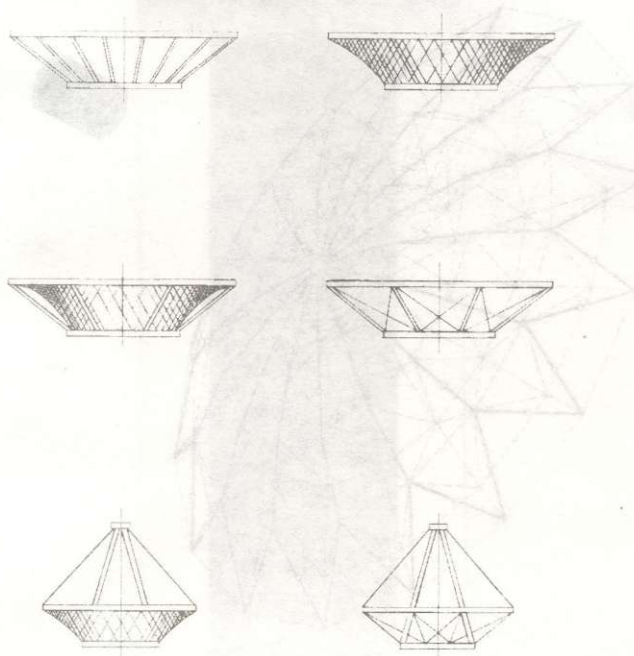


рис. 3.7.4

ментов опорных каркасов без препятствий реализует удачную трансформативность конструкции (рис.3.8).

Такое сооружение характеризуется повышенной жесткостью и обеспечивает минимальные габариты транспортного пакета конструкции.

Возвращаясь к систематизации частного случая каркасно-опорных трансформируемых систем в виде кольцевых систем, особо надо рассмотреть зоны заполнения, т.е. так называемые центры.

По общим геометрическим признакам они могут быть:

- плоскостными;
- ступенчатыми;
- пространственными.

Анализируя каждый из них, рассмотрим разработанные конструктивные схемы.

### Плоскостная структура

Подобные структуры характеризуются тем, что среда зоны заполнения размещается между двумя параллельными пло-

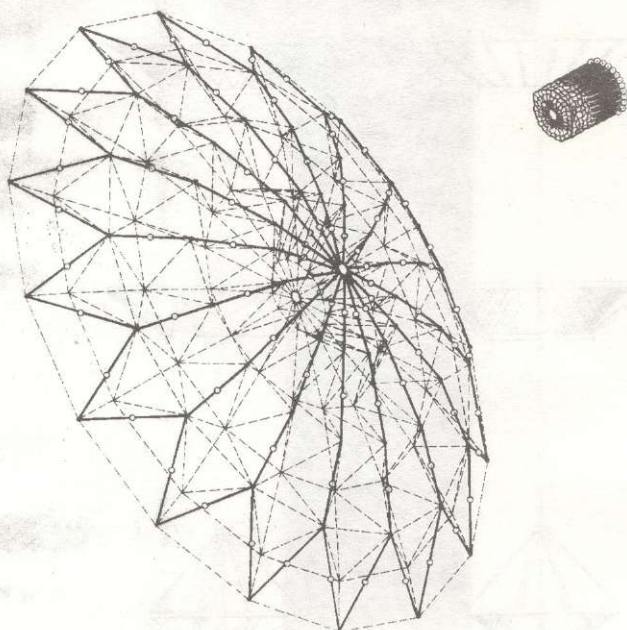


рис. 3.8

скостями, на которых находятся противоположные контуры конструкции.

Предложенная плоскостная структура (рис.3.9) является конкретным решением, центральная часть которой представляет трансформируемую решетку фазированной антенны в виде множества рупоров фазовращателей, а опора состоит из четырех частей криволинейных элементов.

Функционально фазированные антенны не требуют столь жестких условий прецизионности по сравнению с зеркальными концентраторами. Поэтому построение сверхточных конструкций заставляет прибегнуть ко многим комбинациям формообразования конструкции, среди которых надо отметить каркасно-опорные ступельные конструкции.

### Кольцевая ступельная трансформируемая конструкция

В таких конструкциях практически четко разграничены основные структуры по несущим и эксплуатационным функциям.

Э. В. МЕДЗМАРЦАШВИЛИ ✧ ЛПТ АНТЕННО-ОПОРНЫЕ СИСТЕМЫ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИ  $\diamond$  ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

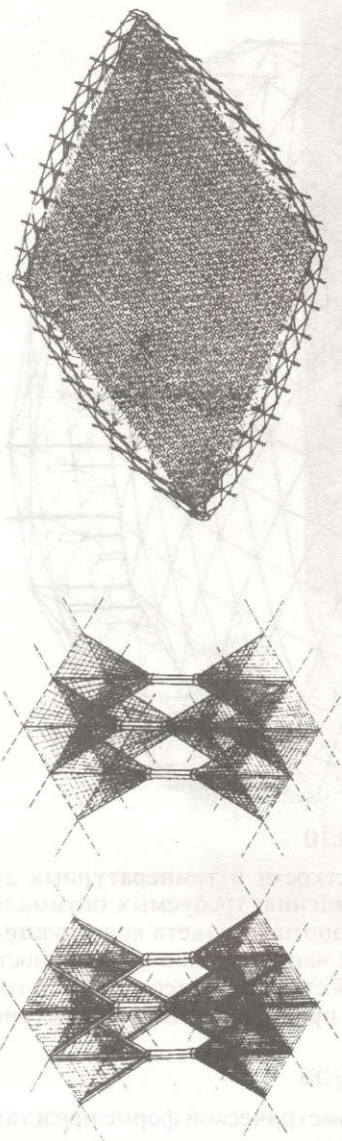


рис.3.9

Структура, выполняющая функции силового несущего звена, является стапелем для надстройки структуры, обеспечивающей точную геометрию поверхности. Несопоримым является то, что точность, со своей стороны, во многом обеспечивается и за счет жесткости стапеля. Но при разграничении функций основным признаком строения конструкции является то, что погрешность геометрии сравнительно жесткого стапеля не влияет на законченную геометрическую форму функциональных частей системы.

Такая логика лежит в основе конструирования разработанной системы. Кольцевой стапель имеет центр из треугольных ячеек из вертикально расположенных гибких лепестков, которые при преднатяжении приобретают повышенную жесткость. В узлах пересечения лепестков защемлены стойки, высота которых регулируется весьма простым способом. Вершины стоек образуют координатные точки зеркала, на которых растянут каркас для крепления отражающего сетеполотна (рис.3.10).

Такие решения при первых оценках имеют много положительных сторон и очень просты. Но при больших диаметрах стапеля высота периферийных стоек резко увеличивается, что создает большие трудности по

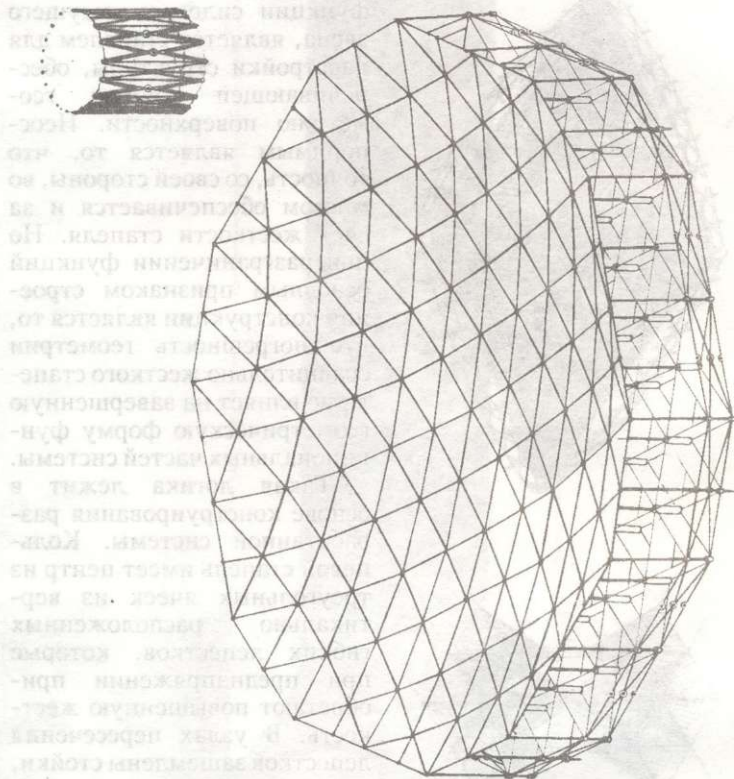


рис. 3.10

процессам трансформации, жесткости и температурных деформаций, а особенно, по сохранению требуемых оптимальных размеров сложного транспортного пакета конструкции.

Именно отмеченные условия часто снижают возможности решения проблем по плоскостной стапельной геометрии, и тогда приходится решать задачу по пространственной геометрии.

### Пространственная структура

Такие конструкции по общей геометрической форме представляют собой пространственные строения самых разных видов и типов.

Предложенная конструкция (рис.3.11) является регуляр-

Э.В. МЕДЗ.МАРИАШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

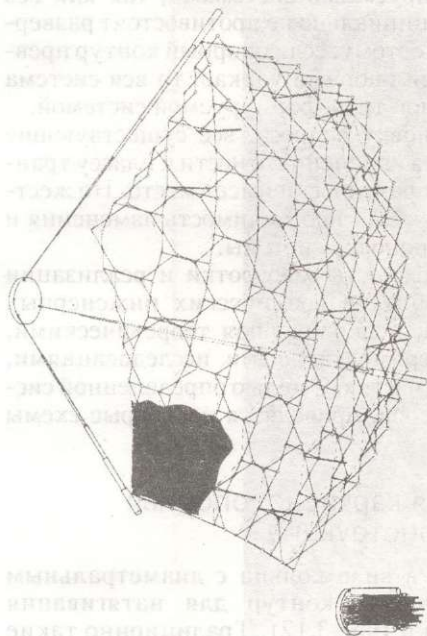


рис. 3.11

ной системой, состоящей из комбинации пантографов и поясных тросов, расположенных между собой по шестиугольной схеме, образуя при этом решетчатый двухслойный комбинированный купол.

При общей оценке самой конструкции надо отметить множество ее достоинств: однотипность и унификацию узлов, управляемость и надежность процесса трансформации, оптимальность дискретизации поверхности отражателя, минимальные размеры пакета и др. Но вместе с этим непреодолимыми являются основные недостатки трансформируемых ферменных регулярных структур, особенно при

их применении для образования поверхностей двоякой кривизны.

Они заключаются в огромном количестве шарниров и других механических узлов, в разнице размеров разных пантографических и поясных элементов и во многом другом.

Но все эти конструктивные признаки предложенного конструктивного решения ни в коем случае не характеризуют в целом структур пространственной геометрии.

Конструктивные особенности заполняющей зоны независимо от ее геометрии являются практически решающим фактором определения положительных и отрицательных сторон системы.

Именно этим объясняется исследование в конструкциях самих структур, по основным направлениям которых предлагаются оригинальные решения.

Ввиду физических свойств конструкционного материала, вантовые и тентовые пленчатые системы само собой ас-

социруются с трансформируемыми системами, так как без опорного контура они принципиально не противостоят развертыванию и складыванию. Поэтому, если опорный контур превращен в трансформируемый опорный каркас, то вся система становится каркасно-опорной трансформируемой системой.

Учитывая такую постановку вопроса, все существующие вантовые системы можно без изменения отнести к классу трансформируемых систем, что фактически имеет место. Но жесткость требований часто вызывает необходимость изменения и принципиально новую компоновку системы.

Этим и объясняется сложность разработки и реализации новых решений для наземных и космических инженерных сооружений. Такая работа, подкрепленная теоретическими, конструкторскими и экспериментальными исследованиями, приводится в последующих частях. С целью определенной систематизации, в виде примеров, приводятся некоторые схемы новых решений.

## Однослойная вантовая каркасно-опорная трансформируемая конструкция

За счет каркасной опоры в виде кольца с диаметральным аркообразным хребтом создан контур для натягивания однослойной вантовой сетки (рис.3.12). Традиционно такие системы с учетом двоякой отрицательной кривизны весьма жесткие. Именно указанный жесткий слой является ступенем для отражающей поверхности, которая также представляется в виде вантовой сетки, заземленной по кольцу и растянутой с помощью распок, в основном определяющих координаты поверхности.

В пространстве фиксация расположения облучателя по отношению к экрану достигнута двумя трансформируемыми опорами с опиранием на кольцо и оттяжками.

Радиотехнические требования в некоторых случаях допускают появление в системе так называемой центральной опоры облучателя, что резко упрощает задачу рассмотрения множества вариантов построения системы из вантовой центральной части. Одной из таких эффективных разработок является вантово-ферменная структура, представляющая собой самые пространственные вантовые конструкции в виде пространственных систем.



Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

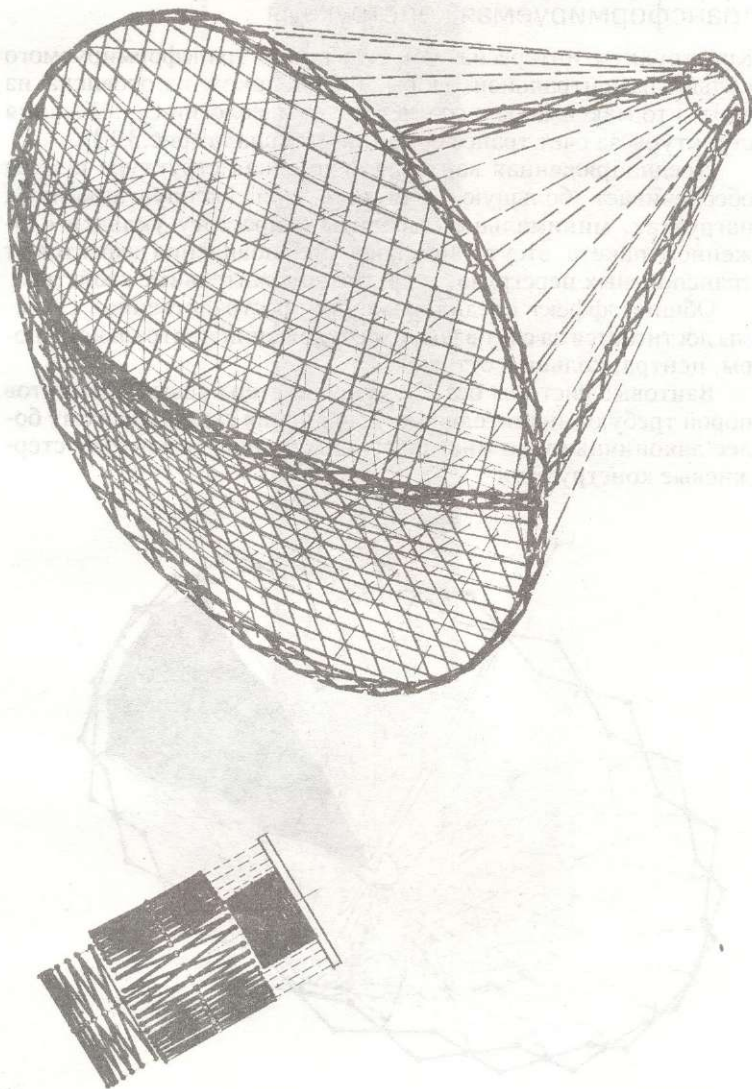


рис. 3.12

Пространственная вантово-ферменная трансформируемая конструкция

Конструкция интересна тем, что кроме трансформируемого кольца и центральной опоры, она целиком изготовлена из вант, что максимально соответствует идеологии складывания структуры за счет трансформации материала (рис.3.13).

Преднапряженная вантовая ферменная структура центра обеспечивает большую жесткость при эксплуатационных нагрузках, минимальные габариты и простоту укладки сложенного пакета, отсутствие опасностей появления дефектов от транспортных перегрузок и другие положительные свойства.

Общий эффект преднапряжения пространственной системы достигается за счет взаиморасположения центральной опоры, центра, кольца и оттяжек.

Вантовые системы без применения стержневых элементов порой требуют значительного усложнения схемы, поэтому более лаконичными во многих случаях являются вантово-стержневые конструкции.

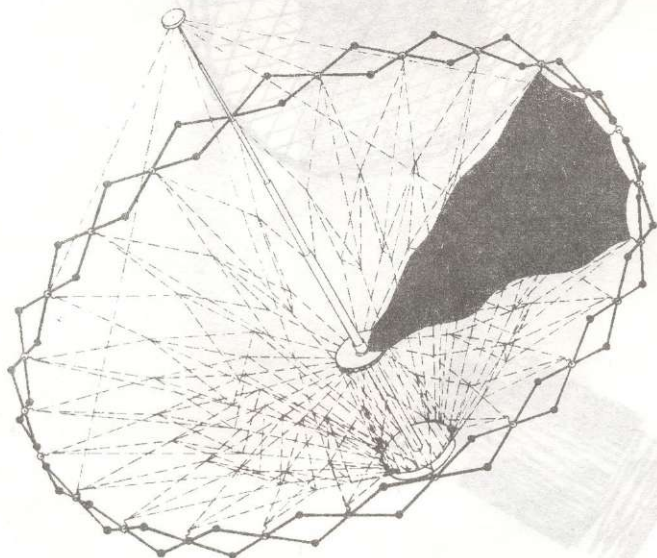


рис. 3.13

Э.В. МЕДЗМАРЧАНИШИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДВЕДЕВА И В. И. МЕДВЕДЕВ. ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Вантово-стержневая трансформируемая регулярная структура

Шарнирно взаимосвязанные стержни образуют в пространстве купол, к которому в шарнирах прикреплены ванты. Наподобие шестигранных пирамидальных кристаллов ванты концами собираются в узлах, которые расположены на сетке. Она образует слой нижних поясов также с куполообразной формой контура, и по отношению к слою верхних поясов имеет серповидное очертание. Вся система разворачивается с помощью кольца. Кольцо после трансформации продолжает функционировать (рис.3.14).

Формообразование конструкции от сложенного пакета происходит за счет трансформации кольца, податливости вант и смещения в противоположных направлениях соседних шарнирных узлов шестиугольных стержневых ячеек.

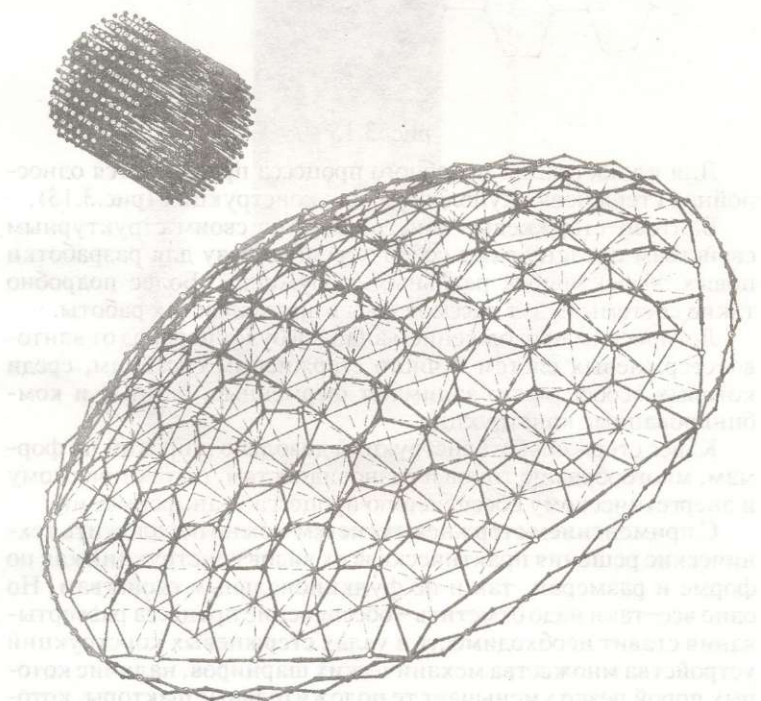


рис. 3.14

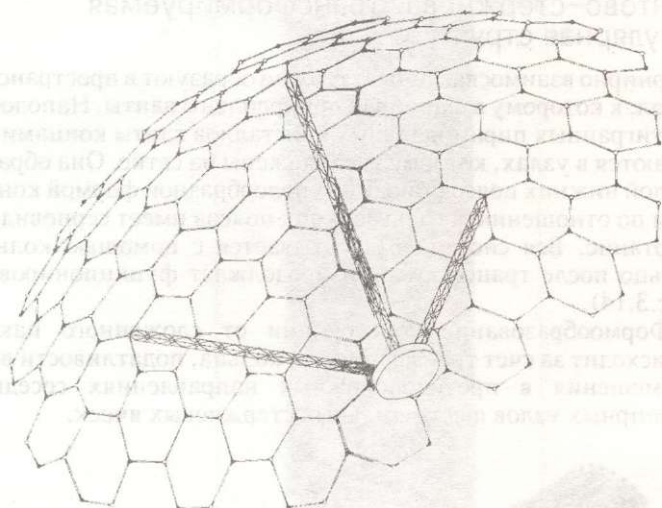


рис. 3.15

Для иллюстрации подобного процесса предлагается однослойная стержневая куполообразная конструкция (рис.3.15).

Вантово-стержневые конструкции по своим структурным свойствам представляют собой хорошую базу для разработки новых эффективных реальных сооружений. Более подробно такие системы будут рассмотрены в других частях работы.

Логическим продолжением анализа будет переход от вантово-стержневых систем к чисто стержневым системам, среди которых особое место занимают ферменные, рамные и комбинированные конструкции.

Класс стержневых конструкций довольно широкий по формам, многообразию типов и разновидностям, по техническому и энергетическому обеспечению процесса трансформации.

С применением стержневых систем можно предложить технические решения практически всех видов конструкций как по форме и размерам, так и по функциональным свойствам. Но одно все-таки надо отметить – обеспечение процесса разворачивания ставит необходимость в узлах стержневых конструкций устройства множества механических шарниров, наличие которых порой резко уменьшает те положительные факторы, которыми традиционно характеризуются классические схемы стержневых конструкций.

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИНЫ ✧ ПЕРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Именно поэтому очень часто приходится искать новые решения на основе комбинации стержневых и других совершенно нетрадиционных систем. К примеру, такой постановке вопроса удовлетворяют лепестковые системы.

### Лепестковая комбинированная трансформируемая конструкция

Радиально расположенные упругие плоские лепестки, зафиксированные между спаренными стойками, взаимосвязаны концентрическими стержневыми кольцами, состоящими из “лопающихся” элементов.

Развертывание происходит за счет аккумулированных упругих сил. Жесткость и форма поверхности сохраняются в основном с помощью лепестков, устойчивость которых подкрепляется стержневой системой (рис.3.16).

В итоге, не перечисляя все возможные направления построения заполняющей зоны, можно заключить, что для их воплощения в каждом конкретном случае приемлемы все разновидности традиционных конструктивных схем: от сплошных

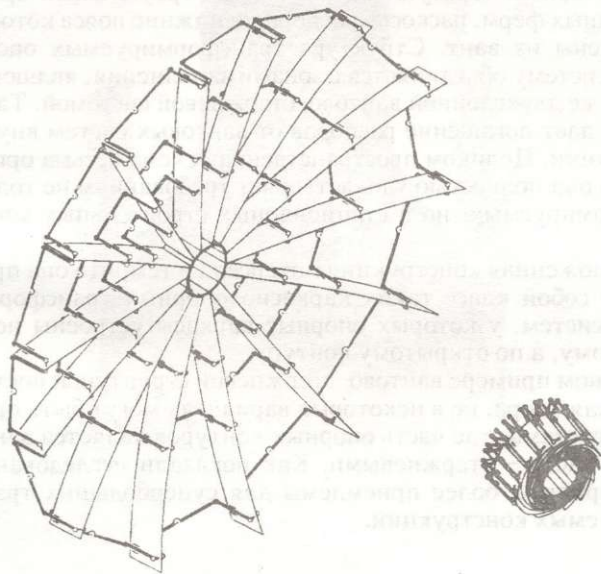


рис. 3.16

до дискретных, и от плоских до пространственных, включая оболочки, пластины, стержни, пленки, гибкие нити и все другие системы.

Интерес конструктивного построения распространяется не только на так называемые центральные части каркасно-опорных трансформируемых систем, но и на опорный каркас. В этом отношении и они могут быть стержневыми, вантовыми, вантово-стержневыми, комбинированными, лепестковыми и так далее. Для иллюстрации некоторых случаев предлагаются новые решения каркасно-опорных трансформируемых конструкций.

### Циклическая арочная вантово-стержневая каркасно-опорная трансформируемая конструкция

Циклическое расположение арочных опорных каркасов создаст контуры купола.

Арки, по структуре способные трансформироваться, представляют собой вантово-стержневую систему (рис.3.17). Спаренные стержни образуют верхние пояса треугольных пространственных ферм, раскосы, распорки и нижние пояса которых изготовлены из вант. Структура трансформируемых опор в единую систему объединяется с зонами заполнения, являющимися также двухслойной вантово-стержневой системой. Такое решение дает погашение распоров от вантовых систем внутри конструкции. Целиком пространственная схема весьма оригинальна и она полностью удовлетворяет требованиям не только трансформируемых, но и стационарных строительных конструкций.

Предложенная конструкция интересна и тем, что она представляет собой класс таких каркасно-опорных трансформируемых систем, у которых опорные каркасы устроены не по замкнутому, а по открытому контуру.

В данном примере вантово-стержневой структурой построена каждая опора, но в некоторых вариантах могут быть предложены системы, где часть опорных контуров является вантовыми, а часть – стержневыми. Как показали исследования, такие варианты более приемлемы для супербольших трансформируемых конструкций.

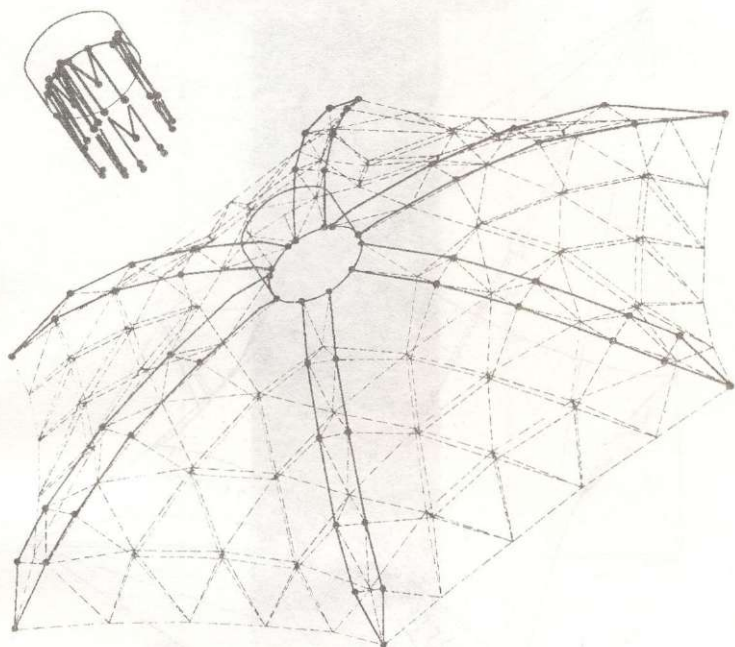


рис. 3.17

### “Летающе-стержневая” каркасная трансформируемая конструкция

Три длинномерных стержня без взаимного контакта расположены в пространстве (рис.3.18) и с помощью вант концами связаны между собой как каркас кристалла. Длинномерные элементы имеют сверхбольшую степень трансформации. Это можно обеспечить за счет местного технологического процесса формообразования желоба или труб из рулонных лент. Функциональная конструкция в виде двухслойной висячей системы закреплена на вантах связывающих стержней, являющихся в данном случае опорным каркасом. Функциональные конструкции для повышения прецизионности поверхности снабжены распорками, оснащенными механизмами регулирования длины.

Подобные решения весьма подходящи для супербольших конструкций космического базирования.

В целях повышения степени трансформации для космоса

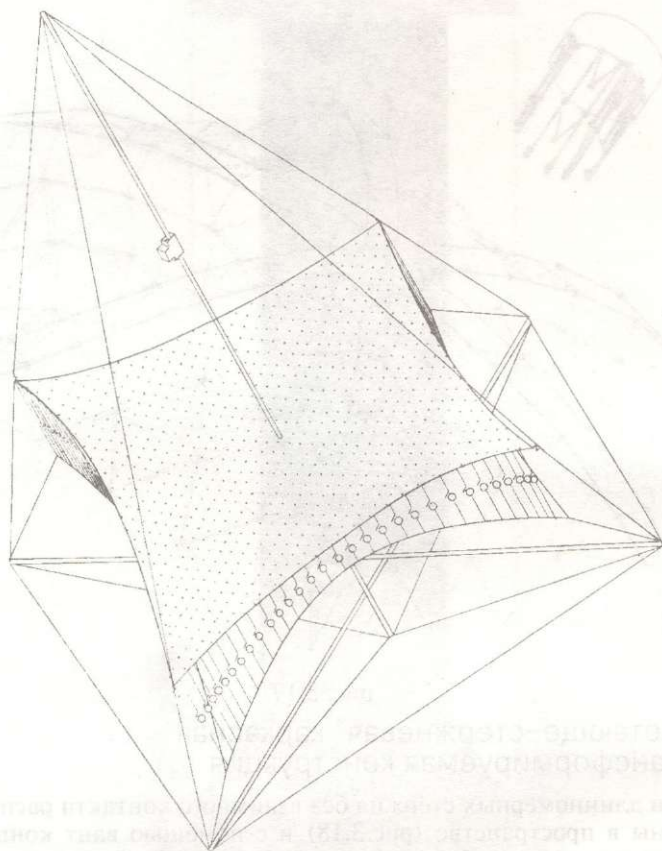


рис. 3.18

перспективны конструкции из вантовых опорных каркасов с применением постоянно воздействующих тяг из двигателей (рис.3.19). При этом тяговая сила двигателей заменяет силовой эффект длиномерных стержней, одновременно выполняя функции стабилизации и управления системой космических сооружений.

Кольцевые системы, как и в целом каркасно-опорные трансформируемые системы для наземных и космических конструкций, являются весьма оправданной сферой распространения самых разных решений, в том числе пневматических,



центробежных, поверхностно-регулируемых, электростатически формообразованных и других современных систем.

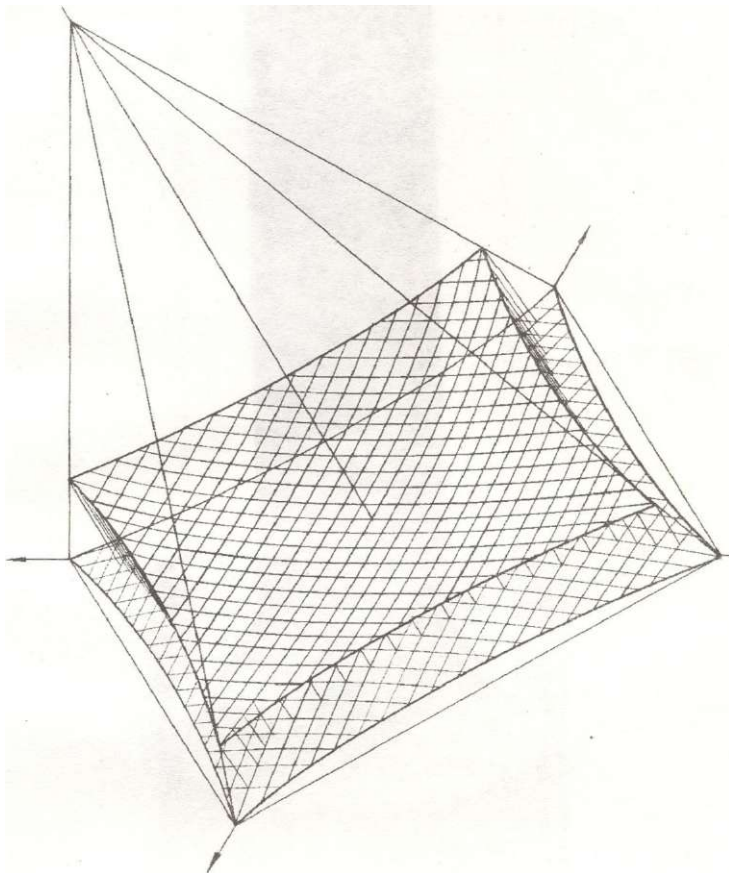


рис. 3.19

3/18

конструктив

Система трансформируемых каркасно-опорных конструкций, позволяющая в процессе эксплуатации изменять геометрию и форму конструкции.

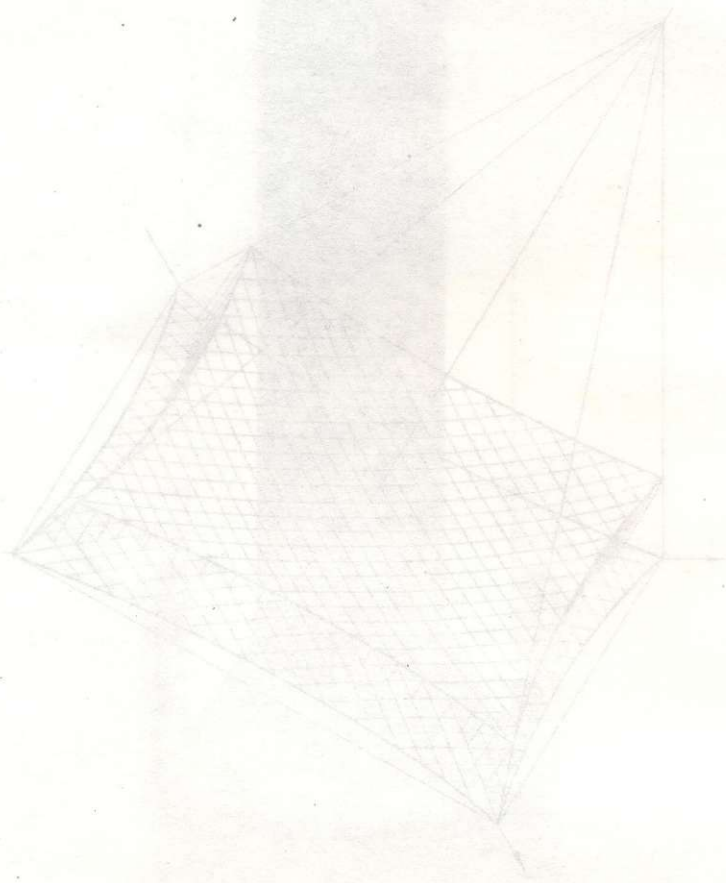


рис. 3.19

Э. В. МЕДЗМАРЯНИВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

## 4 Основные принципы создания космического трансформируемого радиотелескопа КТРТ-30

Создание космических трансформируемых радиотелескопов как в целом, так и по их конкретному классу, наряду с обобщением теоретических исследований, требует выбора основного направления концепций построения космического комплекса и разработки конструктивных схем.

Проблема должна решаться с учетом возможностей реализации поставленных задач по технологическому и техническому обеспечению изготовления, испытания, запуска и функционирования системы.

### 1 Постановка вопроса и выбор основных направлений ее решения

Как уже отмечалось, создание на космических орбитах больших остронаправленных радиоантенн требуется в целях решения множества задач научного, коммуникационного, информационного, хозяйственного и оборонного характера. Именно в этом аспекте ставится проблема создания штатных образцов точных радиотелескопов космического базирования диаметром зеркала до 30 метров.

Возведение на космических орбитах больших, сложных и точных инженерных сооружений резко затруднено из-за экстремальных условий транспортировки, образования функциональной формы, эксплуатации и обеспечения надежности даже без учета таких проблем, как построение специфических космических аппаратов, процессы стабилизации и управления, передача, прием и обработка информации, энергоснабжение, долговечность систем и другие научные, технические и политические вопросы, которыми, как правило, сопровождается развитие космической техники.

Начнем поэтапное обсуждение условий. В стадии транспортировки непосредственно перед конструкцией, в основном, ставится три ограничения. Это – собственный вес изделия, габариты сложного пакета и его способность, без понижения эксплуатационных свойств, выдерживать вибрационные и ударные воздействия от старта ракетносителя до вывода космического аппарата с изделием на космическую орбиту с учетом его освобождения от оболочки обтекателя.

На космической орбите при рассмотрении условий надо определить этапы, характеризующие разные ограничения и требования.

На первом этапе на космическом аппарате смонтирован сложный пакет трансформируемой конструкции. В этом случае основным отрицательным фактором являются большие перепады отрицательных и положительных температур и вакуум. Под их воздействием часто образуются спайки в скользящих поверхностях, которые расположены в механизмах трансформации. Меняются физико-механические, а порой и химические свойства материалов конструкции, которым еще предстоит перенос основных силовых воздействий в стадии трансформации. Происходит определенное затвердение коммуникационных кабелей, которые при разворачивании требуют добавочных сил и, со своей стороны, наращивают усилия в элементах конструкции.

Происходят изменения в электромеханических системах и в аккумуляторах упругих сил, что требует особого учета.

На втором этапе, в процессе трансформации больших конструкций создается опасность фактора разницы орбит отдельных участков изделия. Формообразование и сохранение эксплуатационных свойств системы затруднено, или будет невозможно достичь при наплыве конструкций на космический аппарат, а также при других аномальных процессах.

Отрицательный фактор создает и парусность конструкции, которая испытывает влияние атмосферы, особенно на низких орбитах.

С точки зрения отрицательных факторов взаимодействия космического аппарата и конструкции, надо подчеркнуть возникновение неуравновешенных сил трансформации, т.е. реакции конструкции как в стадии трансформации, так и при завершении формообразования, когда максимально нарастает фактор динамического удара. На космических орбитах такие явления или выводят из строя всю космическую систему, или для ее стабилизации требуется огромный энергетический ресурс, каждая доля которого весьма ограничена для косми-

ческих аппаратов.

Точность формы отражающей поверхности, расположение и ориентация облучателя в пространстве у конструкции радиотелескопа на стадии функционирования резко ограничены. Соблюдение этих ограничений осложняется космической реальностью – знакомяющихся и больших величин температур. От этих факторов усложняется и силовая картина работы конструкции.

Сохранение эксплуатационных свойств зависит от стабилизации и управления конструкцией радиотелескопа, но и эта задача приобретает определенную проблематичность на космических орбитах ввиду отсутствия напряженно-деформируемого состояния от собственного веса.

Космическая среда на всех стадиях существования механизмов и энергосистем ставит свои ограничения по их конструированию. В связи с этим, решение многих технических и технологических проблем происходит в пределах этого ограничения.

Космическая техника имеет свои традиционные задачи, среди которых одна из первых – стабилизация и управление космических аппаратов, которая для крупногабаритных конструкций осложняется из-за больших расхождений орбит ее отдельных элементов.

Каждый радиотелескоп функционально требует отражающего экрана, который превращается в парус даже при минимальных плотностях атмосферы, существующих в космосе. В связи с этим, для управления конструкции и корректировки орбиты, учет сопротивления атмосферы является обязательным, как и учет солнечного ветра и его давления, хотя они могут и не влиять на определение усилий в элементах конструкций. Эти факторы, как уже было сказано, частично влияют и на процессы трансформации при рассмотрении взаимосмещения аппарата с развертывающейся системой, но особенно дают о себе знать при функционировании системы.

Воплощение большого сооружения в космосе связано с отсутствием или ограничением вмешательства космонавта в процесс его возведения и применением сборочно-монтажных приспособлений, механизмов и роботов. В перспективе такие возможности будут наращиваться, но сегодня их дефицит налицо. В общем и в будущем для космической техники, как для любой прогрессивной сферы, автоматический режим сохранит свой приоритет, так как наряду со многими преимуществами является также и практически безопасным для космонавтов, которые в космосе, несмотря на развитие техники, будут счи-

тать себя в экстремальных условиях, и это естественно.

Удачное решение поставленной задачи создания штатных образцов больших космических радиотелескопов, их запуск на орбиты и высококачественное функционирование зависит от многих вопросов, среди которых одним из основных и проблематичных является разработка таких конструкций, которые оптимально соответствовали бы условиям их эксплуатации в космосе.

С учетом отмеченного, в основных направлениях создания конструкции, на передний план выходят следующие обязательные технические качества системы:

- минимальные размеры транспортного сложенного пакета конструкции и наименьший ее собственный вес;
- максимальное отсутствие в пакете невзаимосвязанных и слабо соединенных значительных концентраций жестких частей, чтобы избежать мощных вибрационных столкновений элементов системы. С этой целью обязательной является также плотность пакета, состоящего из прижимных частей;
- доведение до минимума механических узлов и механизмов в целях повышения точности геометрии формы и повышения жесткости конструкции за счет максимального использования физико–механических ресурсов конструкционных материалов;
- создание схемы, дающей возможность осуществления планомерного процесса по кинематическому формообразованию и динамике конструкции;
- для повышения надежности количественное дублирование и качественное разнообразие механизмов разворачивания и фиксации формы;
- механизмы, узлы и конструкции должны обладать саморегулированием геометрического взаиморасположения элементов, погашения динамических ударов, демпфирования колебаний и снятия нежелательных напряжений;
- присутствие в системе силовых зон для крепления конструкции к космическому аппарату и удачного силового перераспределения между ними с учетом сохранения эксплуатационных свойств изделия;
- конструкционные материалы, удовлетворяющие условиям технологичности обработки, физико–механических требований, долговечности,

- электрических требований и т.д.;
- технологичные конструкторские решения и возможность их доводки по соблюдению точности;
- возможность теоретических и экспериментальных исследований системы;
- при особых условиях возможность проведения монтажных работ и обслуживание конструкции в космосе.

С учетом основных направлений, особенностей и прецизионности конструкции радиотелескопов строится логическая модель конструкции.

Вся центральная часть, на которой крепится экран, освобождается от всех типов механизмов, в том числе и от шарнирных узлов и ее геометрическая структура строится с учетом того, чтобы трансформативность обеспечивались за счет свойства материалов.

Такое решение снимает значительную часть первоначальных погрешностей в геометрии, которые, как правило, вызываются допусками и отклонениями при изготовлении узлов, что со своей стороны, доводит податливость элементов и нелинейность напряжений при загрузении конструкции до минимума. Это обеспечивает ранний этап полноценного включения конструкционного материала в работу системы.

- Конструкция центра должна обеспечить большую поперечную жесткость системы, ее стапельный монтаж и доводочное регулирование геометрических параметров.
- Центр должен обеспечить также максимальную компактность и простоту технологии достижения сложного пакета, а также отсутствие случайностей при ее развертывании.
- Все типы механизмов: силовые, поддерживающие и обеспечивающие развертывание элементов, демпфирующие узлы и приспособления, регулирующие общие геометрические ориентации, исключены из центра и выведены в периферийную зону.
- В периферийной зоне проведены мероприятия по дублированию энерго- и силовых систем.
- Структура центра для повышения жесткости должна обеспечивать достаточное напряжение ее элементов при растяжении периферийной зоны.
- Периферийная зона должна характеризоваться

большой кратностью уменьшения в размерах и, что особенно важно, минимальной степенью свободы при разворачивании для планомерного обеспечения формообразования и достаточной скорости проведения процесса трансформации.

— Для уменьшения последствий динамического удара специальные узлы, расположенные в зоне контакта, структура центра и контурная силовая механическая зона должны принять удар на себя и, что главное, погасить его внутри конструкции без потери ее равновесия в пространстве.

— Для повышения надежности обеспечения процесса трансформации, комплекс функциональной аппаратуры, центр с кольцом и космическая аппаратура на первом же этапе разворачивания должны быть максимально разведены друг от друга с применением систем внутреннего демпфирования динамического удара и погашения колебаний без потери равновесия системы в целом.

— Конструкция должна обеспечивать существование силовых зон в полюсе центра, на периферийной зоне и в вершине соединения опор облучателя для крепления элементов и аппаратов космических систем.

— С учетом радиотехнических требований степень дискретизации поверхности, ее точность и жесткость должны нарастать от периферии к центру.

— Ввиду трансформативности конструкции, в целях образования гладких участков на экране, ее надо изготовить из материала типа трикотажа со способностью пружинного растягивания в обоих направлениях плоскости.

— Конструкция должна обеспечивать надежный процесс трансформации, фиксации и сохранения формы с большой точностью геометрических параметров радиотелескопа.

— Конструкция должна удовлетворить жесткостным и прочностным критериям всего космического комплекса от всех видов внешних и внутренних воздействий.

Логика основных направлений больше всего соответствует каркасно-опорным трансформируемым системам, а конкретно – кольцевым конструкциям.

Именно разработанная логическая основа определила сис-

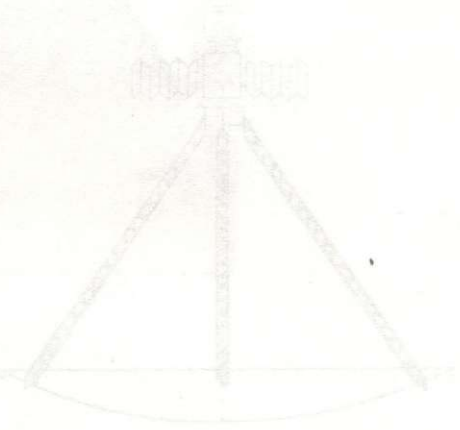


Э. В. МЕДЗМАВИШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

тематизацию каркасно-опорных систем в целях всестороннего рассмотрения области, на принципах которой разработаны и реализованы конструктивные системы КТРТ диаметром зеркала 30 м.

В настоящее время в мире наблюдается стремительное развитие космической техники, что обусловлено необходимостью освоения космоса в целях обеспечения безопасности и устойчивости жизни на Земле. В связи с этим особое внимание уделяется созданию надежных и долговечных конструкций, способных выдерживать экстремальные нагрузки и воздействия космической среды.

В этом отношении особое значение приобретает разработка и внедрение трансформируемых конструкций, способных изменять свою форму и конфигурацию в зависимости от условий эксплуатации. Такие конструкции позволяют существенно снизить массу и габариты объектов, что является критически важным фактором при запуске в космос.



## 2 Концепция построения систем космических радиотехнических комплексов с большими остронаправленными антеннами

Определение концепции построения космических радиотехнических комплексов имеет принципиальное значение для формирования основной схемы конструкции радиотелескопа.

Если схема конструкции не находится в соответствии с концепцией построения комплекса, то даже наилучшие решения теряют свои преимущества. Поэтому возможности приспособления конструкции к разным концепциям указывают на ее универсальность, что определенным образом является преимуществом конструкции.

В этом отношении кольцевые системы практически являются универсальными с учетом того, что с их применением построение космического комплекса можно осуществить по следующим схемам:

- Крепление космического аппарата с наружной стороны облучателя (рис.4.1).

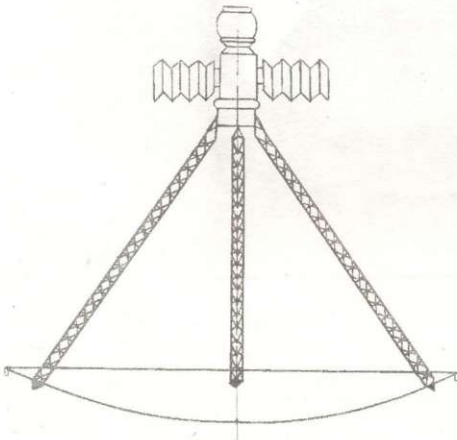


рис. 4.1

В этом случае для уменьшения затенения экрана солнечная батарея должна быть ориентирована в плоскости, перпендикулярной плоскости расположения кольца.

Такая компоновка весьма удачна с точки зрения расположения радиоаппаратуры, так как передатчики и приемники по кратчайшему тракту без осложнения подключаются в комплекс аппаратуры, которая находится в корпусе космического

Э.В. МЕДВЕДЕВИЧ *ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ*

Э. В. МЕДВЕДЕВА И ДРУГИЕ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

аппарата. Однако дистанционным становится управление и энергоснабжение механизмов развертывания кольца.

Эффективность такой системы зависит от расстояния центров тяжести аппарата, конструкции антенны и жесткости опор облучателя.)

Положительным является отдаленность процесса развертывания зеркала от космического аппарата и незагруженность зеркала с сосредоточенной силой, что в итоге повышает точность экрана. Такая схема частично (но не для кольцевой системы) апробирована в практике на американском спутнике АТС-6.

Для кольцевых конструкций такие системы полностью соответствуют оптимальному перераспределению усилий в элементах радиотелескопа. Этому способствует совпадение осей симметрии антенны и космического аппарата, что, кроме многих положительных факторов, до минимума доводит крутящие и изгибающие моменты в элементах конструкции.

- Крепление космического аппарата с наружной стороны зеркала радиотелескопа (рис.4.2).

Такая схема с присущими ей признаками зеркально отображает положительные свойства в отрицательные от предыдущего варианта. Но здесь взаимосвязь антенны с аппаратом можно осуществить не непосредственным креплением изделий, а с помощью добавочных опор (рис.4.3).

Непосредственное крепление космического аппарата на задней вершине центра антенны ставит требование к структуре построения конструкции. Для ферменных, оболоччатых, регулярных и многих других систем такое сосредоточение основного груза технически весьма сложно. Но при циклическом варианте – структура с полюсом на вершине центра – задача резко упрощается и порой становится оптимальным вариантом.

Вторая схема вынужденная, и она необходима, если центр не способен воспринять перегрузки или ее геометрия при этом ухудшается.

Наличие солнечных батарей с задней стороны радиотелескопа при ориентации антенн на земной шар и другие планеты солнечной системы является оптимальным с точки зрения ее энергонасыщения.

Схема по определенной аналогии с предложенной концепцией, с непосредственным креплением ферменной конструкции антенны к аппарату, была осуществлена для КРТ-10 на станции "Салют-6".

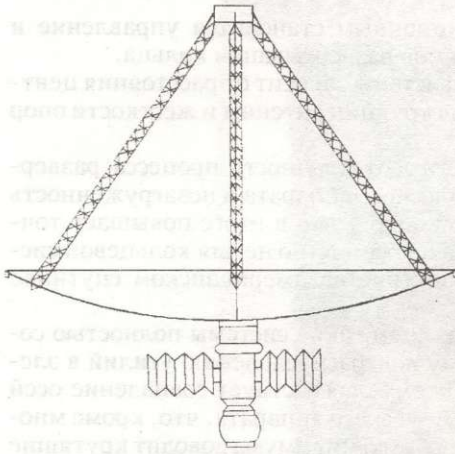


рис. 4.2

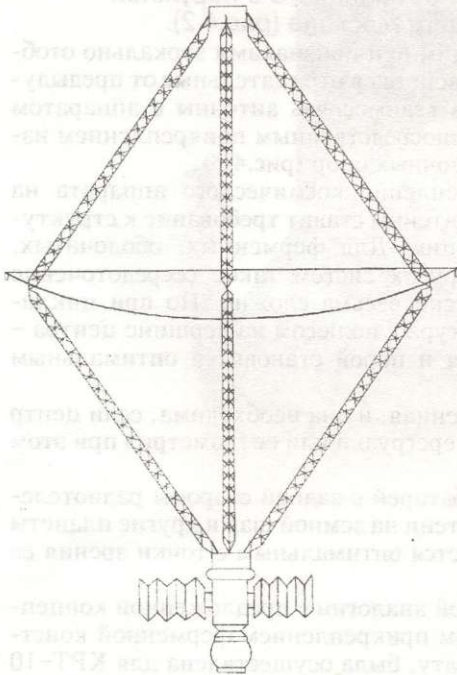


рис. 4.3

- Крепление космического аппарата на силовое кольцо (рис.4.4).

Кольцевые системы за счет большой жесткости опорного кольца дают возможность крепления космического аппарата на кольцо. Такое решение имеет определенное преимущество. Не загружая опоры и центр, а опираясь на самый жесткий элемент в виде кольца, система приобретает большую несущеспособность.

Кроме того, сближение бортовой техники и энергетики к электро-механической системе разворачивания кольца в определенной мере упрощает задачу. Несмотря на отмеченные преимущества, рассматриваемый вариант ставит много проблем.

Резко меняется и становится нехарактерным для кольцевых симметричных систем работа конструкции антенны. Несимметричность комплекса требует пересмотра систем стабилизации и управления аппарата ввиду изменения кинематических и динамических режимов и па-

Э.В. МЕДВЕДЕВА И ШИШКИН. ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

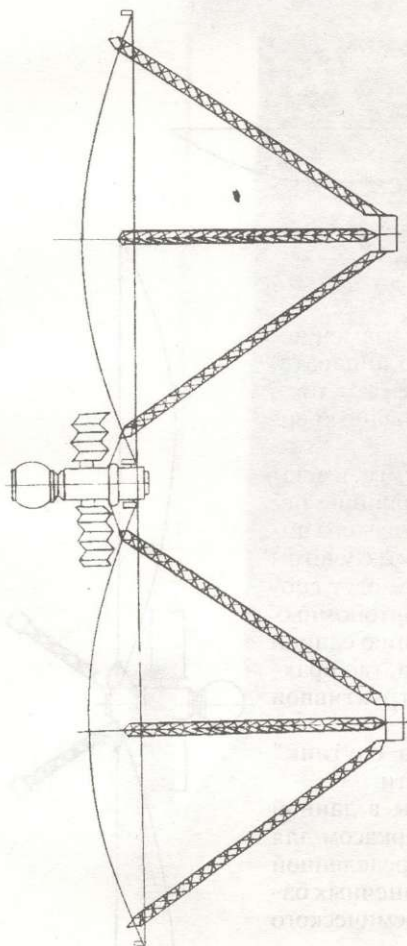


рис. 4.4

двух колец по программе "Краб".

С точки зрения универсальности решения задачи разных космических программ, хорошие перспективы имеет комплекс космического аппарата и универсальных платформ, на которых и крепятся антенны (рис.4.7).

Универсальные платформы не меняют характера работы кольцевых радиотелескопов по сравнению с вышесотметченны-

раметров.

Однако рассматриваемая схема становится более приемлемой, если радиотелескоп сам является несимметричным (рис.4.5).

В таком варианте фокальный контейнер не требует специальных опор и располагается на космическом аппарате. В этом случае наличие жесткого кольца незагруженного центра антенны, максимальная компактность расположения космической радиоаппаратуры и электромеханики кольца в свою очередь резко улучшает технические и эксплуатационные показатели орбитальной системы. Однако проблемы возникают при построении транспортного пакета в космическом корабле.

Эффективность схемы улучшается при таких задачах, когда на орбите требуются спаренные радиотелескопы (рис.4.6).

Такая схема, но не для параболоидных радиотелескопов, была реализована на спутнике "Прогресс-40" для испытания

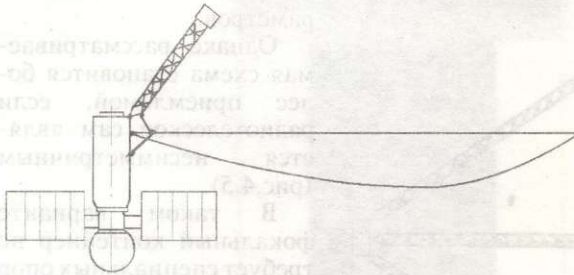


рис. 4.5

ми вариантами, так как они взамен непосредственно космического аппарата, являются опорой и все зависит от того, по какой схеме будет реализовано крепление к ней антенн.

Все перечисленные схемы имеют аналогии и их объединяет наличие независимого штатного космического аппарата. Но кольцевые системы с учетом огромной жесткости кольца могут способствовать реализации автономных комплексов, то есть построению единой системы антенны и спутника, где практически нет четкой конструктивной разграниченности (рис.4.8).

Такая система "антенна-спутник" имеет следующие особенности.

Опоры и кольцо антенны в данной схеме являются силовым каркасом для расположения на них распределенной аппаратуры, двигателей, солнечных батарей и других систем космического комплекса.

Предложенная схема имеет свои сложности и определенные трудности построения, но, в общем, является перспективным принципом построения больших функциональных инженерных сооружений в космосе.

Каждая схема допускает вывод комплекса в космос как на кораблях одно-разового, так и многоразового запуска.

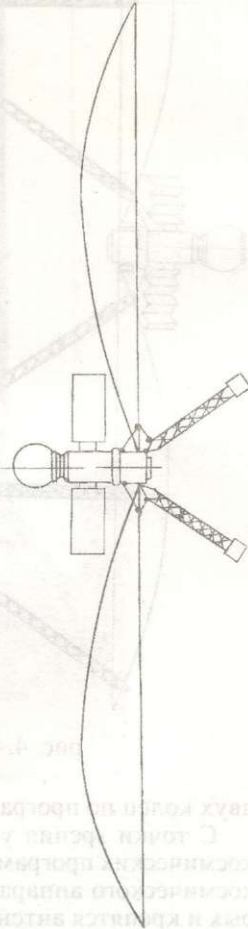


рис. 4.6

Э. В. МЕДВЕДЕВ И ЕГО КОЛЛЕКТИВ

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ  $\blacklozenge$  ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

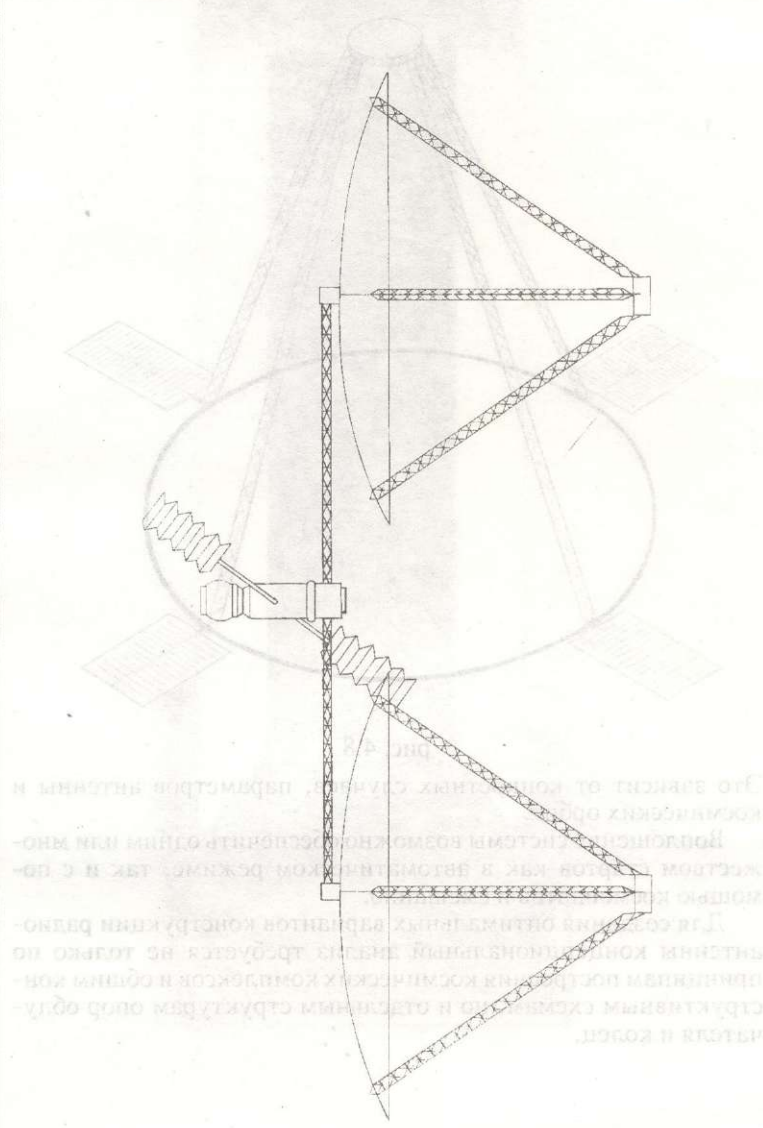


рис. 4.7

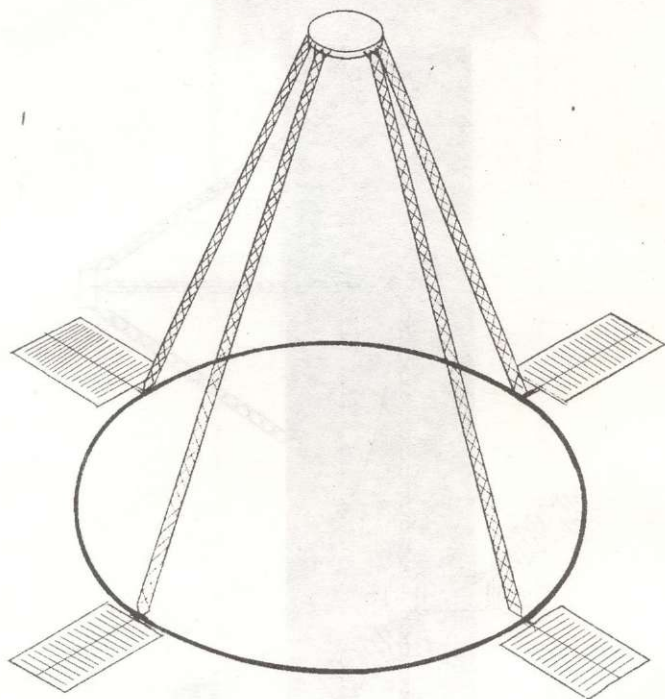


рис. 4.8

Это зависит от конкретных случаев, параметров антенны и космических орбит.

Воплощение системы возможно обеспечить одним или множеством стартов как в автоматическом режиме, так и с помощью космонавтов и смешанно.

Для создания оптимальных вариантов конструкции радиоантенны концепциональный анализ требуется не только по принципам построения космических комплексов и общим конструктивным схемам, но и отдельным структурам опор облучателя и колец.

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИ И ПЕРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



### 3 Конструкционные схемы опорных каркасов трансформируемых радиотелескопов

На основе рассмотренных концепций каркасно-опорные космические радиотелескопы должны состоять из колец и опор облучателя, которые в стадии трансформации должны обеспечить планомерное разворачивание конструкции. Это в основном и проще всего достигается минимальной степенью свободы кинематического механизма конструкции, которые при этом воспринимают значительные инерционные силы, что, со своей стороны, требует повышения жесткости каркаса.

Поэтому проведенные исследования по подбору базовых структур каркасов практически отвергли весьма распространенные ферменные и другие решения, где до достижения функциональной формы, конструкции могут принимать множество конфигураций, не дающих возможности требуемого контроля и управления процессом трансформации.

На основе теоретических и экспериментальных исследований для опор и колец было принято решение применять кинематическую схему конструкции с одной степенью свободы. В этом случае степень свободы должна быть ограничена в пространстве во всех направлениях, кроме направления трансформации. Для упрощения схемы ограничение перемещения достигается жесткостью конструкции на изгиб.

Вместе с этим, сохраняя главный принцип, не ограничено конструктивное строение системы.

В этом направлении были разработаны пластинчатые, биферменные, пространственно-треугольные ферменные, телескопические, взаиморасположенно-дублированные и вантово-ферменные конструкции разных конфигураций.

Простейший вариант строится из двух крестообразно расположенных плит, связанных между собой цилиндрическими шарнирами (рис. 4.9). Такие крестообразные блоки расположены продольно и концами связаны шарнирными узлами, в которых также защемлены ломающиеся плиты, которые полностью выпрямляются при достижении проектной длины. Трансформация обеспечивается разными силовыми факторами, которые возникают от пружин, элементов, натянутых тросов, инерционных сил или сил реакции. При каждом конкретном

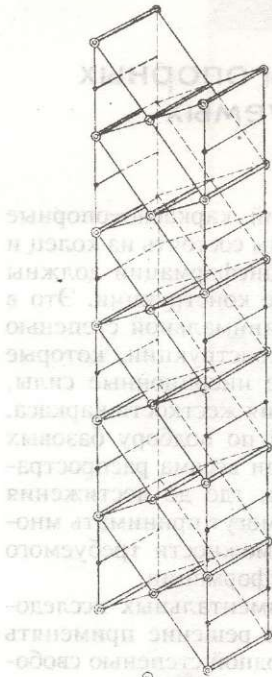


рис. 4.9

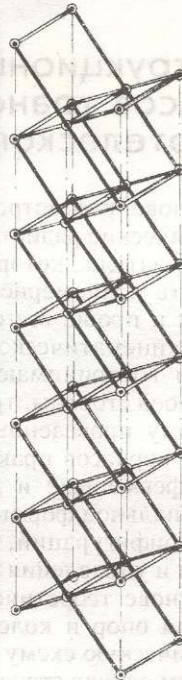
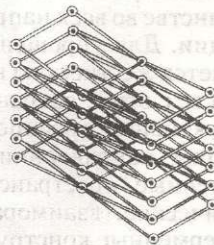
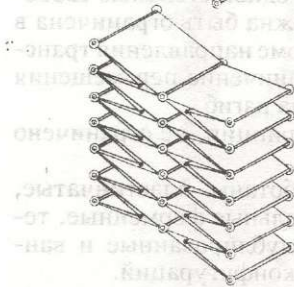


рис. 4.10



решении подбирается отдельный или комбинированный вариант.

Аналогичную схему можно реализовать из стержневых элементов, где в месте ломающихся элементов в роли фиксатора можно также использовать ванты (рис.4.10).

В целях повышения пространственной жесткости аналогичный принцип распространен на треугольно-пространствен-

Э.В. МЕДЗМАРИШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э.В. МЕДЗМАРШАВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

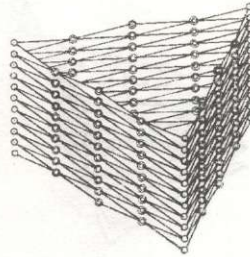
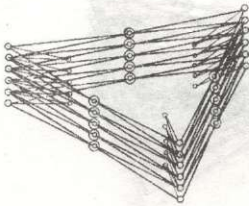
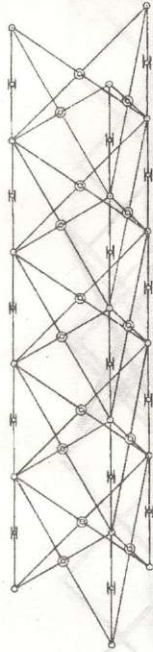


рис. 4.11

рис. 4.12

ную комбинированную ферменную систему. И в этом случае можно применять как ломающиеся (рис.4.11), так и гибкие стержни.

Если в рассмотренных случаях ограничение смещения конструкции от оси трансформации достигается за счет жесткости на изгибе ограниченного количества крестообразно распо-

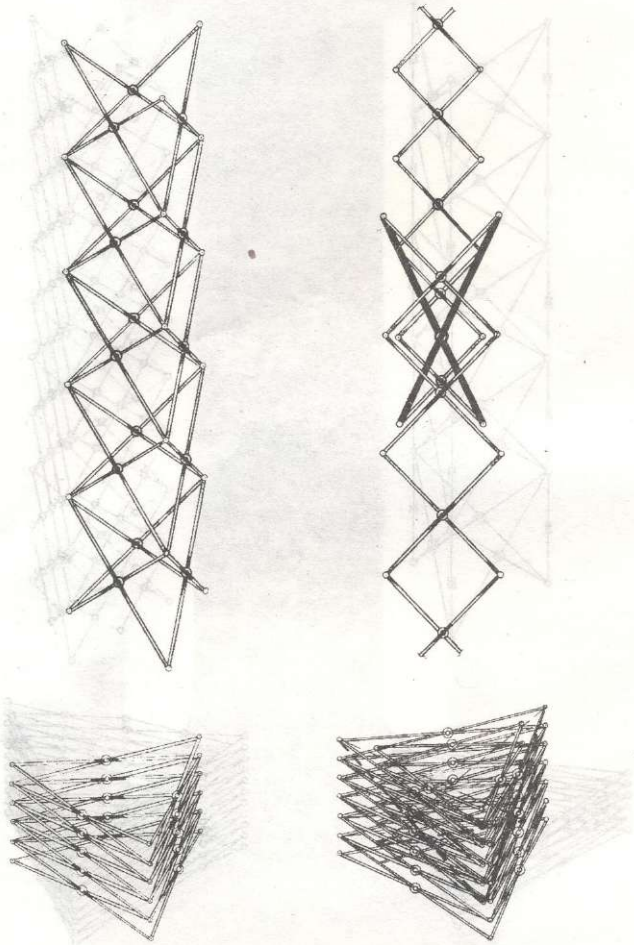


рис. 4.13

женных элементов, то в так называемом дублированном варианте их количество удваивается. Но жесткость на изгиб нарастает не за счет их суммирования, а за счет возникновения другой структуры, что качественно повышает жесткость (рис.4.12).

Опоры облучателя в больших антеннах довольно длинные,

Э.В. МЕДВЕДЕВИЧ ✦ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДЗМАРЦАНЬШИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

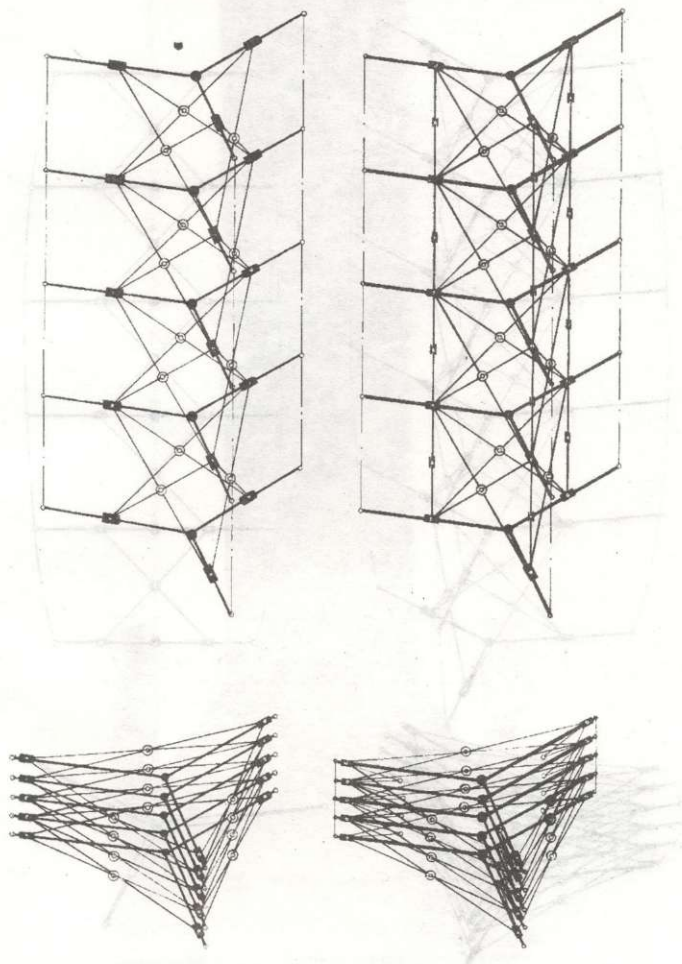


рис. 4.14

поэтому обеспечение минимальных размеров сложного пакета всегда остается трудной задачей, для решения которой предложена телескопическая взаимосвязь двух структур из крестообразных элементов, которые, по сравнению с обычными, вдвое сокращают высоту сложного транспортного пакета (рис.4.13).

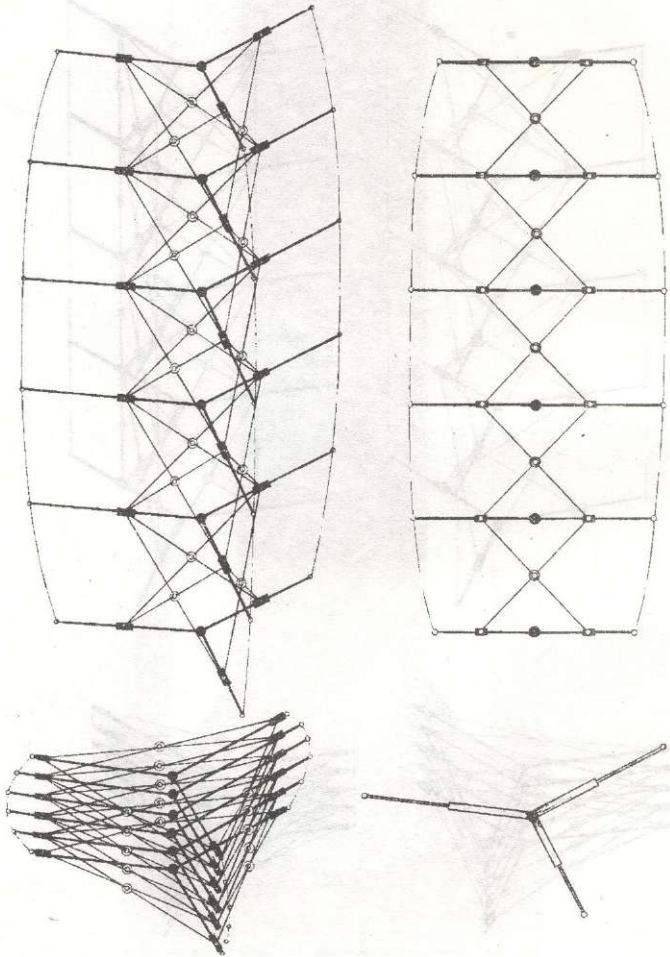


рис. 4.15

Базовая схема позволяет импровизировать конструкторские решения. Примером этого служат пространственные структуры из вант и стержневых комбинированных элементов, с помощью которых с сохранением наименьших весовых показателей и габаритов пакета резко нарастает поперечная жесткость опор, что весьма актуально для больших конструкций

Э. В. МЕДЗМАРЬШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДЗ. МАНУШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

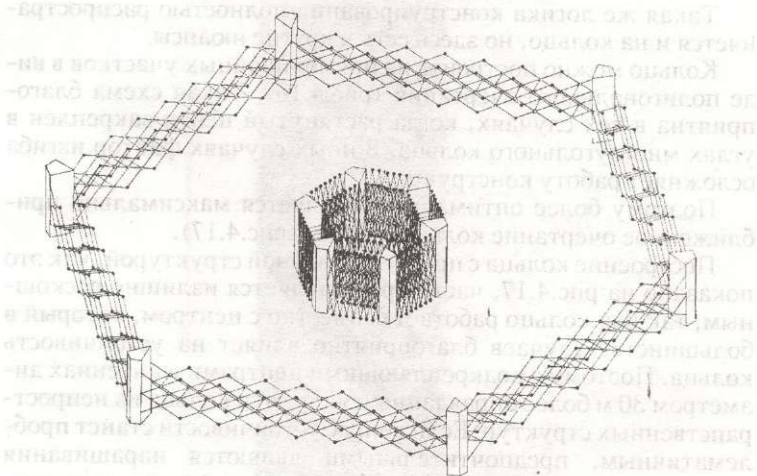


рис. 4.16

(рис. 4.14 и 4.15). Каждая схема представляет собой не простые решения, которые требуют дальнейших исследований, что приводит к появлению новых компоновок, эффектов и оптимальных конструкций.

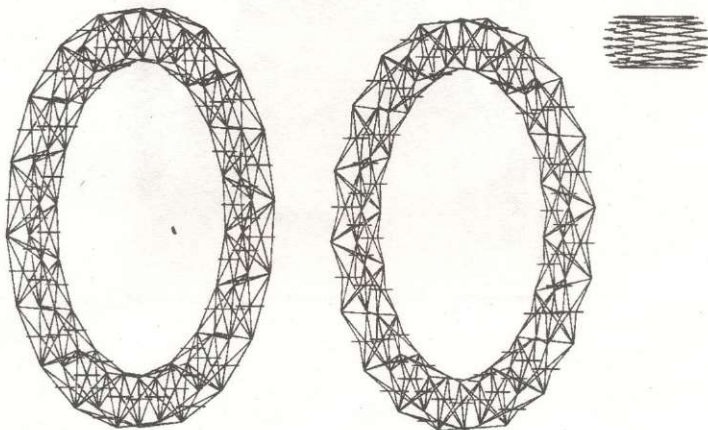


рис. 4.17

Такая же логика конструирования полностью распространяется и на кольцо, но здесь есть и другие нюансы.

Кольцо можно построить из прямолинейных участков в виде полигонального очертания (рис.4.16). Такая схема благоприятна в тех случаях, когда растянутый центр закреплен в углах многоугольного кольца. В иных случаях фактор изгиба осложняет работу конструкции.

Поэтому более оптимальным является максимально приближенное очертание кольца к кругу (рис.4.17).

Построение кольца с пространственной структурой, как это показано на рис.4.17, часто представляется излишне роскошным, так как кольцо работает совместно с центром, который в большинстве случаев благоприятно влияет на устойчивость кольца. Поэтому с подкрепляющими центрами в антеннах диаметром 30 м более оправданным являются кольца из непространственных структур. Если вопрос устойчивости станет проблематичным, предпочтительными являются наращивания сечения или наличие гибкого обрамления, которое не осложнит конструкции и будет соответствовать характеру трансформативности и иметь большой эффект.

Предложенные принципы построения и подкрепления опорных каркасов апробированы и подкреплены теоретическими и экспериментальными исследованиями, которые будут рассмотрены в работе.

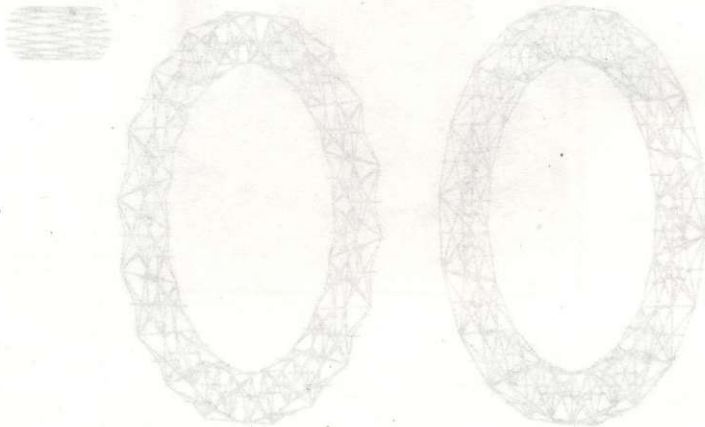


рис.4.17

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ ✧ ТЕРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



## 4

## Основные конструктивные схемы КТРТ–30

Логически для кольцевой трансформируемой системы приоритетным является схема в виде разворачиваемого кольца повышенной жесткости с вантовым или вантово–стержневым центром, обладающим естественным свойством трансформации.

Понятно, что только из простейших однослойных вантовых систем в космосе не представляется возможность создания параболоидных поверхностей, что заведомо требует применения двухслойных или других схем.

В качестве простого случая для анализа рассмотрим двухслойную вантовую конструкцию.

Для фиксации формы ванты при растяжении, как правило, должны иметь кривизну противоположных знаков. Но такие решения для больших радиотелескопов требуют нарастания толщины опорного кольца, что осложняет техническое решение вопросов конструирования и сохранения минимальных размеров транспортногo пакета.

Именно поэтому была изобретена новейшая вантово–стержневая пространственная структура, в которой реализована идея создания купола из гибких нитей и коротких стержней в виде “летающих элементов”, не соприкасающихся друг с другом.

Такая структура представляет собой ярусную систему. Каждый круговой ярус состоит из перпендикулярных к плоскости кольца стержней, расположенных по концентричной окружности, которые концами в направлении периферии связаны в двух опорных узлах с помощью вант. Кроме того, один слой узлов стержней обрамлен тросами, а другой слой образует опорные узлы для следующего яруса (рис.4.18).

Такая конструкция, независимо от диаметра антенны, не требует нарастания длины стержней и толщины кольца. При этом она сохраняет все преимущества применения вантово–стержневых систем в трансформируемых сооружениях.

Особенно надо отметить, что предложенная конструкция не имеет кинематических перемещений, и она работает по аналогии преднапряженных ферм. Но вместе с этим, ярусная структура обуславливает падение силы натяжения от кольца к центру по принципу геометрической прогрессии.

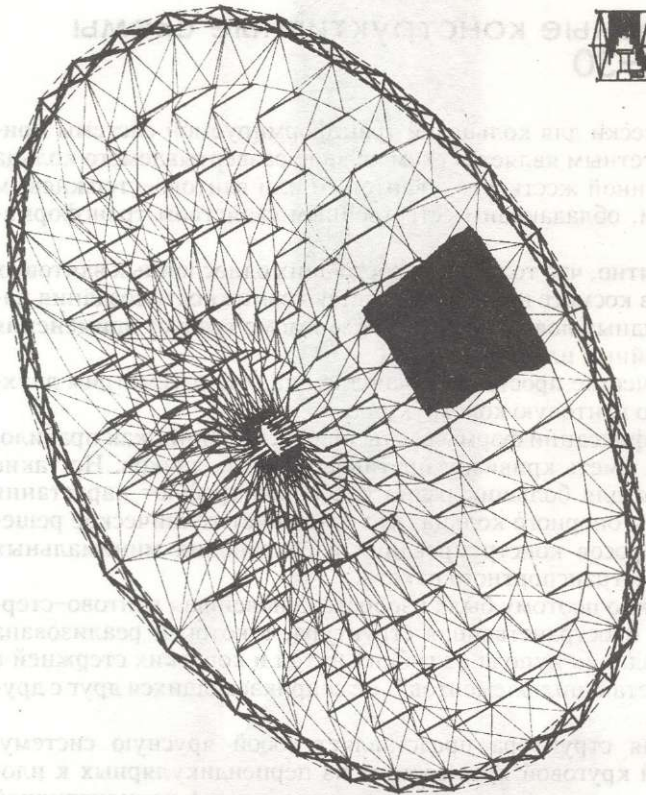


рис. 4.18

Целиком ярусная вантово-стержневая купольная конструкция является новым прогрессивным и весьма оригинальным решением, которое открывает новые возможности архитектурно-конструктивного проектирования зданий и сооружений в самых разных условиях и областях строительства.

В целях аннулирования недостатков ярусной системы были совмещены положительные признаки вантово-стержневой купольной и традиционной двухслойной вантовой конструкции.

Таким подходом было резко сокращено количество ярусов и они установлены более отдаленно от центра – в зонах на



Э. В. МЕДЗМАРИАШВИЛИ ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИМ ✧ ПЛАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

подступах кольца, где наращивание глубины чаши максималь-  
но выражено, а к центру устроена обыкновенная двухслойная  
вантово-стержневая система по звездчатой схеме.

Также для уменьшения количества ярусов к кольцу добав-  
лены стойки, вершины которых служат узлом крепления вант  
и снимают необходимость устройства периферийного кольца

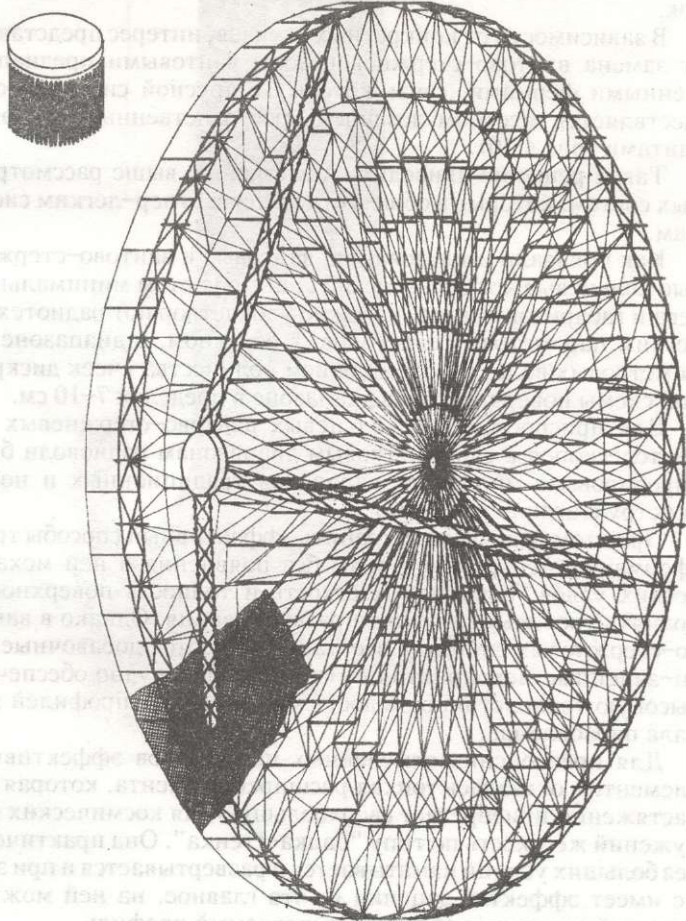


рис. 4.19

(рис.4.19).

Для повышения технологичности изготовления, кольцо решено в плоском варианте с тремя опорами для крепления облучателя, расположенного в фокусе парабооида, который образован из отражающего сетеполотна.

В рассмотренном варианте внутри ярусной системы, как уже отмечалось, устроена вантово-стержневая система. Стержни представлены в виде параллельно расположенных распорок.

В зависимости от конкретных случаев, интерес представляет замена вантово-стержневой зоны вантовыми преднатяженными фермами, связь которых с ярусной системой осуществляется жестким ломаным пространственным ободом и вантами (рис.4.20).

Такое решение приводит к облегчению выше рассмотренных систем, которые в общем относятся к супер-легким системам.

Как показали исследования, вантовые и вантово-стержневые кольцевые космические антенны, с учетом минимального веса и габаритов пакета, надежно удовлетворяют радиотехническим параметрам телескопов, в основном, в диапазоне дециметровых волн, а с насыщением количества ячеек дискретной схемы поверхности – в диапазоне в пределах 7–10 см.

Для приспособления кольцевых вантово-стержневых радиотелескопов к сантиметровым диапазонам радиоволн было апробировано множество вариантов традиционных и новых конструкторских решений.

При этом надо было сохранить эффективный способы трансформации центральной зоны без появления в ней механических узлов, повысить жесткость и точность поверхности, поднять уровень надежности развертывания. Однако в вантово-стержневых системах все-таки требуются добавочные анти-зацепные мероприятия и, что главное, трудно обеспечить высокую технологичность достижения точных профилей зеркала парабооида.

Для преодоления отмеченных недостатков эффективным элементом оказалась тонкая расширенная лента, которая при растяжении приобретает сверхбольшую для космических сооружений жесткость по типу “балка-стенка”. Она практически без больших усилий наматывается и развертывается и при этом не имеет эффектов зацепки и, что главное, на ней можно с большой точностью обработать желаемый профиль.

Именно такие радиальные лепестки были устроены в центральной части, которая совместно с рассмотренными структу-

Э.В. МЕДВЕДЕВ И А.И. ШИШОВЫЙ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУК ✧ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

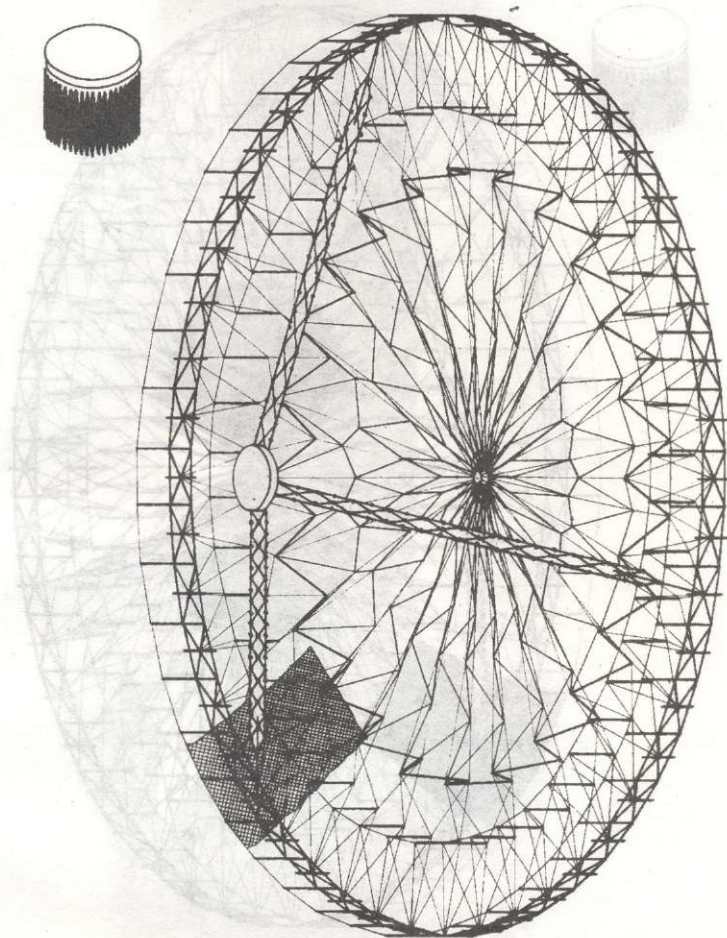


рис. 4.20

рами образует комбинированные системы (рис. 4.21).

Введение указанных элементов открывает широкие перспективы вариации эффективных схем для достижения желаемых параметров и свойств конструкции.

Для повышения общей устойчивости лепестков совместно с закрепленным на них сетеполотном принято решение монтировать их во взаимосвязи с вантовыми поясами не лучеоб-

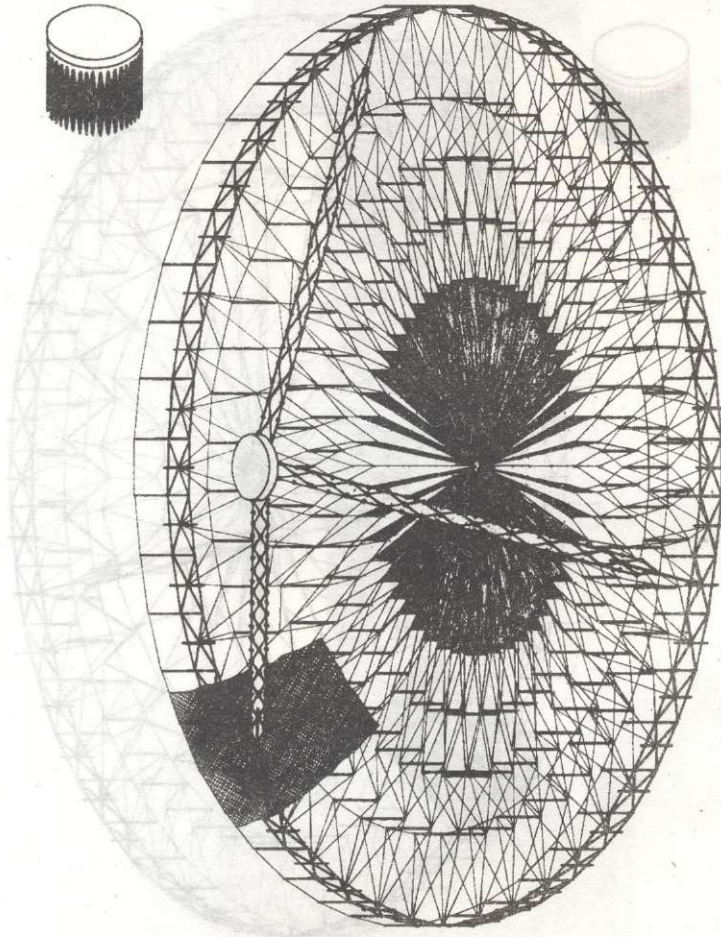


рис. 4.21

разно, а винтообразно (рис.4.22).

Изменение в центральной зоне продиктовано тем, что по радиотехническим показателям в радиотелескопах более активными являются именно они. Принятые решения стабилизировали годность радиотелескопов к диапазонам радиоволн от 5 до 10 сантиметров. Но для решения требований поставленных задач требуется повышение точности для обеспечения работы

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУКИ \* ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИШВИЛИ ✧ ТЕЛАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

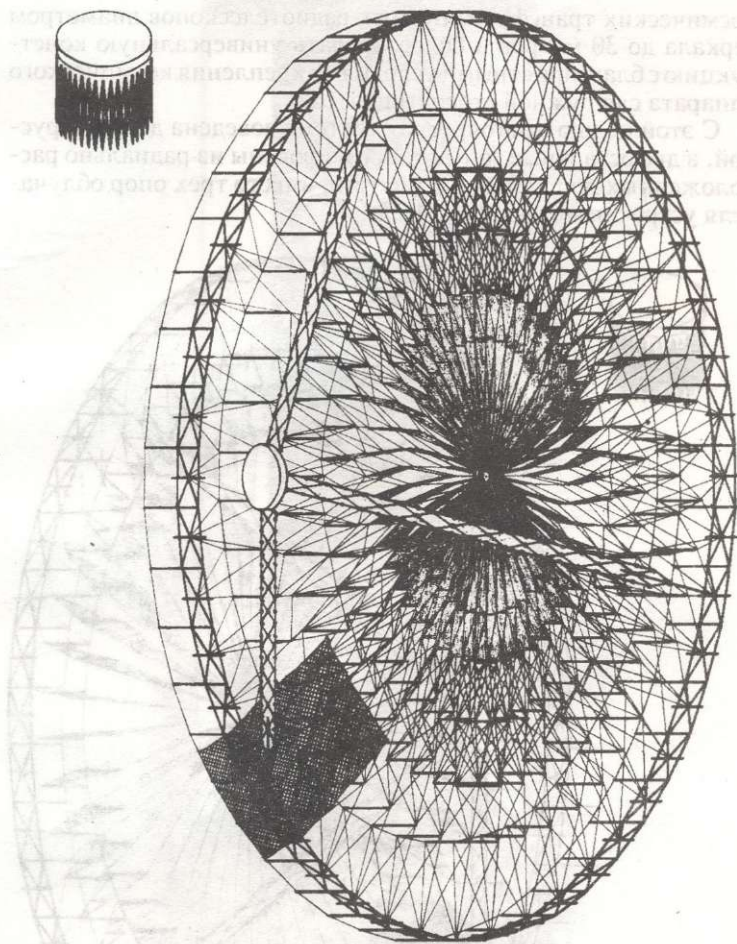


рис. 4.22

антенны на 2–5 сантиметровых радиоволнах.

Именно этим и объясняется дальнейшее изменение схемы, которая в основном отражает стремление расширения зон повышенной точности и жесткости. При этом исключена возможность аномалий при разворачивании с сохранением весовых и геометрических параметров пакета. Усилена фиксация контейнера облучателя над экраном. Это позволило также, для

космических трансформируемых радиотелескопов диаметром зеркала до 30 метров и более, создать универсальную конструкцию с благоприятными условиями крепления космического аппарата с наружной стороны центра.

С этой целью многоярусная система доведена до одноярусной, а две остальные зоны сконструированы из радиально расположенных лепестков. Кроме того, вместо трех опор облучателя устроены четыре (рис.4.23).

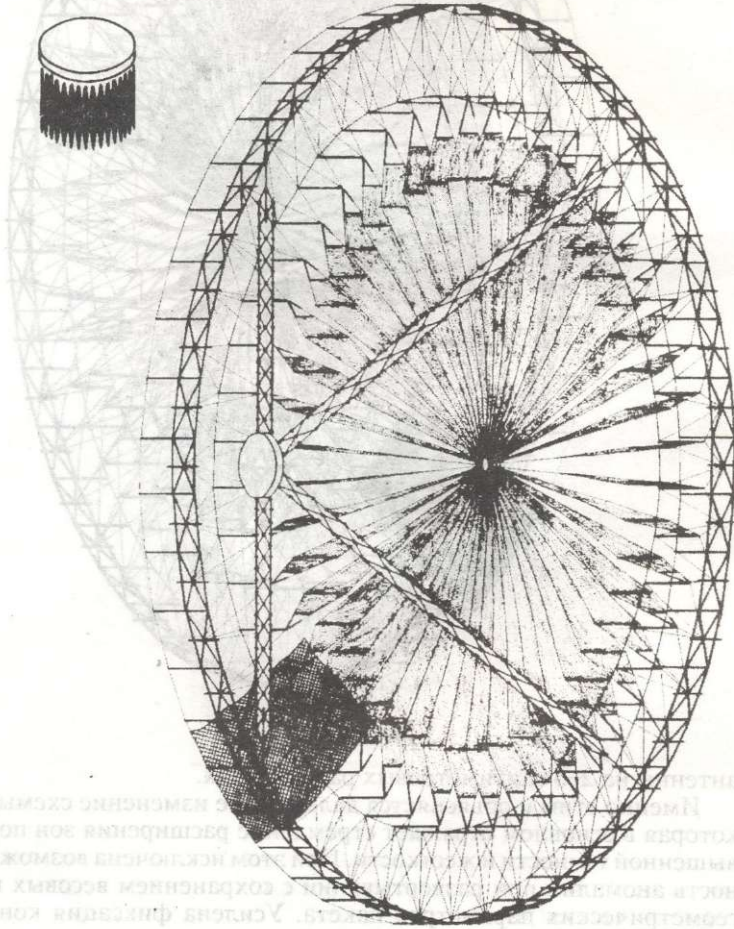


рис. 4.23

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИНИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



Как и в предыдущих решениях, в модифицированном варианте для повышения общей и местной устойчивости лепестков и удачной аппроксимации контуров параболоида экрана, лепестки образуют звездчатую структуру из ромбических ячеек (рис. 4.24). Для складывания такой схемы винтообразно направленные лепестки ломаного очертания снабжены длинорегулируемыми приспособлениями, которые исчерпывают свой

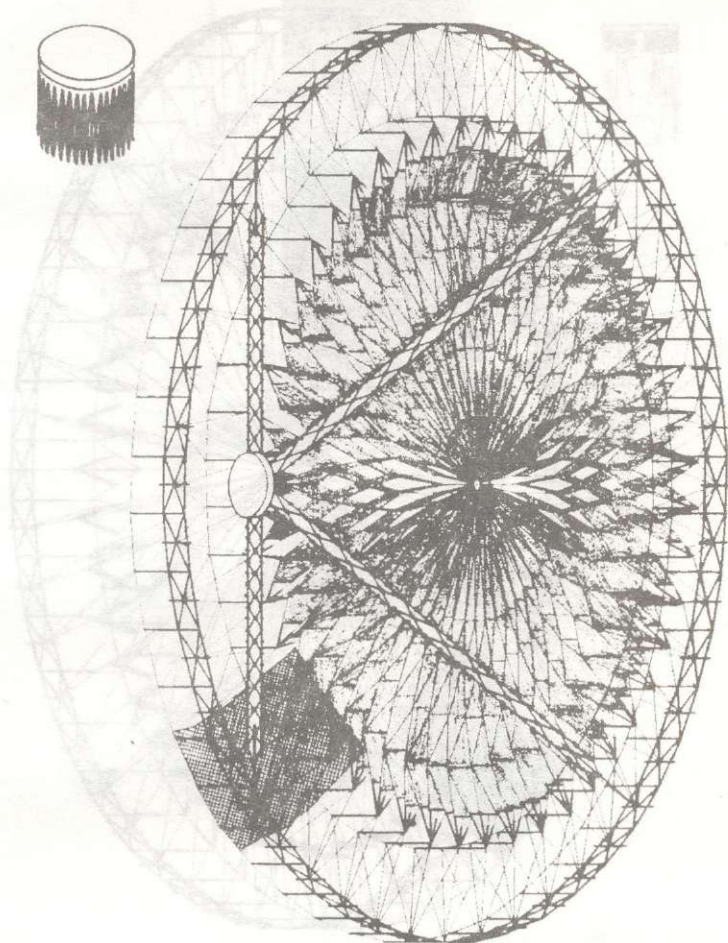


рис. 4.24

ресурс удлинения при фиксации проектной формы или заведомо имеют квазигеометрию, не препятствующую образованию плотного сложенного пакета конструкции.

Процесс расширения зоны повышенной жесткости и точности можно осуществить до самого кольца с применением лучевого и винтообразного взаимопересеченного расположения лепестков с разными вариантами геометрии крепления

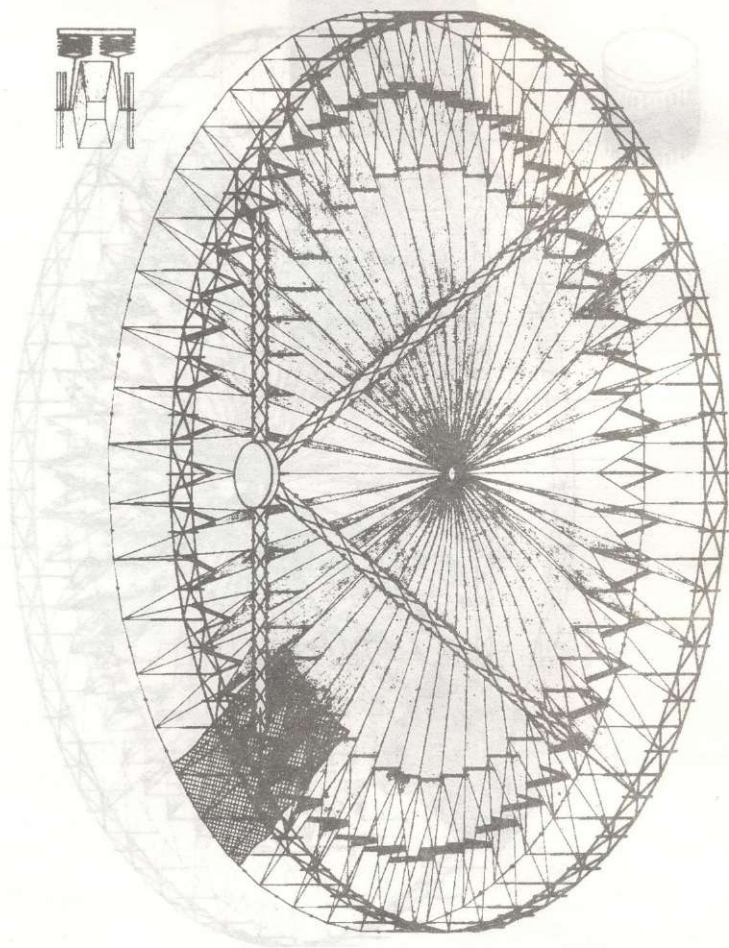


рис. 4.25

Э. В. МЕДВЕДЕВА И В. И. МАРИШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДЗ. МАРИНИВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

лепестков к кольцу (рис.4.25, 4.26 и 4.27).

Оценивая оба направления устройства лепестков, надо отметить, что повышение устойчивости кольца в большей степени достигается при радиальном расположении лепестков, чем при вантово-перекрестном, который, со своей стороны, повышает точность аппроксимированного каркаса экрана.

Во всех случаях с применением лепестков резко улучшает-

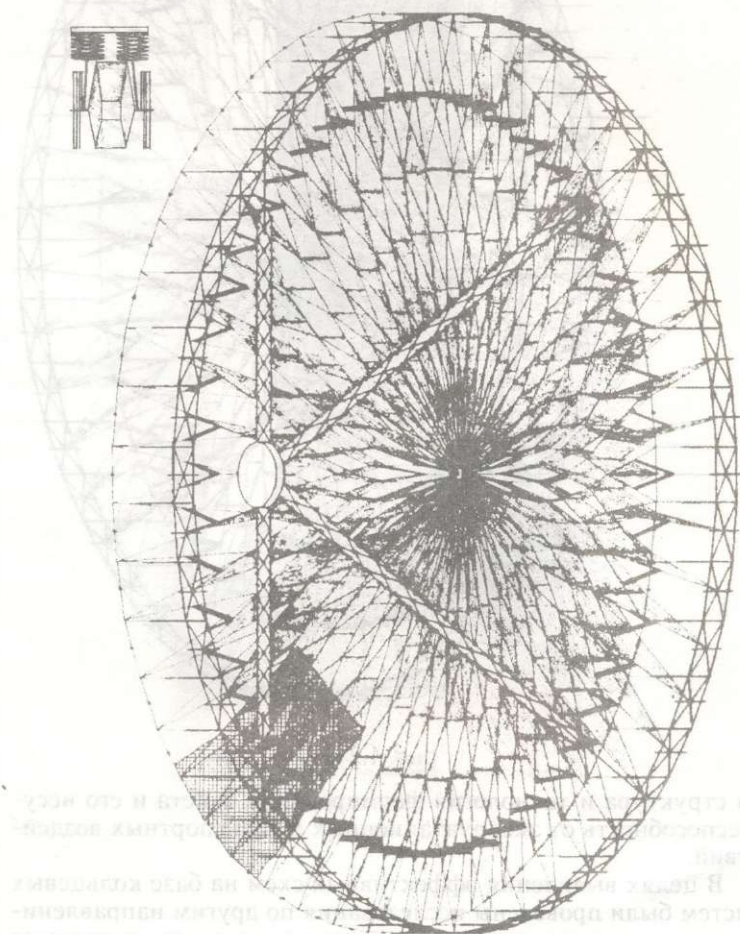


рис. 4.26

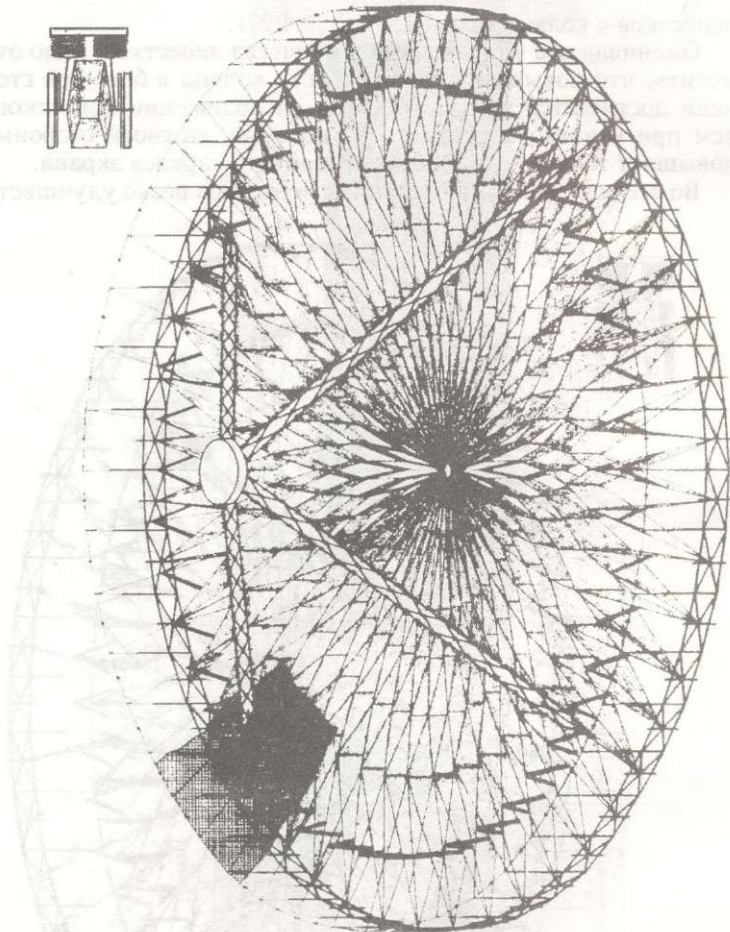


рис. 4.27

ся структура и технология формирования пакета и его несущеспособность от эксплуатационных и транспортных воздействий.

В целях выявления эффективных схем на базе кольцевых систем были проведены исследования по другим направлениям, среди которых особое внимание заслуживают конкретные решения как по однокольцевым, так и по многокольцевым

Э.В. МЕДЗМАРИШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

конструкциям.

Для повышения общей и местной жесткости зеркала, ярусный вантово-стержневой вариант был видоизменен. Пояса и контуры крепления сетеполотна изготовлены из так называемых ломающихся саблей-стержней определенной криволинейного профиля. Кроме повышения жесткости, применение жестких контуров крепления сетеполотна освобождает кольцо

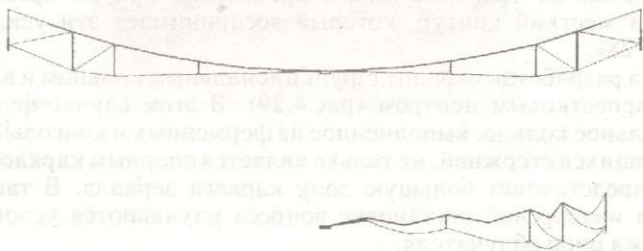
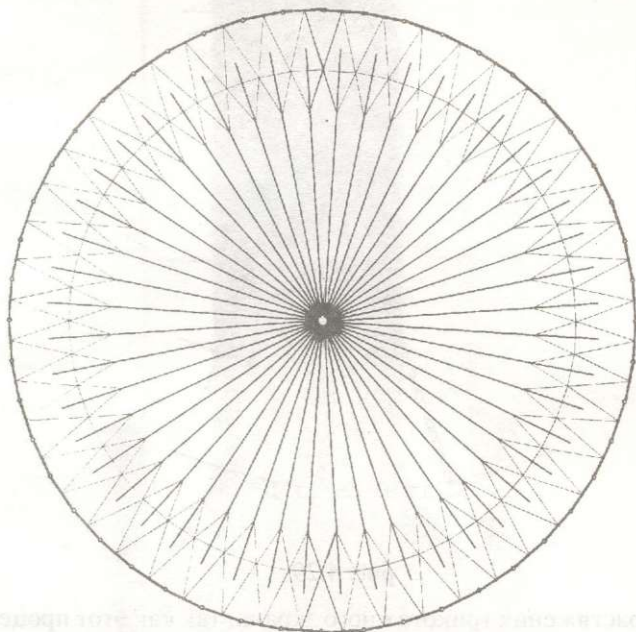


рис. 4.28

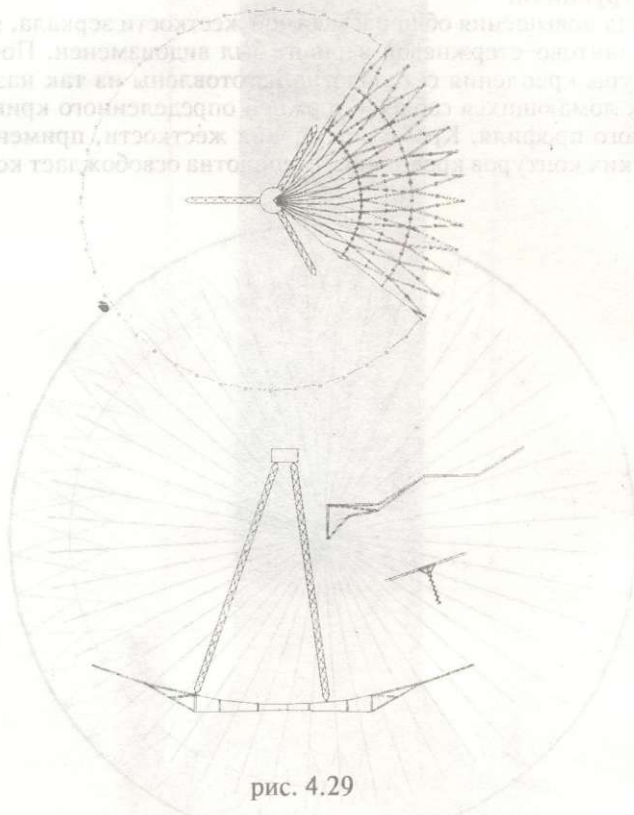


рис. 4.29

от сил растяжения трикотажного экрана, так как этот процесс, независимо от трансформации, происходит при их креплении на жесткий контур, который воспринимает эти усилия (рис.4.28).

Был разработан вариант с функциональным кольцом и вантово-лепестковым центром (рис.4.29). В этом случае функциональное кольцо, выполненное из ферменных и консольных ломающихся стержней, не только является опорным каркасом, но и представляет большую зону каркаса зеркала. В такой весьма интересной постановке вопроса улучшаются условия монтажа опор облучателя.

Рассмотрен также вариант двухкольцевой системы из вантово-лепестковой комбинированной системы, имеющей на-

Э. В. МЕДЗМАРИАШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДЗМАРИАНЦЫ И ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

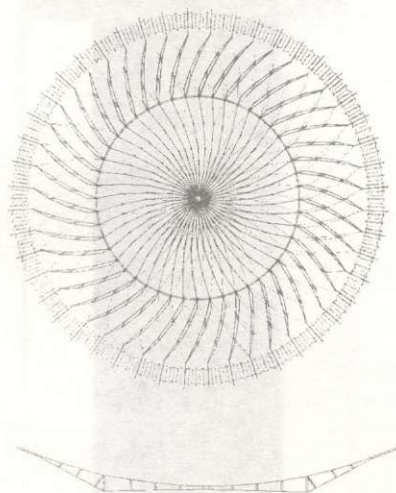


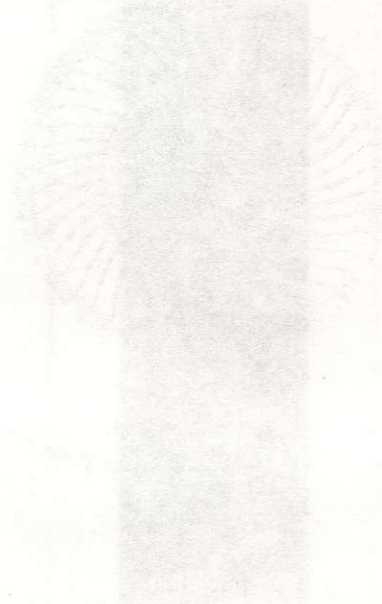
рис. 4.30

ружное кольцо, наклонно ориентированное в пространстве, построенное принципиально по другой структуре (рис.4.30).

Выбор оптимальных вариантов и базовой конструкции для космического трансформируемого радиотелескопа диаметром зеркала 30 м – КТРТ-30 – зависит от радиотехнических требований, транспортных средств, параметров космического аппарата, орбиты, технологических и технических возможностей, конструктивных материалов, теоретической и экспериментальной базы исследования, финансирования и сроков программы.

Именно с таким подходом были выбраны варианты по созданию штатных образцов КТРТ-30.

A/A



...входит в состав...  
...структуры...  
...составляющих...  
...элементов...  
...системы...  
...объекта...  
...создания...  
...КТРТ-30...

Э. В. МЕДЗМАРИШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



## 5 Конструкции космических трансформируемых радиотелескопов диаметром зеркала 30 метров КТРТ.30

Конструкция космического трансформируемого радиотелескопа разработана в разных вариантах [44], [90], [93], [96], [106].

Каждое решение соответствует конкретным функциональным и эксплуатационным параметрам с учетом особенностей технологической и технической базы построения системы.

Комплекс теоретических расчетов с применением стандартных программ для ЭВМ и разработанных оригинальных методик ([8], [55]) моделирования процессов механики развертывания и функционирования конструкций, наряду с результатами экспериментальных исследований, обеспечил все параметрические данные для проектирования образцов космических трансформируемых радиотелескопов.

Последовательность рассматриваемых вариантов соответствует нарастанию требований по отношению к точности, надежности и технологичности конструкции космического трансформируемого радиотелескопа диаметром зеркала 30 метров.

### 1

## Кольцевая ярусная конструкция КТРТ.30.ОРА.1.30

Основу конструкции представляет предложенная схема ярусной вантово-стержневой купольной системы.

Конструкторская разработка радиотелескопа диаметром зеркала 30 метров в диапазоне сантиметровых радиоволн показала перенасыщенность в рефлекторе вантово-стержневых элементов, ярусов и ячеек в целях требуемой дискретизации контуров экрана для удовлетворения радиотехнических требований.

Для сантиметровых радиоволн количество ярусов 30-мет-

ровой системы требуется не менее пятнадцати, что, со своей стороны, для полноценного растяжения вантовых элементов ярусов как преднапряженной системы резко повышает номинальную силу растяжения центра кольца. Это объясняется тем, что, как уже отмечалось, потеря сил растяжения в ярусах уменьшается по принципу геометрической прогрессии. Однако можно было манипулировать процессами с помощью комбинации растяжения кольца и обжатия с центра. Но во всех случаях перенасыщенность вантово-стержневых элементов остается отрицательным признаком как с точки зрения технологичности изготовления и надежности развертывания, так и достижения точности поверхности экрана и измельчения граней и механических систем кольца.

Такая отрицательная оценка структур строения конструкции для антенн диаметром 30 метров в сантиметровом диапазоне радиоволн не является достаточной для отказа от ярусной схемы с учетом тех достоинств, которые она имеет.

Теоретические исследования и конструкторские оценки показали, что для больших и точных антенн преимущество строения ярусной системы вполне сохраняется для несущего каркаса зеркала крупноячейистой системы. Она является и точной базой для надстройки разных, более измельченных структур в виде дискретизированных контуров экрана в целях крепления и регулирования геометрии отражающей поверхности радиотелескопов.

Для ярусных систем в пределах диаметра до 30 метров оптимальным является силовое нагружение растягивающего кольца до пяти ярусов. Количество граней кольца с учетом наименьшего расчленения системы, габаритов транспортного пакета, количество опор облучателя, ячеек в каждом ярусе и требуемой растягивающей силы в периферийных опорных узлах наружного яруса допустимо от 30 до 50 единиц.

Длина т.н. "летающих стержней" условно определяется высотой транспортного пакета с учетом удовлетворения обязательного растяжения всех вантовых элементов системы, напряженно-деформируемой картины, технологией ее изготовления, монтажа и регулирования поверхностей и соответствия геометрии ячеек ярусов. В разных ярусах их длина может быть одинаковой или разной. Это зависит от вариантов проектирования.

На основе общих требований, с учетом отмеченных особенностей, создана конструкция с 15-метровым диаметром кольца. Она является уменьшенным количественно и качественно идентичным вариантом кольцевой ярусной конструкции кос-

мического трансформируемого радиотелескопа диаметром зеркала 30 метров – ОРА.1.30(15) (рис.5.1).

Измельченная структура гибких вантовых контуров крепления и регулирования геометрии отражающего экрана, кото-

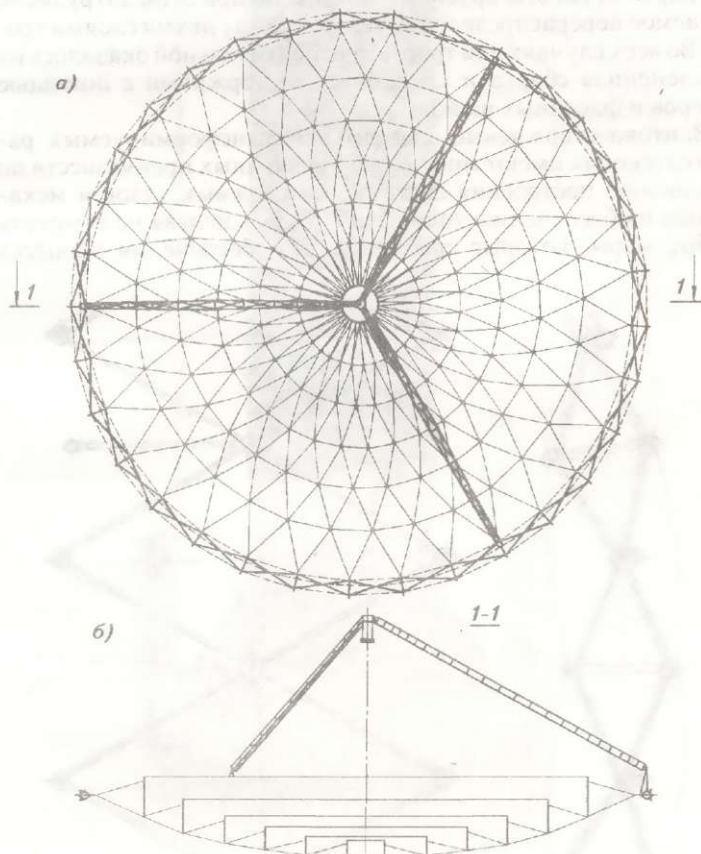


рис. 5.1

рая в целях требуемой дискретизации параболоида надстраивается на базовой ярусной системе, может быть решена как в двухслойном, так и в однослойном варианте кольцевых тросов. Во всех случаях устройство регулировки координат расположено под контурными тросами, которые при однослойном

варианте совмещают также функции несущих круговых кольцевых вант ярусов. Здесь особо надо отметить, что при разделении несущих и контурных функций при двухслойном варианте удачно сохраняется естественно систематизированная картина работы ярусной системы, но при этом затруднено желаемое перераспределение усилий между двумя слоями тросов. Во всех случаях для тросов предпочтительной оказалась их расчлененная сборка и крепление со стержнями с помощью анкеров и фасонных шайб.

Вантово-стержневые элементы в трансформируемых радиотелескопах имеют множество отмеченных преимуществ по упрощению построения системы без сложных узлов и механизмов и обеспечению точности. Но здесь нельзя не отметить особые меры, которые требуются для обеспечения процесса

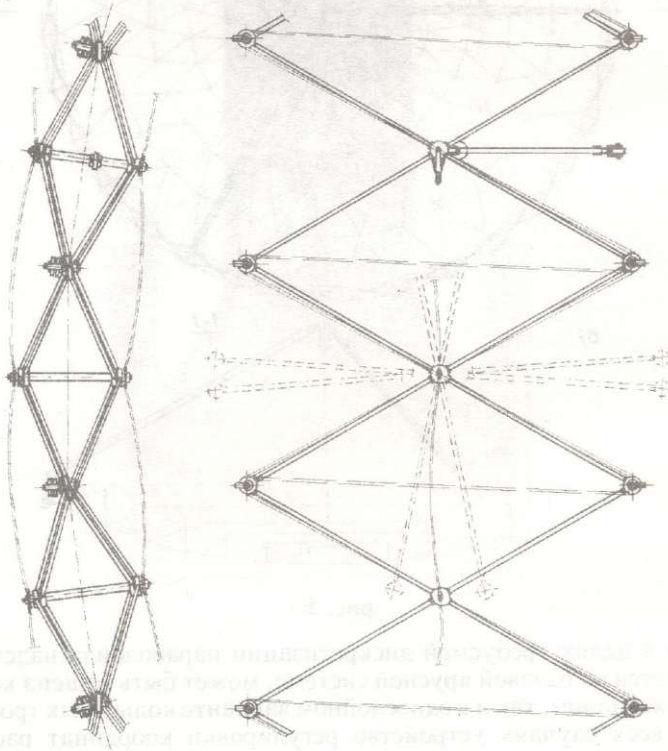


рис. 5.2

трансформации без зацепок тросов и стержней. Для этого существует и предложено много способов. В том числе и наматываемые катушки, посадочные технологические трубки и другие. Но, несмотря на определенные перерасходы материала, более приемлемым является зашивание тросов как в экранной сетке, так и в технологической сетке, специально применяемых для противозацепок.

Опорное кольцо представляет собой пространственную систему в виде ножниц, соединенных между собой сферическими узлами (рис.5.2). Каждый перекрестный элемент титановых трубчатых стержней собран по ромбической схеме. Перекрещивание двух элементов происходит в центральном цилиндрическом шарнире, на оси которого с обеих сторон закреплены фиксирующие тросы. При надобности тросы-ограничители устроятся в верхних и в нижних сферических узлах кольца по всей окружности. В узле цилиндрических шарниров с внутренней стороны закреплены анкера центра антенны. В этих узлах в местах опирания опоры облучателя устроены стабилизаторы-ориентеры.

Раскрытие кольца происходит с помощью тяговых тросов, расположенных по схеме полиспаст. Тяговые тросы по разным схемам, с учетом оптимальности выбора, наматываются на три ролика с помощью трех электродвигателей, каждый мощностью 480 Вт. Кольцо при этом в каждом тяговом узле может развить полярную сосредоточенную силу до 60 кг.

Тяговый трос проведен по роликам, устроенным в сферических узлах присоединения крестообразных элементов. Для ограничения степени свободы сферических узлов и в целях обеспечения равномерного развертывания кольца, ориентация осей сферических узлов в пространстве в процессе трансформации ограждены специальными накладками, имеющими направляющие отверстия по расчетному криволинейному контуру.

Закрепленные на кольце, опоры изготовлены в виде двояной системы пантографических элементов, выполненных из дюралевых трубчатых профилей. Раскрытие опор происходит с помощью тросов, расположенных на поясах.

Разработан вариант единой тросовой системы развертывания кольца и опор фокального контейнера.

Сложенный пакет ОРА-1 имеет цилиндрическую форму диаметром 1,2 м и высотой 1,5 м. Развертывание кольца весом 140 кг и диаметром 15 м происходит за 7,5 сек.

Как показали исследования, конструкция ярусной системы по радиотехническим оценкам, несмотря на оригинальность

принципиального решения может показать максимальную эффективность радиотелескопов в дециметровом диапазоне радиоволн для антенн с зеркалом диаметром 30–50 метров и в метровом диапазоне для супер-больших антенн размерами 100 и более метров.

Несмотря на легкий вес, простоту способов изготовления, монтажа, достижения точной формы и минимальные размеры пакета, предложенная система все-таки имеет ряд недостатков. Для этой системы требуется большая сила растяжения центра.

Приспособление для противозацепок, большая степень свободы центра при разворачивании, сравнительно низкая частота колебаний, а также специфика изготовления прецизионных вантовых элементов, малая жесткость опор и отсутствие дублирующих систем в механизмах разворачивания создают определенные трудности.

Это обуславливает для больших космических радиотелескопов в сантиметровом диапазоне радиоволн рассмотрение вариантов с повышенными техническими и эксплуатационными параметрами.

## 2 Кольцевая ярусная вантово-стержневая лепестковая конструкция КТРТ.30.ОРА.3.30

**В** целях сохранения преимущества ярусной кольцевой конструкции и использования положительных сторон вантово-стержневых систем в космических трансформируемых радиотелескопов разработана остронаправленная радиоантенна диаметром зеркала 30 метров для космического базирования – КТРТ.30.ОРА.3.30 в разных модификациях.

Основное отличие указанного решения по сравнению с КТРТ.30.ОРА.1.30 заключается в конструктивном исполнении кольца и в схеме внутренней части каркаса зеркала (см. рис.4.21).

В целях подбора оптимальных решений для базовых конструкций штатных образцов радиотелескопов космического базирования, при проектировании образца конструкции кольцевой ярусной вантово-стержневой лепестковой антенны, были реализованы, даже с определенным избытком, возможные варианты узлов, деталей элементов и частей средств развертывания и фиксации, способы повышения жесткости, точности геометрии и надежного процесса трансформации и т.д. Поэтому конструкция КТРТ.30.ОРА.3.30 была названа также экспериментальным образцом. Это объясняется не только циклом испытаний и исследований, проводимых на базе конструкции, но и логикой ее конструирования в целях экспериментальной проверки вариантов возможных решений.

Независимо от вида модификации практически все варианты состоят из следующих частей: раскрывающееся опорное силовое кольцо повышенной жесткости из крестообразных шарнирно-связанных элементов, разворачиваемых электродвижками и упругими силами; вантово-стержневая и лепестковая комбинированная центральная часть зеркала, обеспечивающая податливость складыванию и разворачиванию за счет упругости и гибкости элементов составляющих конструкцию и дающая возможность регулирования поверхности зеркала после сборки конструкции; пространственно-ферменные разворачиваемые опоры облучателя, связанные между собой на вершине, а другими концами защемленные на кольце по схеме ребер трехгранной пирамиды и разворачиваемые за счет уп-

ругих сил; сетеполотно экрана, закрепляющееся на вантово-стержневой лепестковой комбинированной конструкции зеркала; фокальный контейнер с системой облучателя и космический аппарат, расположенный над фокальным контейнером в зоне затемнения экрана.

От всех остальных модификаций отличается конструкция космического кольцевого ярусного вантово-стержневого радиотелескопа диаметром зеркала 30 метров КТРТ.30.ОРА.2.30, в котором отсутствует лепестковая часть центра. Такая конструкция, имеющая геометрическую структуру, построенную по пространственной схеме (см. рис.4.19), изготовлена и испытана.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали большое преимущество конструкции по уменьшению массы изделия и размеров сложного пакета. Такое конструктивное решение с сохранением положительных сторон в радиотелескопах диаметром зеркала 30 метров обеспечивает функционирование антенны и в дециметровом диапазоне длины радиоволн.

Именно поэтому, в целях повышения точности зеркала и обеспечения качественного приема и передачи электромагнитных волн длиной в сантиметровом диапазоне, основное внимание было уделено созданию системы с комбинированным лепестковым центром.

Принципы конструирования таких систем, как отмечено, опираются на наличие разворачиваемого кольца в виде силового опорного контура. Учитывая роль центральной части зеркала по повышению устойчивости кольца в своей плоскости, ввиду большого диаметра, все-таки предлагается подкреплять ее регулярными тросовыми системами по всему контуру в виде обода.

Такой способ качественно повышает устойчивость кольца в своей плоскости даже при уменьшении веса погонного метра кольца.

В других случаях обязательным становится усиление самого кольца, что удачнее осуществляется наращиванием геометрических параметров поперечного сечения за счет пространственной структуры ее строения.

Вариант с пространственным кольцом представляет собой кольцевую систему из пространственно-трансформирующейся структуры. Пространственная трансформация кольца заключается в таком формоизменении опорного контура, когда он из сравнительно тонкостенного составного цилиндра превращается в кольцо пространственной решетчатой системы (см. рис.4.17).



В этом случае при разворачивании происходит не только нарастание окружности кольца, но и расширение ее поперечного сечения вдоль плоскости кольца. Конструкция такого кольца может представлять собой также систему пересекающихся в цилиндрических узлах стержней, расположенных в трех плоскостях и образующих в сечении треугольник. При раскрытии пересекающихся стержней в виде ножниц, процесс изменения геометрии происходит во всех трех плоскостях. Для стабилизации и устойчивости формообразования, а также наращивания диаметра зеркала, в периферийных верхних и нижних узлах кольца, на одном – неподвижно, а на втором – со скольжением – закреплены направляющие. Такое кольцо имеет большую жесткость, и оно может развить большие растягивающие силы в центральной части зеркала с соблюдением пространственной и плоскостной устойчивости. Центральная часть зеркала представляет собой синтез оригинальной вантово-стержневой ярусной системы, вантово-стержневой двухъярусной системы и ребристо-лепестковой комбинированной системы по радиально-ромбической схеме. Совокупность совместного применения перечисленных систем опирается на логические основы конструирования.

Наибольшее ограничение по жесткости и по точности поверхности экрана от заданной геометрии требуется в центральной части чаши радиотелескопа. В связи с этим центральная часть построена из тонкостенных листовых ребер, профиль которых для нанесения сетеполотна соответствует геометрии экрана. Листовые ребра за счет растяжения превращаются в балки-стенки, характеризующиеся достаточно большими жесткостями. Для повышения жесткости в перпендикулярной плоскости лепестков им придано спиралеобразное ломаное очертание (см. рис.4.22). Грани перелома каждого лепестка усилены накладными стержнями, в которых попарно, наподобие двухслойных вантовых систем с распорками, закреплены также спиралеобразные тросы противоположной навивки. Такая структура в плане создает ромбическую, так называемую “звездчатую” систему, которая при растяжении по периметру полярными силами, без изменения величины, транзитно равномерно напрягается от точки приложения силы до центра. Уменьшение свободной длины лепестков перегибами резко повышает устойчивость системы. За периферийной лепестковой частью системы устроено два пролета двухслойных вантово-стержневых систем с противоположными знаками кривизны верхнего и нижнего поясов. Такую систему можно было продолжать до самого кольца, но требуемая кривизна гибких по-

ясов для нанесения сетеполотна и вынужденная кривизна нижнего гибкого пояса с различными знаками в направлении кольца требует нарастания длин распорок, которые для данной складываемой конструкции по своим размерам осложняют условия создания компактного транспортного пакета антенны. Поэтому после двухслойной вантово-стержневой системы до опорного кольца устраивается вантово-стержневая ярусная система. Распределение усилий в предложенной системе резко отличается от картины распределения усилий в двухслойно-вантовых и ребристо-лепестковых системах. В ярусной системе сила растяжения в каждом последующем ярусе уменьшается вдвое. Такие потери усилий создают неблагоприятные условия применения множества количества ярусов. Однако, при наличии одного-трех ярусов, разработанная система становится весьма оптимальной для складываемых конструкций, т.к. в данной схеме, как уже отмечалось, для вантово-стержневых конструкций, без соприкосновения между собой жестких стержневых элементов, создается куполообразная поверхность из слоев верхнего и нижнего поясов, которые имеют кривизну одинакового знака. В этом случае такую конструкцию можно создать с небольшой высотой, что обуславливает приемлемые длины стержневых элементов для габаритов сложенного пакета антенны.

Вся описанная система центральной части с помощью пространственно расположенных вантовых оттяжек закрепляется в узлах раскрываемого кольца. Сетеполотно наносится на кольцевые тросы, которые расположены на вершинах направляющих кольца, стержнях ярусной системы, на поясах двухслойной тросовой системы и на гранях лепестков, имеющих профиль зеркала. Имея большую жесткость, пространственно-трансформируемое кольцо характеризуется увеличением собственного веса. Вес погонного метра такого кольца для 30-метровой антенны достигает 16–18 кг/м, что является довольно большим показателем для космических конструкций.

Учитывая участие центральной части зеркала в обеспечении сохранения общей устойчивости кольца в своей плоскости и возможности других более простых конструктивных способов ее повышения, был разработан вариант с обыкновенным кольцом, аналогичный показанному на рис.4.22. Данное решение имеет те же самые геометрические параметры, что и предыдущий вариант конструкции антенны. Кольцо представляет собой многогранник кругового очертания, каждая грань которого состоит из крестообразно перескающих в цилиндрическом узле стержней, концы которых связаны также цилин-

Э.В. МЕДЗМАРЯНИВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

дрическими узлами. Между этими узлами, в виде верхнего и нижнего пояса, защемлены “зонтично” раскрывающиеся стержни. Для стабилизации процесса формообразования и повышения жесткости в узлах присоединения концов крестообразно пересекающихся стержней и зонтично раскрывающихся стержней устроены направляющие. При таком решении вес кольца значительно облегчается и конструкция упрощается, что положительно влияет на показатели всей антенны. Рассматривая оба варианта, надо отметить определенную сложность изготовления винтообразных ребристых лепестков и сочлененных вантовых систем.

Поэтому, с учетом общих признаков описанных вариантов, был разработан третий вариант, который лег в основу разработки основной конструкции 30-метрового раскрываемого радиотелескопа КТРТ.30.ОРА.3.30.

Основной вариант имеет три опоры облучателя и плоско-

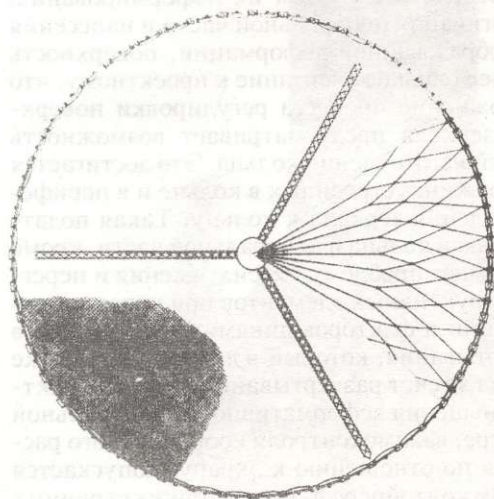


рис. 5.3

трансформируемое кольцо, в котором закреплена центральная часть в виде ярусной, вантово-стержневой и циклически-радиальной лепестковой систем (рис.5.3).

Лепестковая часть зеркала антенны обеспечивает наибольшую жесткость и точность системы. Данное решение, в отличие от тросовой системы, исключает выгиб сетеполотна в местах его закрепления. Однако выгиб сетки в пролете все же наблюдается, но, с учетом сравнительно малых расстояний между лепестками, по сравнению с требуемыми величинами, для радиотехнических целей и добавочных местных конструктивных решений, ухудшение показателей антенны резко уменьшается.

В целом, структура центральной части зеркала, с учетом воздействия всех ожидаемых нагрузок, включая и натяжение сетеполотна с интенсивностью до 1 кг/м, является довольно жесткой конструкцией с начальными перемещениями, измеряемыми в миллиметрах. Для доведения геометрии экрана до требуемых параметров и упрощения в этих целях процесса изготовления и монтажа конструкции зеркало снабжено системой автономного регулирования координат поверхности после его укрупненной сборки. Регулировка координат поверхности достигается перемещением узла закрепления каркаса экрана вдоль оси распорных стержней. Теоретически такое изменение длины отдельного стержня должно повлечь за собой изменение геометрии соседней ячейки, а затем – и всей структуры зеркала. Практически такого эффекта не наблюдается, и в пределах 1–1,5 см можно регулировать длину каждого стержня. Для повышения прецизионности каркаса зеркала, его первоначальную геометрию, т.е. начальные размеры гибких и жестких стержней, можно определить с учетом их деформирования. При этом, после растягивания центральной части и нанесения сетеполотна за счет образованной деформации, поверхность экрана принимает более близкое очертание к проектному, что резко сокращает осложнение процесса регулировки поверхности. Конструкция зеркала предусматривает возможность погашения неточностей изготовления кольца. Это достигается с помощью тяговых пружин, устроенных в кольце и в периферийных точках закрепления зеркала к кольцу. Такая податливая система взаимосвязи кольца и центральной части, кроме вышесотмеченного, снимает проблему перенатяжения и перегрузки отдельных конструктивных элементов при неравномерном нагреве конструкции и факторов динамического удара в конце процесса развертывания, который в данной разработке доводится до минимума за счет развертывания системы электродвижками. Для уменьшения деформативности центральной части и, в какой-то мере, взаимоконтроля координатного расположения облучателя по отношению к экрану, допускается устройство в фокальном контейнере лучевых тонких струнных связей с некоторыми, так называемыми, контрольными узлами экрана.

Необходимо отметить, что процесс развертывания антенны начинается именно с развертывания опор облучателя. В начале этого процесса, для раздвижения масс космического аппарата и зеркала, антенны опоры облучателя снабжены так называемыми толкателями, которые в конце процесса развертывания опор облучателя превращаются в демпферные устройства

плавной стабилизации месторасположения аппарата и сложного пакета зеркала.

Конструкция экспериментального образца полностью охватывает практически все возможные варианты и комбинации развертывания системы на всех стадиях трансформации и фиксации формы.

Первичный импульс вывода транспортного пакета кольца и центра из статического положения и начало развертывания обеспечивает уложенное в пакет сжатое трикотажное металлическое сетеполотно экрана за счет силы пружинения. Аналогичный эффект возникает от развертывания намотанных на барабан упругих лепестков, воздействие которых на процесс развертывания продолжается значительно в большом интервале времени. С разной интенсивностью, от начала до конца трансформации, формоизменение обеспечивается пружинами, устроенными по направляющим стержням между цилиндрическими узлами на концах крестообразных элементов кольца и упругими тягами, заземленными в узлах соединения поясов, т.н. "ломающихся стержней" кольца. Для них реализуется два варианта. Первый – когда тяга работает от начала до конца процесса развертывания, а второй – с добавлением скользящих кулачков-толкателей – когда тяги с аккумулярованными упругими силами ожидают завершающей стадии трансформации и включаются в работу в близкой зоне до выпрямления поясок. В этом диапазоне перемещение ломающихся стержней обуславливают сравнительно большие усилия, вызывающие силовое раскрытие кольца и ее надежную фиксацию в конце трансформации.

Но основным силовым механизмом все-таки являются электродвижки, обеспечивающие планомерное развертывание кольца с помощью схем "винт-гайка" или "полиспаг" без динамических ударов и с возможностями автономного или автоматического управления процессом трансформации (рис.5.4 и 5.5).

Для развития больших величин растягивающих сил центра весьма эффективным является ее стягивание в узлах кольца после завершения процесса развертывания контура.

Такая система построена на механических или электромеханических принципах и может сработать по команде или автоматически.

Для повышения надежности и безотказности процесса развертывания экспериментальный образец предусматривает все возможные комбинации совместного или отдельного применения выше перечисленных средств. Однако при их сов-

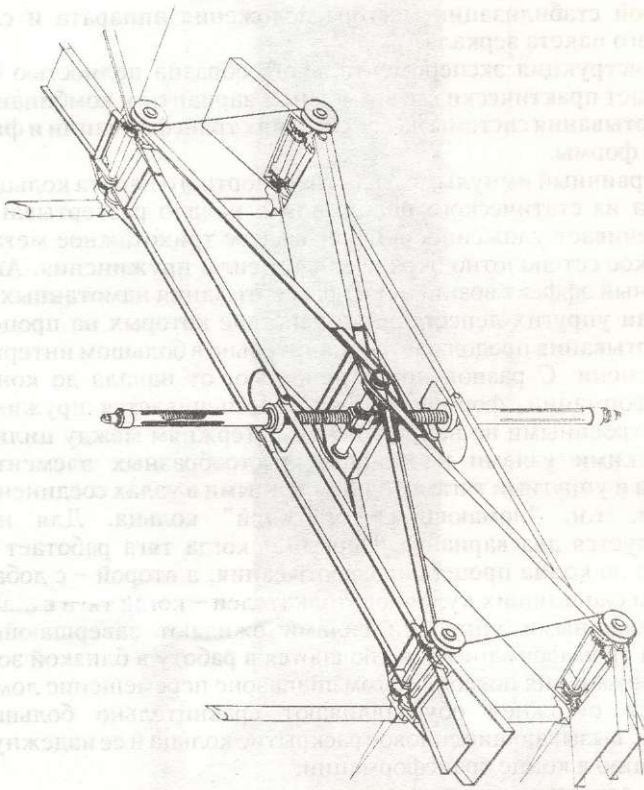


рис. 5.4

мещении, в некоторых случаях, требуются добавочные конструкции. К примеру, при совместном применении способов "полиспасть" и "пружины", может наблюдаться опережение формообразования от "пружин", что вызывает ослабление силовых тяговых тросов "полиспасть". С учетом этого экспериментальный образец снабжен специальной системой конструкции – "успокоителями", которые, по мере ослабления тяговых тросов, "убирают" их свободные провисания за счет добавочного растяжения.

Для повышения сил натяжения центра не исключается после раскрытия возможность ее стягивания в центре – в одной точке, что освободит кольцо от множества распределенных по контуру механизмов аналогичного назначения; но здесь появ-

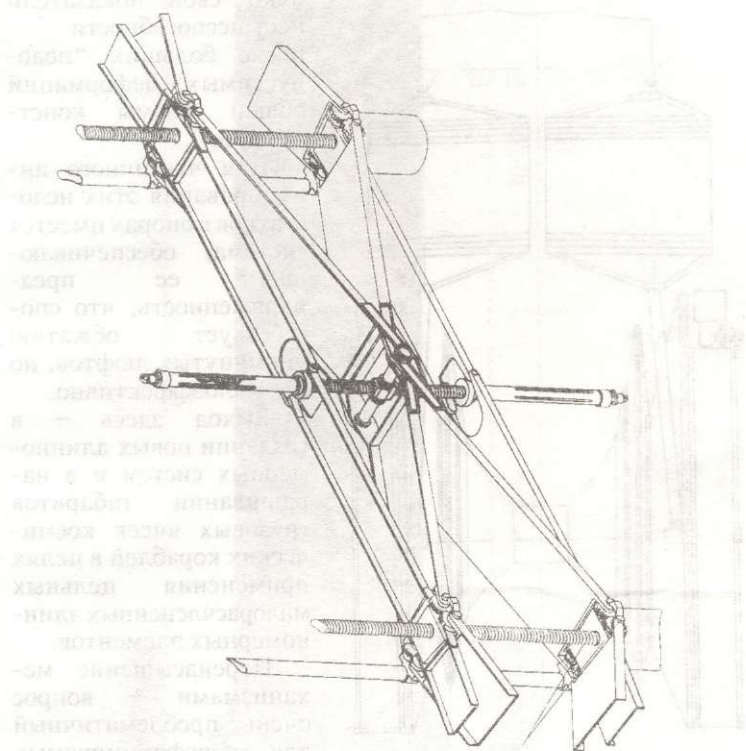


рис. 5.5

ляются другие недостатки, учитывающие особенности экрана.

Для экспериментального образца рассчитана (но не смонтирована) система разворачивания кольца и, особенно, опор облучателя с помощью реактивных движков, тем более, что антенны по всем разновидностям ее модификации являются частью в составе космического комплекса. Такой подход в новом качестве представляют телескопические системы в трансформируемых длинномерных элементах. Это особенно важно для опор облучателя, которые при требовании малых размеров транспортного пакета являются самыми расчлененными и перенасыщенными механизмами и мелкими элементами конструкции. Такая многоцепная механическая система крайне нежелательна в инженерных сооружениях, так как люфты и допуски в узлах не обеспечивают включения в работу отдельных элементов на ранних стадиях загрузки, т.е. они прояв-

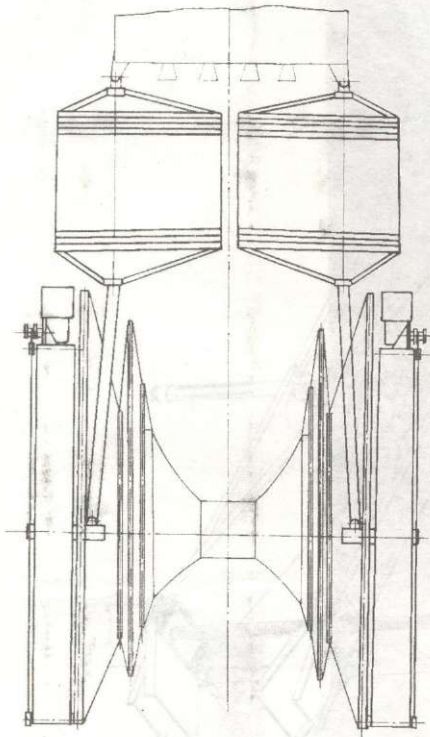


рис. 5.6

общей массе доходит до 50% и даже 55%. Особенно опасны они в зоне зеркала, где их податливость и сложность находится в обратно-пропорциональной зависимости по отношению к точности геометрии экрана и надежности достижения формы.

Логика кольцевых систем главным образом и служит для исправления этих недостатков. На примере экспериментальной конструкции можно оценить такой подход. В кольце, где сконструированы механизмы, на их долю приходится до 25% массы, а на опорах этот показатель меняется от 18 до 23%. А что главное, в зеркале, т.е. в центральной части с учетом центрального барабана, вес которого довольно значительный, механизмы от всей массы составляют лишь 9–15%. В общем в изделии такой показатель не превышает 27%.

Возвращаясь к проблеме облегчения веса, особо надо отме-

ляют свои показатели несущеспособности после больших “недопустимых” деформаций общей формы конструкции.

Для частичного аннулирования этих недостатков в опорах имеется система, обеспечивающая ее преднапряженность, что способствует обжатю упомянутых люфтов, но это малоэффективно.

Выход здесь — в создании новых длинномерных систем и в наращивании габаритов грузовых ячеек космических кораблей в целях применения цельных малорасчлененных длинномерных элементов.

Перенасыщение механизмами — вопрос очень проблематичный для трансформируемых конструкций. В известных решениях их доля в



тить оригинальную систему из односторонних связей, обрамляющих внутренний контур кольца, схема которой дается в разделе экспериментальных исследований. Система тросов в транспортном пакете намотана на ролики и при трансформации, не создавая трудностей формообразования, разматывается, а в конце, определенным образом, фиксирует проектное положение кольца, включаясь в работу по повышению общей устойчивости опорного контура.

Первостепенное значение имеют компоновка и размеры транспортного пакета. Для экспериментальной конструкции разработан вариант пакета с наружной установкой опор облучателя (рис.5.6). Предусмотрен и более компактный вариант, когда опоры размещаются внутри цилиндра сложенного кольца.

Конструкция кольцевого вантово-стержневого лепесткового радиотелескопа рассчитана как на создание автономного спутника, так и, преимущественно, на крепление к космическому аппарату с фокальным контейнером (рис.5.7).

В сложенном состоянии цилиндр имеет диаметр 2 метра и высоту 2 метра. Время развертывания – 35 секунд. Сила натяжения центра в каждом узле достигает 150Н. А интенсивность натяжения сетеполотна к периферии составляет 4–6 Н/М.

Масса кольца составляет 700 кг, в том числе механизмов – 205,02 кг. Эти показатели для опор и центра следующие: опоры – 160,25 кг (43,65 кг). Центр (лепестки, тросы, стержни, барабан) – 208 кг (29,77 кг). В итоге без движков КТРТ.30.ОРА.3.30 весит 1068,265 кг, из них механизмы составляют 278,44 кг.

Перенасыщенность возможностей применения разных вариантов и способов сохранения формы антенны экспериментального образца не является характерным для создания базового варианта. Такой подход является предварительным на пути создания штатного образца радиотелескопа в целях выявления эффективных решений и подбора оптимальных вариантов для создания конструкции окончательного вида.

Этим объясняется и определенные сложности узлов, элементов и частей конструкции КТРТ.30.ОРА.3.30.

Разработанная конструкция остронаправленной раскрываемой антенны имеет диаметр зеркала 30 м и фокусное расстояние 18,750 м.

При разработке конструкции узлов антенны, а также подбора материалов, основными требованиями оставались минимальный вес и габариты в сложенном положении, динамическая устойчивость, простота конструкции и технологичность,

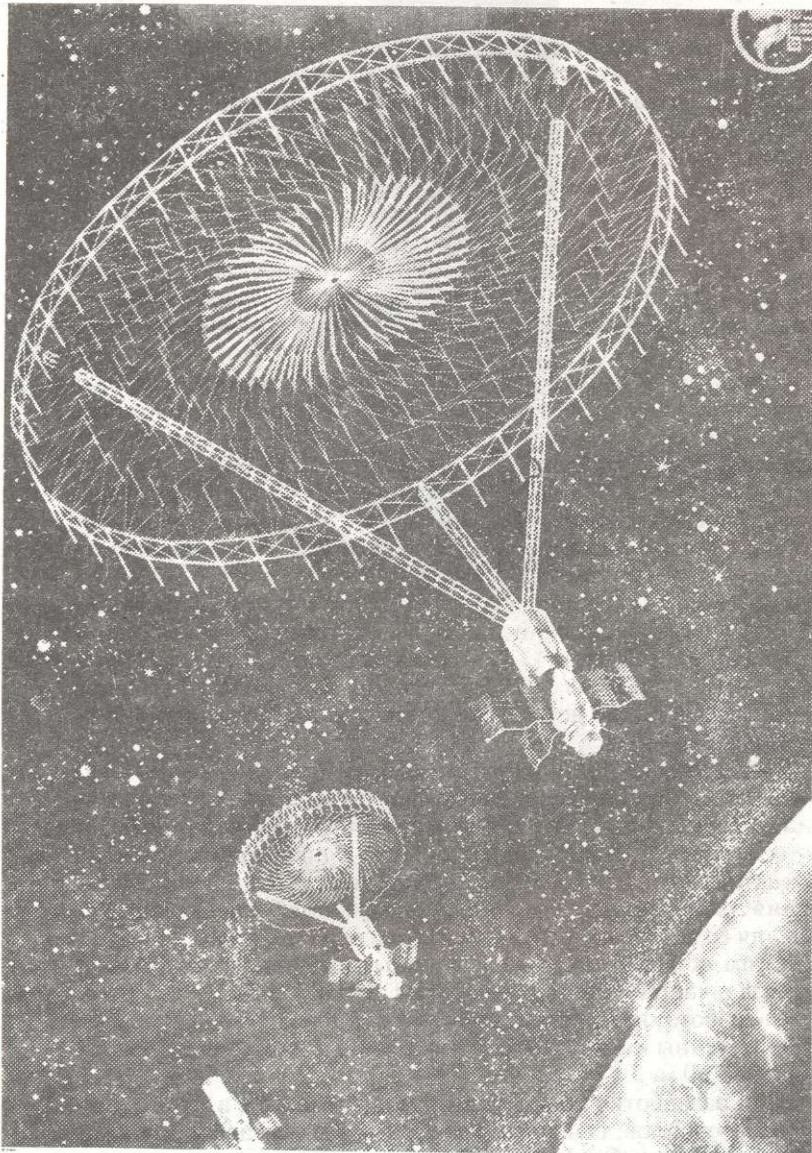


рис. 5.7

Э. В. МЕДЗМАРЦЬ И ШИВАЛИ ✧ ПЕР-АНСРОР И ШРУС-МЬЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

надежность раскрытия и способность выдержать колебания температур в заданном диапазоне и сохранение эксплуатационных свойств при функционировании.

Кольцо жесткости представляет собой 48-гранный симметричный многоугольник. Каждая грань этого многоугольника образуется из крестообразно соединенных рычагов одинаковой длины, условно называемых "секциями" или "звеньями" (см. рис. 5.4 и 5.5). Соседние звенья шарнирно соединены друг с другом, в результате чего образуется замкнутый многоугольник.

Рычаги имеют пространственную форму. Для увеличения устойчивости рычаги имеют ребра жесткости и образуют ферменную систему. Рычаг состоит из правых и левых частей, которые изготавливаются по отдельности и скрепляются между собой посредством кронштейнов. Рычаги отличаются друг от друга шириной. Они подобраны таким образом, что в сложенном положении рычаги частично входят один в другой, обеспечивая минимальные габариты секции.

Центральный шарнир, соединяющий рычаги, состоит из полой оси, по поверхности которой вращаются рычаги. Внутри оси помещен стержень, к которому крепится каркас зеркала антенны. Стержень удерживается в полости оси с помощью пружины, который одновременно является и предохранителем при температурных изменениях длин канатов.

Смежные секции рычагов соединены между собой с помощью скоб (нижних и верхних), которые образуются из кронштейна направляющей и двух осей. Все детали жестко связаны друг с другом с помощью болтов. Оси скобы (левая и правая) образуют между собой угол  $3^{\circ}45'$ . Подшипники рычагов свободно скользят по осям. Для того, чтобы исключить лишнюю степень подвижности кольца, смежные рычаги соседних секций связаны друг с другом посредством конической зубчатой передачи с передаточным отношением 1. Конические шестерни установлены как в верхней, так и в нижней скобе. Шестерни имеют скользящую посадку на ось, но жестко связаны с рычагом с помощью штифтов. В отверстия направляющей проходит стержень. Нижним концом стержень шарнирно связан со скобой. Стержень одновременно выполняет три функции: за его верхний конец крепится зеркало антенны; придает жесткость кольцу; является направляющей для пружины и притягивает друг к другу концы рычагов, способствуя раскрытию кольца в начальной стадии.

В каждой секции в верхней и нижней частях установлены балки, которые шарнирно присоединены к осям скоб. Другими

концами балки шарнирно соединяются к осям скалки. Балки предназначены для увеличения жесткости кольца в раскрытом положении, фиксации раскрытого кольца и для создания конечного усилия натяжения каркаса зеркала. Балки имеют пространственную форму и усилены ребрами жесткости. Балки изготавливаются составными. Составные части крепятся друг к другу заклепками. Ширины двух смежных балок разные, и они в сложенном положении входят одна в другую, занимая минимальное место.

Каждое звено кольца жесткости содержит по два механизма раскрытия и фиксации. Механизм раскрытия и фиксации содержит направляющую, которая своим нижним концом шарнирно соединяется с центральной осью рычагов. В направляющих помещена пружина растяжения, которая одним концом прикреплена к неподвижному винту, а другим концом – к замку. Замок имеет штифт, который помещен в пазу скалки. К самой скалке, как отмечалось выше, шарнирно соединены балки. Силу предварительного натяжения пружины можно регулировать с помощью винта. При сложенном положении кольца скалка находится в крайнем нижнем положении на направляющей и удерживается замком. Скалка имеет кулачок, который после перемещения скалки вверх под действием пружины на определенное расстояние, открывает замок. Штифт в это время оказывается в конце паза скалки, и поэтому его дальнейшее движение под действием пружины вызывает перемещение скалки. Раскрытие кольца жесткости происходит уже при участии пружины, которая через скалку передает усилие балке. Это обеспечивает требуемое натяжение каркаса зеркала антенны. При достижении скалкой верхнего крайнего положения срабатывает верхний замок, и скалка вместе с балками фиксируется в конечном положении. Положение верхнего замка относительно направляющей можно регулировать.

Наряду с пружинами для раскрытия кольца применяются шесть электродвигателей со встроенным редуктором, которые установлены через каждые 8 секций на скобах, соединяющих смежные секции рычагов. Соответственно, каждый электродвигатель обслуживает 8 секций. Передача усилия каждого двигателя происходит посредством двух канатов, которые вызывают сближение верхних и нижних скоб, соединяющих рычаги смежных секций. Каждый канат одним концом неподвижно закреплен на скобе (верхней и нижней) первой секции, а для передачи усилия остальным восьми секциям перекинут через ролики и наматывается на барабан, установленный на валу встроенного редуктора двигателя. Оба каната наматыва-

Э.В. МЕДВЕДЕВА И В.В. МАРИНИЦЫН ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

ются на один и тот же барабан редуктора. Чтобы канаты не выпадали с паза ролика, предусмотрены колпачки. Во время раскрытия кольца (особенно в начальный момент) может происходить ослабление канатов. Для устранения этого явления предусмотрены натяжные устройства. Натяжное устройство представляет собой качалку, на концах которой шарнирно закреплены по два ролика. Сама качалка шарнирно закреплена на центральной оси рычагов и удерживается пружиной. Канат проходит через ролики внутри трубчатого корпуса качалки. Ослабление каната компенсируется поворотом качалки под воздействием пружины.

Для увеличения пространственной жесткости кольца, как уже отмечалось, предусмотрена вантовая связь между секциями. Для этой цели на конце центральной оси рычагов закреплен барабан. На барабане намотан канат, который другим концом жестко прикреплен с ушком барабана, расположенным через четыре секции. При раскрытии кольца канат разматывается с барабана. Когда кольцо раскроется полностью, канат получает определенное натяжение. Создается вантовая система, которая как бы увеличивает ширину кольца.

Каркас зеркала антенны состоит из барабана, расположенного в центральной части конструкции, ленточной системы.

Барабан состоит из двух одинаковых дисков, которые соединены между собой четырьмя стенками. Диски имеют по 48 отверстий, в которых шарнирно вставляются оси. Оси имеют прорези, в которых крепятся листы ленточной системы каркаса.

Лента изготовлена из листа толщиной 0,5 мм. Для уменьшения веса в ленте вырезаны окна. Передний конец ленты защемлен между накладками, которые вставляются в прорези оси барабана. Задний конец ленты также защемлен между накладками, один из которых имеет на концах выемки, в которых с помощью вкладыша и винта крепятся канаты, образующие каркас антенны.

Стержни, разделяющие нижние и верхние слои каркаса антенны, для компенсации технологических и монтажных погрешностей имеют приспособление регулирования длины, которое осуществляется с помощью муфты и контргайки.

На каркасе антенны сверху крепится сетка, которая образует экран антенны. В ленточной системе каркаса для крепления сетки в металлических лентах имеются отверстия, а в остальных секциях сетка крепится непосредственно к канатам. Периферия сетки крепится на канате, соединяющего стержни кольца.

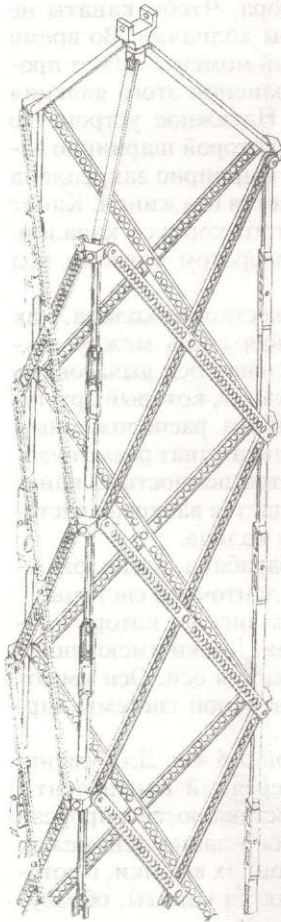


рис. 5.8

Антенна снабжена тремя опорами облучателя, равномерно расположенными под углом  $120^\circ$ . Одним концом опора облучателя связана с фокальным контейнером, а другим концом — с кольцом. Для этой цели на трех центральных осях рычагов кольца, расположенных через каждые 16 секций, присоединены качалки.

Опоры облучателя имеют независимый от кольца жесткости пружинный привод для раскрытия. Конструкция опоры облучателя обеспечивает его раскрытие на требуемую длину с требуемой точностью. В основу конструкции положен многократный параллелограмм, имеющий одну степень подвижности. Для придания опоре жесткости три одинаковых многократных параллелограмма расположены на сторонах воображаемой призмы и крайними шарнирами каждой секции связаны друг с другом (рис. 5.8). Кроме того, по граням призмы расположены стержни, снабженные фиксаторами. В результате этого после раскрытия образуется пространственная объемная конструкция, имеющая достаточную жесткость в продольном и в поперечном направлениях.

Стержни, образующие многократный параллелограмм, изготовлены из полосы и для облегчения имеют выемки. Стержни, составляющие условно одну секцию, соединены между собой шарнирно с помощью оси в центральной части. Ось фиксируется шплинтом. Для соединения смежных стержней, лежащих в одной плоскости, а также для соединения трех секций, лежащих в разных плоскостях, применен кронштейн. В кронштейне запрессовывается ушко, которое служит соединительным звеном раскосов, расположенных по граням воображаемой призмы. Конструктивно шарнир выполнен в виде оси, проходящей через стержни и кронштейн. Ось имеет выступ, в котором сделано отверстие для

Э. В. МЕДВЕДЕВЫМ И ДРУГИМИ ЛЕТАНСКОМ МИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

соединения раскосов. Все оси зафиксированы шплинтами. Раскосы для облегчения имеют выемки. Ширина раскосов подобрана таким образом, что при сложенной опоре они входят один в другой и не выступают за габариты опоры. Раскосы одной секции между собой соединены шарнирно с помощью оси. На этой же оси надета пружина кручения, которая способствует полному раскрытию раскосов. В раскрытом положении раскосы удерживаются фиксатором. Фиксатор срабатывает под действием пластинчатой пружины, которая крепится на раскосе. Для входа пальца фиксатора на боковых стенках раскосов имеются отверстия, которые совмещаются, когда угол между раскосами составляет  $180^\circ$ . Опоры облучателя с обеих сторон имеют по три рычага. Одним концом каждый рычаг шарнирно соединен с соответствующим ушком кронштейна, а другим концом также шарнирно соединяется с крестовиной.

Для раскрытия опоры применяется пружина растяжения, которая стягивает крайние шарниры двух смежных секций. Пружины установлены в каждой секции на всех трех плоскостях воображаемой призмы.

Длину опоры в раскрытом положении в пределах  $\pm 50$  мм можно регулировать изменением расположения вилки относительно крестовины.

С целью придания опоре начального импульса для раскрытия, а также для гашения сил инерции в конце раскрытия, предусмотрен механизм толкателя.

Механизм толкателя состоит из барабана, на котором намотан канат. Барабан помещен в корпус, который имеет выступ. Корпус крепится жестко на вилке соединения с облучателем. На выступе корпуса свободно насажен стержень, который служит направляющим для пружины. Другим концом стержень прикреплен к верхней вилке (с концом опоры). При сложенном положении опоры стержень садится на выступ корпуса, и пружина оказывается сжатой. Конец каната, намотанного на барабан, связан с нижним витком пружины. При начальной стадии раскрытия пружина подталкивает верхний конец опоры. По мере раскрытия опоры стержень отходит от корпуса вместе с пружиной и тянет за собой канат. Канат имеет длину, несколько меньшую, чем длина полностью раскрытой опоры. Из-за этого в конечной стадии раскрытия пружина работает на растяжение и гасит энергию движущихся масс. Натяжение каната регулируется величиной силы трения между барабаном и корпусом. Для этой цели на ось барабана надета пружина сжатия, которая прижимает барабан к стенке корпуса. Сила трения регулируется изменением силы сжатия пружины.

Отдельные элементы изготовлены из алюминиевых, титановых и стальных сплавов, а также из искусственных материалов. Смазки осуществляют из средств, применяемых для традиционной космической техники в условиях открытого космоса.

Специальным условиям удовлетворяют также электрические сети и электромеханическое оборудование, учитывая условия вакуума и большого перепада температур, а также больших вибрационных перегрузок от ракетносителей при старте и выводе на космическую орбиту.

Материалы в пределах времени, заданного для эксплуатации, должны удовлетворять также разным космическим требованиям.

Для конструкции оценивается также ситуация и возможность электрической разрядки и другие нештатные ситуации.

Подбор мощностей и других электрических параметров осуществляется в соответствии с энергетическими характеристиками космического аппарата и комплекса в зависимости от того, проектируется ли радиотелескоп со спутником или как автономная спутниковая система.

При проектировании одним из основных требований является соблюдение технологичности конструкции на всех этапах ее существования, т.е. на этапе сборки, транспортировки, развертывания и функционирования. Но кроме этих этапов, для больших конструкций космического базирования технологичность включает и этап наземных испытаний, которые для космических систем, в зависимости от свойств конструкции и средств испытаний, не всегда осуществимы. Проблемы возрастают до такой степени, что иногда требуются несравнимо большие финансовые, материальные, технические и временные затраты, или вообще любое интересное решение становится неприемлемым, ввиду отсутствия практических возможностей ее апробации.

Кроме "глобальных" технологических принципов, необходимо решать конкретные требования, характерные для развертываемых радиотелескопов, среди которых весьма своеобразным является сетеполотно экрана и его крепление к каркасу зеркала.

Для конструкции экспериментального образца рассматриваются три вида построения купола экранного сетеполотна — радиальное, круговое и ортогональное. Во всех случаях особые трудности возникают в местах пришивания экрана к лепесткам, ввиду того что в транспортном пакете при плотной намотке лепестков происходит взаимосрез сетки кромкой другого



Э.В. МЕДЗМАРИШВИЛИ ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

лепестка. Поэтому разработан вариант пришивания сетки на лепесток или к лентообразным ребрам, которые предварительно закреплены на швах сетки, или закрытие кромок лепестков тканевыми лентами с последующим пришиванием к ним сетчатой ленты.

Важным условием является то, что конструкция должна быть легкой и прочной, а также иметь возможность быстрого монтажа и демонтажа. Для этого необходимо использовать высокопрочные материалы, способные выдерживать большие нагрузки.

Следует также отметить, что конструкция должна быть адаптирована к условиям космоса, то есть иметь защиту от радиации и перепадов температур. Кроме того, необходимо обеспечить возможность быстрого ремонта и обслуживания конструкции.

Для реализации данной конструкции необходимо использовать высокопрочные материалы, способные выдерживать большие нагрузки. Кроме того, необходимо обеспечить возможность быстрого монтажа и демонтажа конструкции.

Несомненно, данная конструкция имеет ряд преимуществ перед традиционными конструкциями. В частности, она имеет высокую прочность и надежность, а также возможность быстрого монтажа и демонтажа.

В заключение следует отметить, что данная конструкция является перспективной для использования в космосе и на Земле. Она имеет ряд преимуществ перед традиционными конструкциями, что делает ее одним из наиболее эффективных решений в данной области.

Практически все перечисленные выше преимущества данной конструкции являются ее основными достоинствами. Кроме того, она имеет высокую надежность и долговечность, что делает ее одним из наиболее эффективных решений в данной области.

В заключение следует отметить, что данная конструкция является перспективной для использования в космосе и на Земле. Она имеет ряд преимуществ перед традиционными конструкциями, что делает ее одним из наиболее эффективных решений в данной области.

Кроме того, данная конструкция имеет высокую надежность и долговечность, что делает ее одним из наиболее эффективных решений в данной области. Она также имеет возможность быстрого монтажа и демонтажа, что является ее одним из основных преимуществ.

## 3

## Базовая кольцевая лепестковая конструкция КТРТ.30.ОРА.Б.М.30

Решение специальных, информационных, коммуникационных, хозяйственных, научных и других задач радиотелескопами космического базирования диаметром зеркала 30 метров качественно повышает эффект при точных антеннах, работающих на радиоволнах длиной 2–5 сантиметров.

Создание космических остронаправленных антенн с такими параметрами, формообразование которых осуществляется трансформацией, требует, в отличие от экспериментального образца, дальнейшего повышения точности, жесткости, надежности и, вместе с этим, оптимальных решений для элементов, узлов и других частей радиотелескопа.

Для реализации поставленных целей разработаны принципы конструирования базового варианта 30-метровой космической остронаправленной антенны на основе построения кольцевых систем.

Несущий каркас зеркала, являющийся также для центральной части экрана дискретным контуром, целиком изготавливается из лентообразных лепестков, расположенных в радиальном направлении и перпендикулярно по отношению к плоскости кольца. Лепестки одним концом закреплены на барабане, а другим – на кольце (рис.5.9).

В отличие от “звездчатой” структуры центра ее лучеобразное построение, в виде радиальных “спиц”, качественно повышает устойчивость кольца и без всяких усилий дает возможность ее облегчения при сохранении большой жесткости и сил натяжения центра.

Практически исключаются аномальные и нештатные процессы при разворачивании, что повышает надежность управления формообразованием и ее достижение. Для этого также принято решение продольного нанесения на лепестки ленты типа “велкро”, которая, за счет известного качества взаимосцепления, обеспечивает устойчивость упруго стянутого пакета лепестков и ее последовательное развинчивание без пружинообразного распутывания.

Бесступенчатая, прямолинейная связь узла растяжения кольца с центральным барабаном, за счет радиальных лепестков, не вызывает падения усилий растяжения центра по всему каркасу зеркала, что было характерным для ярусных систем.

Э.В. МЕДВЕДЕВА И В.А. ПИЩАКОВЫЕ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

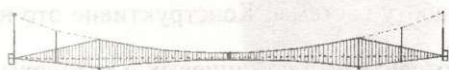
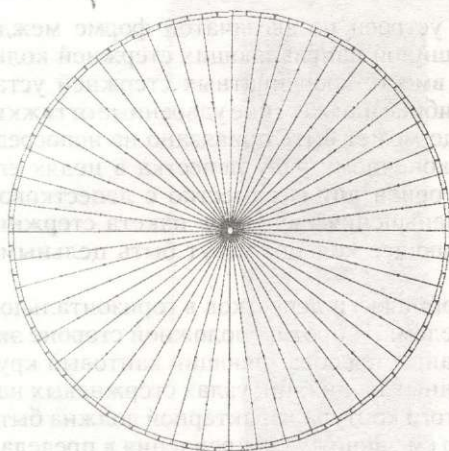


рис. 5.9

Поэтому, с учетом большой жесткости преднапряженного лепестка, возникающей по принципу “балка-стенка”, идеализированная форма параболоида экран становится весьма устойчивой в отношении статических и динамических воздействий, что для радиотелескопов имеет первостепенное значение.

В интервале центральной части экрана, где точность поверхности особенно активно влияет на радиотехнические параметры антенны, кромки лепестков

являются контуром крепления отражающего степолотна и имеют форму параболы. Такая постановка вопроса резко поднимает уровень технологичности конструкции, которая, в данном конкретном варианте, достигается высвобождением каркаса зеркала от механических узлов. И – что самое главное – простейшим способом решается, вопрос получения формы контура на станках с программным управлением, когда профиль всех лепестков в виде пакета длинномерных элементов одновременно обрабатывается с большой точностью.

Лепестковый профиль экрана можно было продолжать до самого конца зеркала. Но в целях сохранения минимальной высоты и веса транспортного пакета и одного силового кольца, в периферийной части экран крепится на тросовый контур. Контур закреплен на вершинах, т.н. регулируемых “координатных стержнях”.

Обрамляющее кольцо, которое устроено на направляющих стержнях кольца и воспринимает основные усилия от растяжения экрана, может быть выполнено как из вант, так и из жестких элементов, в зависимости от точностных и жесткостных требований космической антенной системы.

Возможен вариант, когда тросовый контур не расположен в

плоскости лепестка, а устроен по звездчатой форме между кромкой контура и вершиной направляющих стержней кольца. В таких решениях вместе координатных стержней устанавливаются на конце гибкие или жесткие удвоенные оттяжки.

Обрамляющее кольцо может быть привязано не непосредственно к кольцу, а к конечному узлу лепестка в целях его общей геометрической ориентации совместно с лепестковой частью экрана. Для уменьшения габаритов пакета стержни, удерживающие обрамляющее кольцо, могут быть цельными или телескопическими.

Для повышения устойчивости лепестков в горизонтальной плоскости на месте перелома, к противоположной стороне экрана на лепестках устраивается обрамляющий вантовый круговой контур, закрепленных на нижних узлах стержневых накладок лепестка. Для этого контура характерной должна быть возможность свободного смещения узла крепления в пределах упругих и допустимых перемещений лепестка для исключения включения контура в работу системы. Конструктивно это не представляет проблему.

Лепестки можно изготовить из алюминиевых и титановых сплавов толщиной 0,1–0,5 мм и из композиционных материалов. Для облегчения допустима и желательна большая степень и интенсивность перфорации, но при этом размеры отверстий не должны менять картину общего напряженного состояния лепестка.

Наличие лепестков упрощает технологию получения транспортного пакета, который достигается лишь наматыванием лепестков на центральный барабан.

Плотное стягивание пакета, наличие ленты типа “велкро” и контурное обрамление для закрепления экрана, обеспечивает большую жесткость транспортного пакета лепестковой части, что и является особым требованием при транспортных перегрузках во время старта и вывода на орбиту.

Кольцо базового варианта (рис.5.10), по сравнению с экспериментальным образцом, принципиального отличия не имеет, однако имеются позиции, на которых усилен акцент. Такими являются верхний обрамляющий контур и основной тяговый узел центральной части антенны.

В базовом варианте допускается три вида закрепления конца контурного троса. В самых простых случаях требования жесткости и точности антенны допускают гибкого обрамления. Такая схема упрощает конструкцию, однако вызывает изгиб стержней и кручение кольца. Более совершенным, с инженерной точки, является устройство жесткого обрамляющего кон-

Э. В. МЕДЗМАРЦЯНИЦАМИ ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

тура в виде ломающихся стержней, что исключает изгиб и кручение, улучшает картину работы всего комплекса антенны. Как уже отмечалось, контур может быть настроен как на цельных направляющих стержнях, так и на телескопических, что в некоторых случаях уменьшает габариты сложенного пакета.

Для точной ориентации всей поверхности экрана по отношению к фокальному контейнеру и непосредственно к облучателю, обрамляющий контур желательно смонтировать на стер-

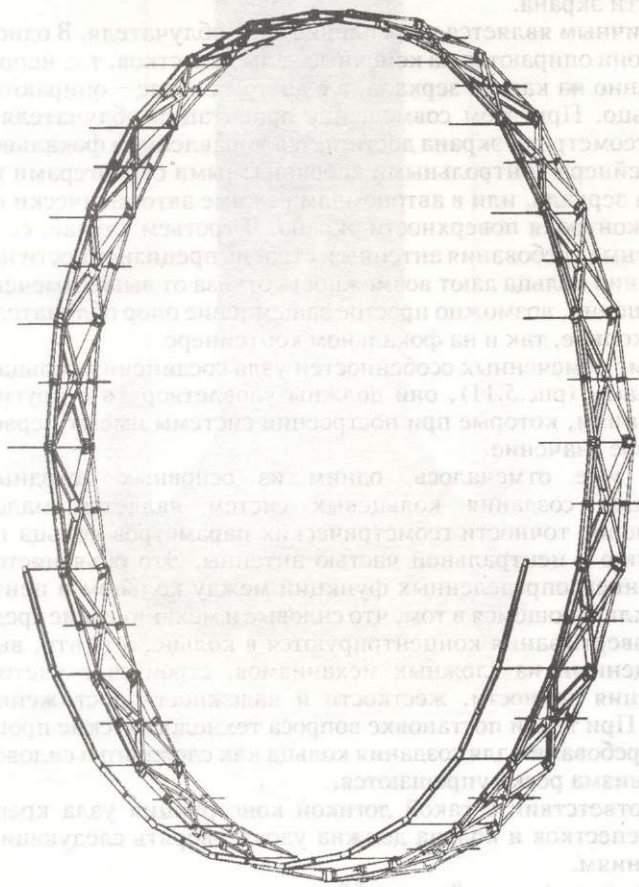


рис. 5.10

жнях, перемещение которых конструктивно связано с положением лепестков и элементов его крепления в зоне узла натяжения.

Однако для упрощения конструктивного решения стержни остаются в кольце, а на их вершинах устанавливаются посадочные узлы контура с нужными ограничителями степеней свободы. В этих пределах обрамляющий контур с помощью добавочных стрингеров, закрепленных и на лепестках, ориентируется в пространстве в соответствии с ориентацией основной части экрана.

Типичным является и крепление опор облучателя. В одном случае они опираются на конечные узлы лепестков, т.е. непосредственно на каркас зеркала, а в другом случае – опираются на кольцо. При этом совмещение ориентации облучателя с общей геометрией экрана достигается управлением фокального контейнера контрольными координатными стрингерами из каркаса зеркала, или в автономном режиме автоматически на основе контроля поверхности экрана. В третьем случае, если точностные требования антенны и степень прецизионности изготовления кольца дают возможность отказа от вышеотмеченных решений, возможно простое защемление опор облучателя как на кольцо, так и на фокальном контейнере.

Кроме отмеченных особенностей узла соединения кольца с лепестками (рис.5.11), они должны удовлетворять и другим требованиям, которые при построении системы имеют первостепенное значение.

Как уже отмечалось, одним из основных исходных принципов создания кольцевых систем является малое ограничение точности геометрических параметров кольца по сравнению с центральной частью антенны. Это объясняется разделением определенных функций между кольцом и центром, заключающемся в том, что силовые и механические средства развертывания концентрируются в кольце, а центр, высвобожденный из сложных механизмов, строится с учетом повышения точности, жесткости и надежности достижения формы. При такой постановке вопроса технологические процессы и требования для создания кольца как сложного и силового механизма резко упрощаются.

В соответствии с такой логикой конструкция узла крепления лепестков и кольца должна удовлетворять следующим требованиям.

Отмеченный, т.н. “тяговый”, узел должен разграничить прецизионное зеркало от непрецизионного кольца так, чтобы факторы неточности силового кольца не воздействовали бы на

Э.В. МЕДВЕДЕВИЧ *◆* ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

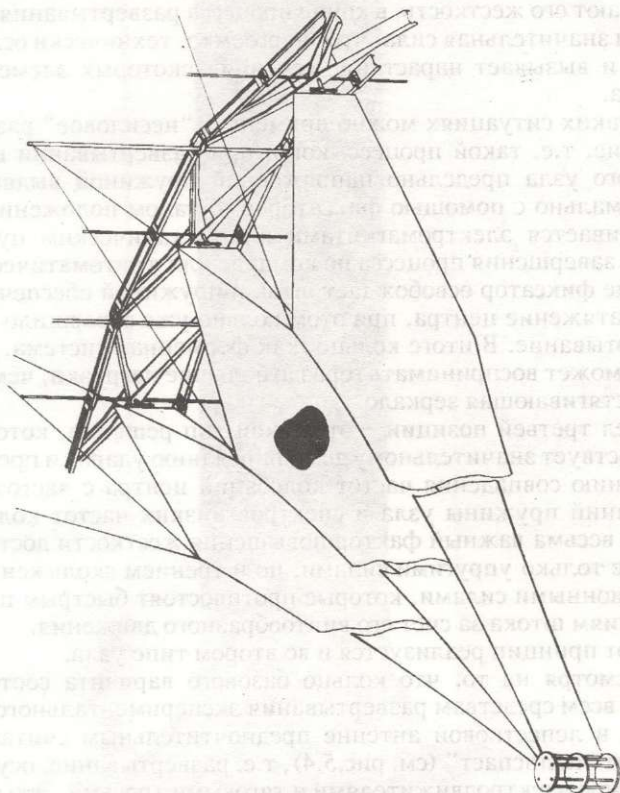


рис. 5.11

точность зеркала и при этом обеспечивалась бы полноценная силовая связь между кольцом и центром так, чтобы сила натяжения была достаточная и равномерно распределена по всем узлам.

Неприкосновенность кольца к геометрии зеркала достигается компенсаторными устройствами узла как в плоскости кольца, так и перпендикулярно ему. Они снимают также концентрации напряжений при температурных неравномерных воздействиях, демпфируют колебания и динамические удары, особенно в конце развертывания. Перечисленными комбинациями характеризуется т.н. первый тип тягового узла. Но в базовом варианте предусмотрены второй и третий типы узлов, сущность которых заключается в следующем.

При больших силах натяжения центра, которые резко увеличивают его жесткость, в конце процесса развертывания требуется значительная сила, что энергоемко, технически осложнено, и вызывает нарастание сечения некоторых элементов кольца.

В таких ситуациях можно применять “несиловое” развертывание, т.е. такой процесс, когда при развертывании шток тягового узла предельно напряженной пружиной выдвинут максимально с помощью фиксаторов. В таком положении он удерживается электромагнитами или механическим путем. После завершения процесса по команде или в автоматическом режиме фиксатор освобождает шток и пружиной обеспечивается натяжение центра, при этом кольцо уже завершило свое развертывание. В итоге кольцо, как ферменная система, свободно может воспринимать гораздо большие нагрузки, чем сила, растягивающая зеркало.

Узел третьей позиции – это такой тип решения, который способствует значительному демпфированию ударов и предотвращению совпадения частот колебаний центра с частотами колебаний пружины узла и спектров низких частот кольца. Такой весьма важный фактор повышения жесткости достигается не только упругими силами, но и трением скольжения и инерционными силами, которые противостоят быстрым перемещениям штока за счет его винтообразного движения.

Этот принцип реализуется и во втором типе узла.

Несмотря на то, что кольцо базового варианта соответствует всем средствам развертывания экспериментального образца, в лепестковой антенне предпочтительным считается вариант “полиспасть” (см. рис.5.4), т.е. развертывание, осуществляемое электродвигателями и тяговыми тросами. Это предопределяется большим пружинным эффектом центра, сложенного в пакет.

Для безотказности трансформации предлагается дублирующая пружинная система развертывания, которая устроена на направляющих стержнях ломающихся поясов кольца.

Предлагаемый вариант развертывания по способу “полиспасть” определен также тем, что наличие пружинного пакета служит импульсом процесса развертывания конструкции и трансформации пружин на ломающихся поясах. Это значительно способствует быстрому развертыванию кольца. Вариант же развертывания по способу “винт-гайка” (см. рис.5.5) характеризуется большими потерями энергии на трение. Одновременно с этим учитывается и то, что базовый вариант не предназначен для многоразового развертывания, так как рабо-



Э.В. МЕДВЕДЕВИЧУК ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

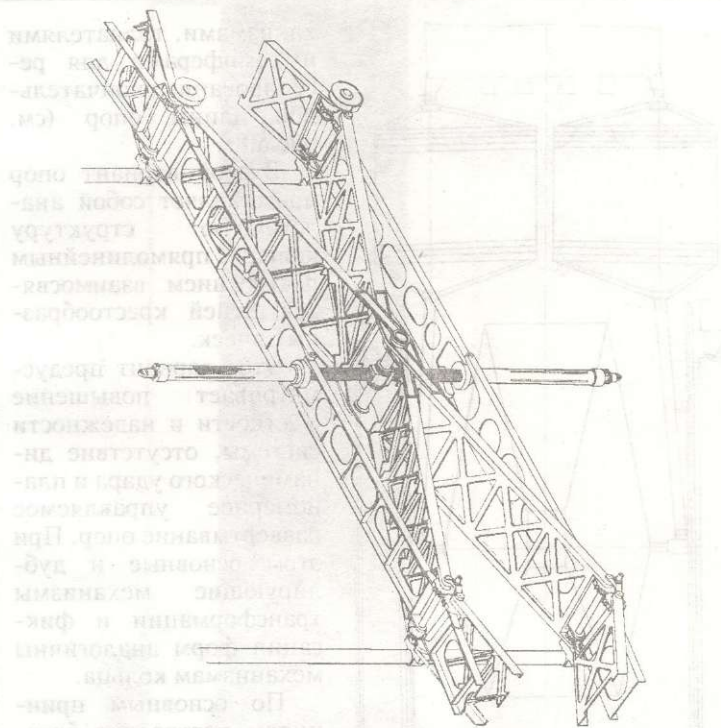


рис. 5.12

та механизмов трансформации происходит на орбите один раз. По конструктивному строению (рис.5.12) элементы и характерные узлы соответствуют принципам создания экспериментального образца. Однако и здесь соблюдается определенное упрощение и облегчение.

Опоры облучателя на базовом варианте предполагается в двух вариантах. В обоих случаях, для повышения жесткости и получения симметричных усиленных зон на кольце, в целях размещения на них технологического оборудования космического комплекса, опоры устанавливаются в количестве не трех, а четырех штук. Кроме того, в обоих случаях, для улучшения ориентации облучателя, опоры закрепляются в тяговом узле кольца в зоне концов лепестков.

Первый вариант предусматривает применение опор в виде трехгранных пространственных трансформируемых ферм крестообразной рамной системой раскосов, с пружинными ме-

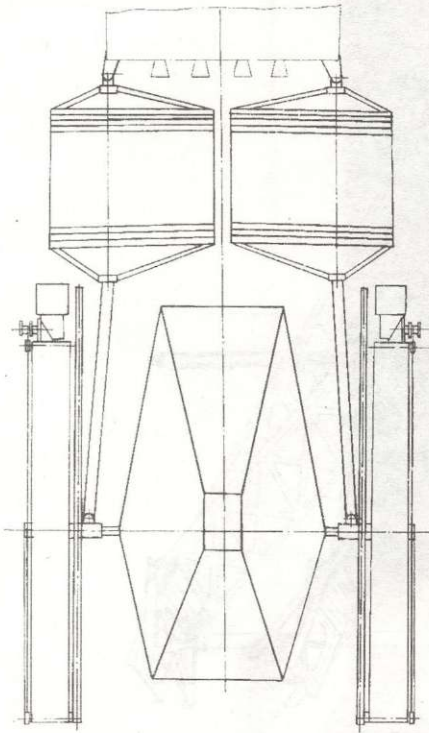


рис. 5.13

струкций, один из которых – КТРТ.30.ОРА.Б.М.30 – был изготовлен, всесторонне испытан и экспериментально исследован.

Разработанная конструкция антенны диаметром зеркала 30 метров и фокусным расстоянием 21 метр имеет четыре опоры длиной 24 метра каждая. Диаметр сложенного транспортного пакета (рис.5.13) составляет 2,2 метра. Опоры изготавливаются как в трехгранном пружинном варианте, так и наподобие кольца с электродвигателями.

В таком варианте, с трехгранными ферменными опорами, был изготовлен базовый образец конструкции. Время развертывания изделия в зависимости от режимов меняется от 25 до 45 секунд. Кольцо антенны весит 927,7 кг, в том числе 334,7 кг – механизмы. Указанные параметры в опорах составляют 233,8 кг и 58,2 кг, а центральной части – 358 кг и 86 кг. Всего вес конструкции достигает 1520,1 кг.

ханизмами, толкателями и демпферами для регулирования окончательной длины опор (см. рис.5.8).

Второй вариант опор представляет собой аналогичную структуру кольца с прямолинейным построением взаимосвязей цепей крестообразных ячеек.

Этот вариант предусматривает повышение жесткости и надежности системы, отсутствие динамического удара и планомерное управляемое развертывание опор. При этом основные и дублирующие механизмы трансформации и фиксации форм аналогичны механизмам кольца.

По основным принципам построения базового образца были рассчитаны и спроектированы разные варианты кон-

Э.В. МЕДВЕДЕВА И НА ЗЕМЛЕ  
 ПЕРАНФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДЗМАРИАВИЦАИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Для разных целей был сконструирован многофункциональный космический телескоп высокой точности диаметром зеркала 30 м. Вывод на орбиту такой антенны намечен мощными носителями. Система рассчитана также на размещение на ней комплекса аппаратуры и оборудования для создания автономного спутника-радиотелескопа. Общий вес конструкции антенны достигает 4204 кг. Из них – 1201 кг составляют механизмы. По частям изделия эти параметры разделены следующим образом. Кольцо – 1824 кг и 854 кг, опоры облучателя типа структуры кольца – 2020 кг и 260 кг, центр – 360 кг и 87 кг.

Соотношение весовых и геометрических параметров вариантов конструкции космических радиотелескопов находится в тесной взаимосвязи с типом построения космической системы и видом ракетоносителя.

К примеру, вариант базовой кольцевой лепестковой конструкции космического радиотелескопа, вывод которого на орбиту предусмотрен ракетоносителем “Энергия”, имеет вес в металлическом исполнении 2630 кг, в углепластиковом – 2030 кг, а диаметр пакета – 5 метров, тогда как антенна того же назначения, рассчитанная на ракету “Протон”, в металлическом варианте весит 1240 кг, в углепластиковом варианте – 940 кг, а диаметр пакета – 2 метра.

Ограничение весовых и габаритных показателей грузовых отсеков космических кораблей все-таки осложняет конструктивное решение и затрудняет достижение хороших

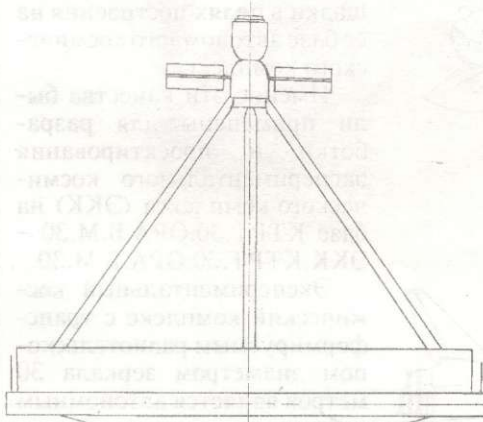


рис. 5.14

радиотехнических параметров антенны. Но итоговое решение здесь зависит от общей экономической и технической оценки проблемы.

Для орбитальных радиотелескопов вопросом особой важности является принцип построения космического комплекса, в состав которого и входит антенна.

С применением

базовой конструкции создается возможность функционирования антенны во взаимосвязи с космическими аппаратами. В этом случае аппарат может быть размещен как на внешней стороне центра зеркала, так и над фокальным контейнером (рис.5.14).

Возможен вариант применения для вывода на орбиту и эксплуатации в космосе кольцевой лепестковой конструкции развертываемого радиотелескопа корабля многоразового использования (рис.5.15). Однако на данном этапе, с учетом орбитальных показателей, технических и эксплуатационных параметров и стоимости запуска кораблей многоразового использования, его применение непосредственно для обслуживания больших антенн одноразового использования с длительным сроком назначения не оправдывается.

Для кораблей многоразового использования логическим является вывод на орбиту спутника с антенной или автономного космического комплекса (рис.5.16).

Конструкция радиотелескопа КТРТ.30.ОРА.Б.М.30, имея жесткое кольцо и мощные опоры облучателя, дает возможность ее применения в виде несущего каркаса, т.е. космической силовой площадки в целях построения на ее базе автономного космического комплекса.

Именно эти качества были применены для разработки и проектирования экспериментального космического комплекса (ЭКК) на базе КТРТ.30.ОРА.Б.М.30 – ЭКК.КТРТ.30.ОРА.Б.М.30.

Экспериментальный космический комплекс с трансформируемым радиотелескопом диаметром зеркала 30 метров является автономным орбитальным устройством.

Понятие автономности включает в себя наличие на

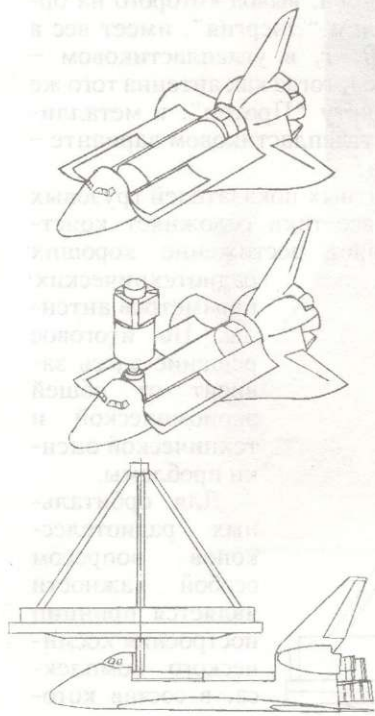


рис. 5.15

Э.В. МЕДЗМАРШАВИЦАИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

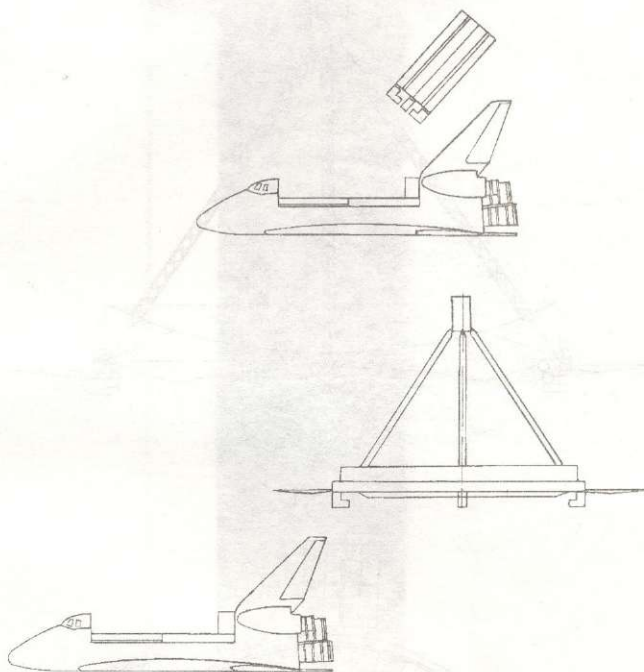


рис. 5.16

борту комплекса систем энергоснабжения, независимых от внешних источников; герметизированных приборных объемов с эффективной системой терморегуляции; трехосной системой ориентации в пространстве; высокочувствительной системой стабилизации, со своими двигательными устройствами и запасами компонентов топлива; телеметрической системы передачи и приема информации; управляемой бортовой ЭВМ и т.д. Общий вид базового варианта ЭКК представлен на рис.5.17 и 5.18.

Конструкция космического комплекса представляет собой систему, состоящую из: раскрываемого силового кольца; центральной части, образующей отражающую поверхность параболоида; четырех складных опор, поддерживающих фокальный контейнер облучателя; систем питания, управления, ориентации, стабилизации и телеметрии, расположенных в фокальном контейнере и в приборных отсеках, закрепленных в че-

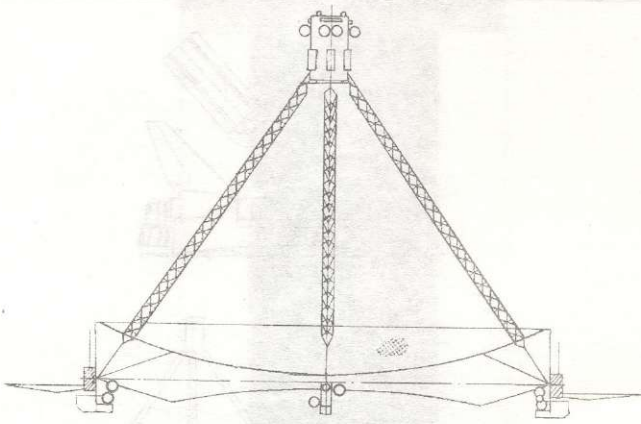


рис. 5.17

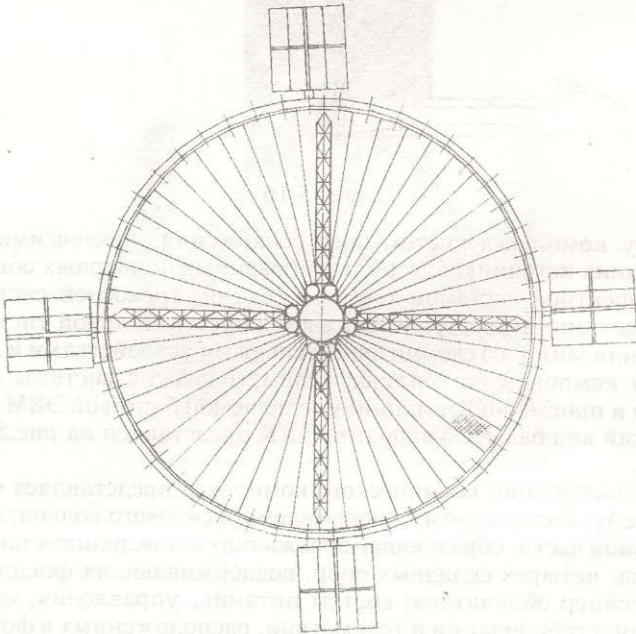


рис. 5.18

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИ ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

тырех точках по окружности силового кольца. В этих же точках установлены четыре откидывающиеся солнечные батареи с общей площадью  $120 \text{ м}^2$ . На фокальном контейнере и в точках подвески приборных контейнеров размещены спаренные жидкостные реактивные двигатели с запасами компонентов топлива системы ориентации ЭКК.

Центральная часть антенны состоит из 48 радиально расположенных перфорированных дюралюминиевых лент толщиной  $0,3 \text{ мм}$ , которые натянуты при помощи пружинных механизмов силой  $35 \text{ кг}$ .

Трансформация антенны основано на равертывании силового кольца. Привод кольца осуществляется при помощи электромеханизмов с потребляемой мощностью около  $4 \text{ кВт}$ . Время развертывания кольца – не более  $1,5 \text{ мин}$ .

Фокальный контейнер и приборные отсеки представляют собой герметизированные объемы для принудительного охлаждения расположенных в нем приборов и датчиков и снабжены системой терморегулирования. Каждый приборный отсек оснащен двумя теплоотводящими радиаторами с площадью  $1 \text{ м}^2$  каждый. Кроме того, на фокальном контейнере закреплено четыре широкополосных рупорных облучателя. Питание которого осуществляется солнечными батареями.

В приборных отсеках системы ориентации и стабилизации во взаимно-перпендикулярных плоскостях установлено по два силовых гироскопических устройства, кинематические моменты которых направлены по осям  $X$ ,  $Y$ , и  $Z$ ; два астрономических датчика, обзорные оси которых охватывают область обзора вверх и вниз на  $28^\circ$  от плоскости  $XOY$ . Кроме того, в приборных отсеках, подвешенных в противоположных точках силового кольца, расположено по одному солнечному датчику, оси которых строго параллельны оси  $OX$  антенны и обеспечивают угол обзора без помех  $92^\circ$  в плоскости  $XOY$ . Каждый контейнер оснащен вентиляторами для циркуляции воздуха внутри отсека. Для измерения угловых скоростей вращения всего комплекса антенна снабжена тремя датчиками угловых скоростей, оси чувствительности которых совпадают с осями  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Ориентировочный вес каждого оснащенного контейнера около  $100 \text{ кг}$ .

Система ориентации ЭКК снабжена жидкостными реактивными двигателями (ЖРД) с тягой  $0,5 \text{ кг}$  каждый, с запасами компонентов топлива. Четыре пары ЖРД установлены по окружности силового кольца в местах подвески приборных отсеков, остальные четыре пары ЖРД – на фокальном контейнере. Питание топливом отдельных двигательных установок –

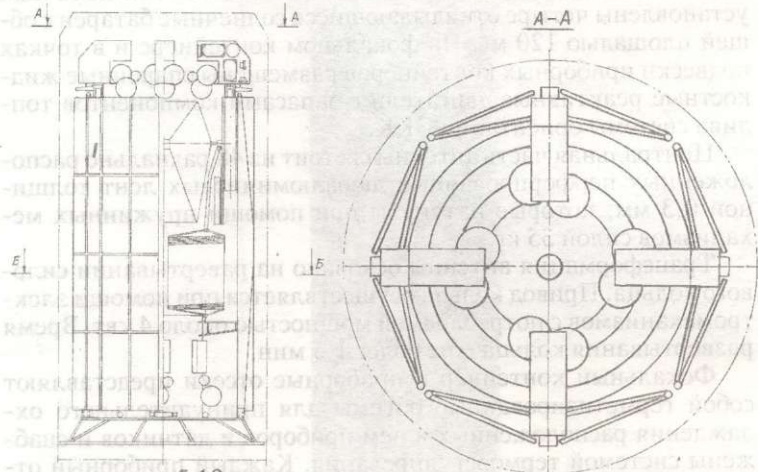


рис. 5.19

автономное. Расположенные двигательные устройства на комплексе и созданные ими векторы тяги дают возможность создать любые корректирующие и тормозящие моменты вращения относительно осей X, Y и Z.

Общая компоновка базового ЭКК в транспортном положении показана на рис.5.19 и 5.20.

В сложенном виде радиотелескоп представляет собой цилиндрическое тело высотой 8,25 м, с поперечником — 3,15 м, объемом — 41 м<sup>3</sup>. Общая масса комплекса составляет 5612 кг.

В транспортном положении ЭКК стягивается при помощи четырех балок, которые одновременно выполняют функции опор откидывающихся солнечных батарей. Опорная ферма является соединительным конструктивным звеном комплекса с носителем.

Последовательность по отделению ЭКК от носителя пред-

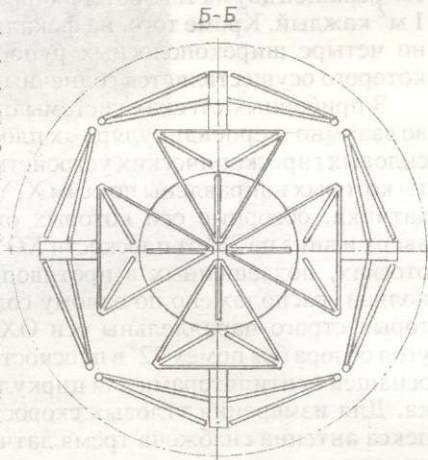


рис. 5.20



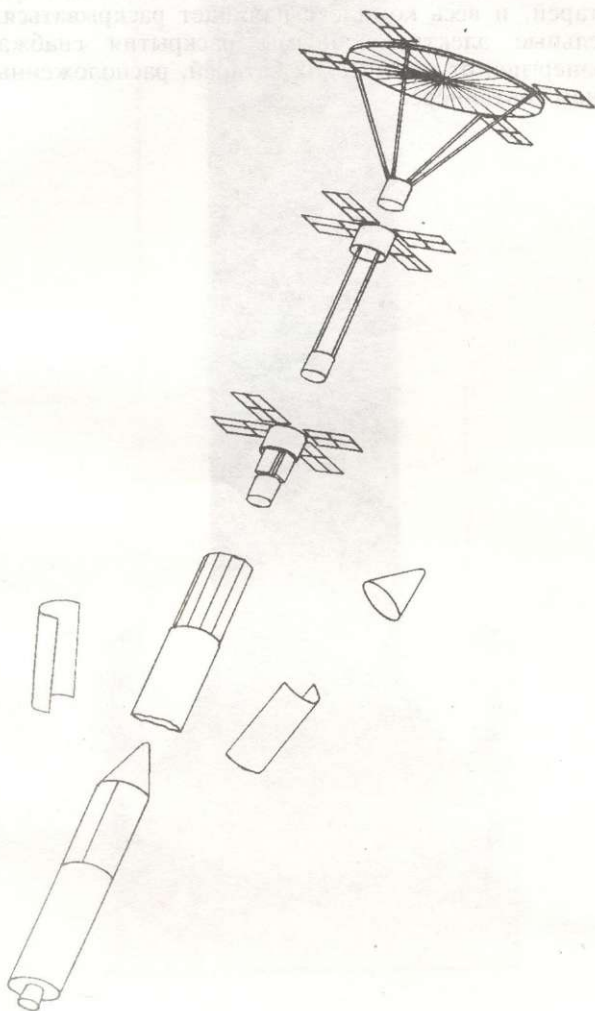
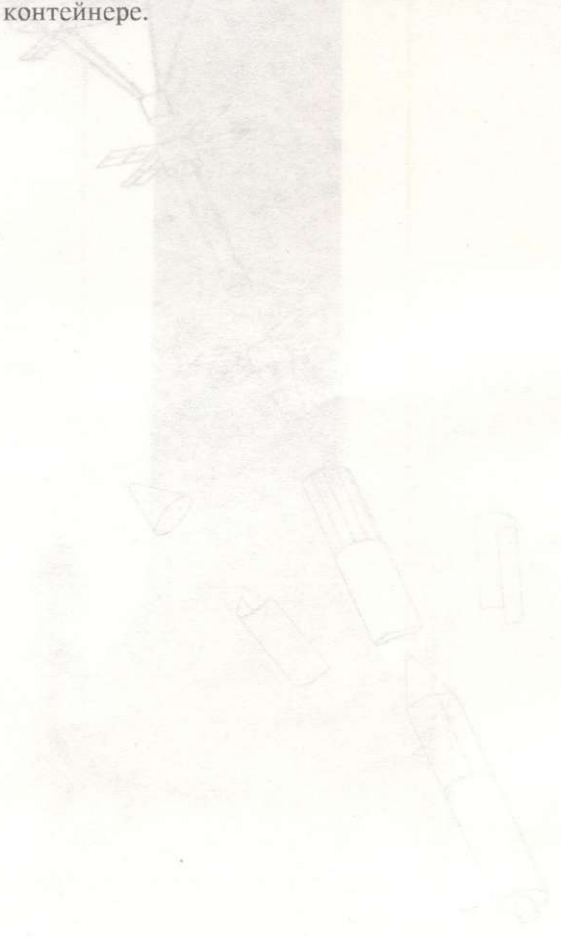


рис. 5.21

ставлена на рис. 5.21. После выхода носителя на орбиту по команде откидываются обтекатели грузового отсека. Срезаются соединительные болты опорной фермы пиромеханизмами и ЭКК освобождается от носителя. Далее при помощи пироме-

ханизмов освобождаются концы стягивающих балок солнечных батарей, и весь комплекс начинает раскрываться. Исполнительные электромеханизмы раскрытия снабжаются электроэнергией от химических батарей, расположенных на фокальном контейнере.



Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИИ ✧ ЛЭР-АНСРОР-МИРУЕ.МЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

## 6 Геометрические особенности, вопросы прикладной механики космических трансформируемых радиотелескопов диаметром зеркала 30 метров и напряжения, деформации и колебания образцов орбитальных конструкций

Аналогичное название имеет приложение к научной работе автора – монографии Элгуджи Викторовича Медзмариашвили – «Теоретические основы конструкции и наземный комплекс испытаний трансформируемых систем космических крупногабаритных радиотелескопов и перспективных инженерных сооружений».

В приложении с соответствующими исследованиями и обоснованиями рассмотрены вопросы геометрии, математического моделирования технологических особенностей экрана, статике, устойчивости, динамики, кинетики трансформации разvertываемых конструкций космического базирования, а также анализ напряжения, деформации и колебания конкретных образцов космических трансформируемых радиотелескопов диаметром зеркала 30 метров.

# 1

## Геометрические и технологические особенности экрана космических трансформируемых радиотелескопов

Рассматриваемые конструкции, как традиционно характеризуются радиотелескопы, имеют зеркало со сферическими и параболическими экранами. Технологическое обеспечение реальных поверхностей двойкой кривизны не только в космосе, где в экстремальных ситуациях формируется конструкция, но и на земле, является проблемой для больших остронаправленных антенн. Эта проблема приобретает добавочные сложности для трансформируемых конструкций. Поэтому решается проблема заменой кривых поверхностей плоскими участками, которые сохраняя единую форму экрана двойкой кривизны, являются аппроксимацией реальной геометрии отражателя.

В зависимости от геометрических размеров радиотелескопа и длины рабочей волны определяются размеры плоских элементов, которые совместно с заданными величинами диаметра и фокусного расстояния экрана, являются основными параметрами геометрии конструкции. Однако, с точки зрения конструкторских, технологических и других соображений вполне закономерно определяются и другие параметры. Но они, по сравнению с вышеперечисленными проблемами все-таки вторичные и при разных вариантах решений схемы могут меняться.

Для расчета и конструирования каждого отдельного типа КТРТ разработана соответствующая методика определения геометрических параметров. Но, несмотря на их различие, в зависимости от конкретного конструкторского решения, определение размеров базовых элементов, которые являются критериями формы экрана, кольца и опоры, опирается на единый принцип.

По этому, независимо от типа конструкции, определение формы экрана сводится к задаче аппроксимации поверхностей второго порядка – сферы или параболоида.

При этом как на характер аппроксимации поверхности экрана, так и на все базовые размеры частей и элементов конструкции особо влияет принцип построения схемы каркаса зеркала. Радиальное, циклическое, звездчатое, параллельное и

другие виды расположения несущих элементов каркаса зеркала и контуров аппроксимации экрана требуют конкретизации оптимальных величин размеров и методик их определения.

Для предложенных типов космических радиотелескопов разработана методика аппроксимации поверхностей двойкой кривизны и определения геометрических размеров контуров крепления экрана в зависимости от базовых геометрических параметров конструкции.

Свои коррективы в проектную форму экрана вносит растянутое по зеркалу металлическое трикотажное сетеполотно или пленка.

Наибольшее отклонение от заданной формы при радиально, а также кольцеобразно расположенных контурах экрана наблюдается в виде "матрасного эффекта".

По существующей методике теоретически и экспериментально можно определить возникновение и изменение радиотехнических эксплуатационных параметров антенны и их приведение к допустимым пределам. Но для достижения минимальных пределов отклонений от формы, только определение и аппроксимация геометрических параметров не являются достаточными без совмещения соответствующих конструктивных решений.

При зонтичных схемах зеркала для снятия "матрасности" геометрии экрана известно много вариантов. Общая их оценка сводится к тому, что или требуется материал экрана со специальной структурой строения, или добавочные конструкции, которые не только осложняют общую схему, но и меняют картину напряженно деформируемого состояния, что нарушает достигнутую лаконичность основного принципа решения.

Поэтому при конструировании антенны сохранение основных геометрических параметров формы радиотелескопа является как теоретической, так и практической основной проблемой.

Изготовление экрана трансформируемых радиотелескопов из трикотажного сетеполотна, и его крепление на контурные элементы поверхностей аппроксимирующих параболу независимо от их гибкости, в разной степени влияют на характер общей механики развертывания и функционирования конструкции.

На этапах конструирования и экспериментальных исследований конструкций, особенно в стадии трансформации и функционирования, наряду с определением физико-механических свойств материала сетеполотна, необходимо установить точную геометрию первичной, т.е. технологической формы общей

выкройки экрана и отдельных его частей, которые после трансформации приобретают вторичную, т.е. функциональную форму.

Именно теоретическое и практическое решение этой задачи является обязательным для определения напряженного состояния гибкой оболочки сетеполотна. Это дает возможность достичь гладкой, четко организованной дискретной поверхности экрана, а также максимальных симметричных перераспределений усилий по всей поверхности зеркала и определения контуров раскрыя (выкроек) отдельных частей и общей технологической формы экрана, который после развертывания, т.е. расширения, примет требуемую геометрию.

Определение рисунка строения экрана из отдельных частей является исходной позицией для подбора конструкции крепления сетеполотна на контуры экрана.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что разные вариации конструкции выявили преимущества в основном форм из двух вариантов раскрыев экрана – в виде радиальных или кольцевых составных частей сетеполотна.

В обоих случаях без расчета технологической формы практически невозможно достичь гладкой функциональной поверхности и симметричности распределения усилий на поверхности зеркала, что резко ухудшает как радиотехнические параметры, так и работу всей конструкции с точки зрения ее устойчивости и даже прочности.

Поэтому поставлена и решена математическая задача по указанным двум вариантам определения геометрии экрана. В результате, на основе предварительно назначенных величин коэффициентов радиального и кольцевого расширения сетеполотна, определена как первичная – технологическая – так и вторичная – функциональная форма экрана.

В итоге проведенными исследованиями :

1. Определены базовые геометрические параметры конструкции и проработана система аппроксимации поверхности отражателя с учетом конструктивных особенностей каркаса зеркала, а также установлена технология крепления экрана для сохранения требуемых радиотехнических параметров.

2. Построены математические модели функциональной и технологической формы трикотажного сетеполотна экрана и выведены закономерности их взаимоотношения, с учетом механических особенностей материала и силовых параметров, возникающих от натяжения экрана в элементах конструкции антенны.

## 2 Вопросы математического моделирования механики космических опорно-каркасных трансформируемых систем

**Т**еоретическое исследование конструкции кольцевых трансформируемых космических антенн, с точки зрения математического моделирования механики системы на этапах транспортировки, развертывания и функционирования в космосе – задача сложная. Это объясняется не только особенной средой и условием существования космического инженерного сооружения, но и самой структурой строения конструкции трансформируемых радиотелескопов.

Конструкция представляет собой смешанный синтез взаимосвязанных стержней, вант, мембран, эластичных оболочек, пружин, элементов типа ножниц, синхронизаторов, демпферов, сферических и цилиндрических шарнирных и жестких узлов, энергоаккумуляторов, механических комплексов функциональных и эксплуатационных систем в виде сосредоточенных и распределительных масс и многих других элементов, которые в совокупности являются частями механизмов и сооружения.

Такой синтез, представляющий собой также и преднапряженную систему, является не только геометрически, но и физически нелинейной структурой, так как кроме других условий, наличие в связях “зазор-упор”, вызванных технологическими и эксплуатационными особенностями, обуславливают все классические проблемы механизмов.

Задачи математического моделирования, с точки зрения расчетов, осложняются от наличия множества составных элементов, степеней свободы и статистической неопределенности.

При такой постановке вопроса для теоретических исследований, в целях реализации практических задач по созданию, запуску на космические орбиты, развертыванию в космосе и функционированию антенны, намечаются два направления.

Первое: разработка аналитической инженерной методики для оценки общей механики системы и конструктивных особенностей. Для этой цели предусматривается искусственное моделирование фрагментов и процессов общей математической модели.

Второе: в целях максимального приближения модели к реальной механике КТРТ необходимо произвести всесторонний расчет проектируемой конструкции и сопоставление полученных результатов с результатами применения инженерной методики и экспериментальных исследований, на основе широкого использования современных вычислительных комплексов с определенными адаптациями конструктивной системы и модификации программы.

В первом приближении в некоторых случаях для упрощения задачи можно считать, что система является линейной, то есть допускается, что влияние вышеупомянутых нелинейностей на напряженно-деформированное состояние конструкций настолько мала, что ею можно пренебречь. Конструкция антенны является предварительно напряженной, опорное кольцо сжато, а лепестки, ванты и связи лепестков с опорным кольцом растянуты. В определенной мере преднапряжение следует цель убрать возможные зазоры в стыках (узлах) и обеспечить требуемую жесткость лепестков и вант. При низком уровне внешнего воздействия, когда усилия в отдельных элементах не превосходят усилий от предварительного напряжения, выше изложенное допущение правомерно. Условный допуск нелинейности конструкции частично можно оправдать, поскольку преднапряжение убирает слабинку “зазор” и его можно рассматривать как обыкновенный жесткий или шарнирный узел. Та требуемая жесткость вант и лепестков в ортогональном направлении из плоскостей лент, которая дает возможность считать их геометрически линейной системой, обеспечивается предварительным напряжением. Что касается вязких упруго-пластических связей, то они при статических нагрузках рассматриваются как упругие, а при динамических нагрузках – как вязко-упругие, введением в уравнения движения члена, зависящего от скорости движения.

Таким образом, в некоторых случаях, конструкция антенны рассмотрена как линейная система. Напряженно-деформированное состояние при статических нагрузках описывается системой линейных алгебраических уравнений, а при динамических нагрузках – системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Даже при допуске линейности системы степень статической или кинематической неопределимости настолько велика, что процесс решения задач для расчетных схем, в которых учитываются все элементы и узлы, сталкивается с проблемой количества элементов.

Поэтому следует искать пути уменьшения размерности системы разрешающих уравнений, не снижая при этом точность



расчета. Конструктивные системы некоторых элементов антенны позволяют применить методы, упрощающие их расчет. Так несущая конструкция антенны состоит из двух укрупненных частей: первое – это силовое кольцо с предварительно растянутыми лепестками, а второе – поддерживающие облучатель опорные фермы. Оба суперэлемента являются регулярными системами. Они состоят из отдельных часто повторяющихся элементов, в дальнейшем именуемыми “панелями”. Регулярность системы вдоль одной координаты позволяет применять известные методы континуализации. Это дает возможность привести систему канонических уравнений метода сил или метода перемещения с большим числом неизвестных к дифференциальным уравнениям. Аналитическое решение дифференциальных уравнений связано с меньшими трудностями вычислительного характера по сравнению с решением системы алгебраических уравнений с большим количеством неизвестных.

Другое решение задачи расчета на прочность и жесткость опор облучателя и силового кольца состоит в применении теории составных стержней, разработанной и апробированной при решении множества практически важных задач.

Следует отметить, что оба конструктивных элемента (опорное кольцо и стойки облучателя) длинномерные. Дифференциальные уравнения, описывающие их деформированное состояние, соответственно идентичны уравнениям деформации плоских кольцевых и пространственных прямолинейных стержней. Исходя из этого, расчетную схему антенны в некоторых случаях можно упростить, заменяя упомянутые суперэлементы имитирующими их стержневыми элементами.

На основе использования метода континуализации полученные выражения, позволяющие легко оценить прочность и устойчивость сложных решетчатых систем – опоры облучателя и силового кольца.

При расчете на температурные и динамические воздействия предлагаются две расчетные схемы с различными уровнями использования имитационных элементов.

С учетом этого, в целях создания теоретической базы конструирования инженерной системы трансформируемых радиотелескопов космического базирования и изучения процессов механики как на стадии трансформации, так и на стадии функционирования на орбитах, разработаны отдельные части метода расчета конструкции:

- Статика конструкции;
- Моделирование пространственной стержневой

- конструкции опоры облучателя и кольца, простой балкой постоянного сечения с равноценными физическими характеристиками;
- Расчет антенны на устойчивость;
- Расчет опоры облучателя на общую устойчивость;
- Расчет поясного стержня опоры облучателя на местную устойчивость;
- Расчет кольца на устойчивость;
- Расчет единой конструкции антенны на устойчивость;
- Устойчивость плоской формы изгиба лепестка;
- Динамика зеркала отражателя;
- Динамическая устойчивость лепестка;
- Динамическая устойчивость лепестка с учетом совместной работы сетеполотна отражателя;
- Взаимодействие вынужденных и параметрических возбуждаемых колебаний при вибрационных воздействиях;
- Взаимодействие вынужденных и параметрических возбуждаемых колебаний при импульсных воздействиях;
- Динамика разворачивания антенны;
- Динамика разворачивания опор облучателя по пространственной схеме;
- Динамика разворачивания опор облучателя по упрощенной схеме;
- Динамика разворачивания кольца с центром по сложной пространственной схеме;
- Динамика разворачивания кольца с центром по упрощенной схеме;
- Напряжения, деформации и колебания вариантов конструкции космических трансформируемых радиотелескопов диаметром зеркал 30 метров;
- Расчет вантово-стержневой антенны с тремя опорами облучателя на динамические воздействия с учетом предварительного натяжения и некоторых параметров геометрической нелинейности систем;
- Расчет вантово-стержневой лепестковой радиоантенны с четырьмя опорами облучателя на динамические и температурные воздействия с учетом сил преднапряжения;
- Расчет базового варианта разворачиваемого радиотелескопа диаметром зеркала 30 метров на

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

динамические и температурные воздействия с учетом сил преднапряжения с использованием метода конечных элементов.

Проведение исследований в этом направлении охватывает большой объем аналитического и цифрового материала.

В решении этой комплексной научной проблемы участвовали ученые разных специальностей. На основе постановки и определения научных направлений и методик, конкретных задач и инженерных моделей расчетных схем космических конструкций проведены оригинальные научные исследования, опубликование которых намечается в следующих изданиях работ Института космических сооружений. Они относятся к проблемам строительной механики функционирования конструкций орбитальных трансформируемых опорно-каркасных кольцевых радиотелескопов и кинетики процессов их развертывания и фиксации формы в космосе. Однако логика изложения материала в предложенной книге требует рассмотрения и анализа лишь конкретных результатов теоретического исследования механики системы в целях оценки принципов построения конструкции, испытательных комплексов и образцов техники, созданию которых и посвящается эта монография.

### 3 Результаты теоретических исследований базовой кольцевой лепестковой конструкции космического трансформируемого радиотелескопа диаметром зеркала 30 метров КТРТ.30.ОРА.Б.М.30

Пространственная расчетная схема конструкции радиотелескопа с использованием метода конечных элементов

Использование МКЭ для расчета антенны с учетом ее работы как пространственной системы на температурные воздействия и силы предварительного натяжения предопределяет выбор расчетной схемы в виде совокупности набора конечных элементов. При этом можно вводить незначительные упрощения путем замены некоторых конструктивных частей и узлов, смоделированными простыми элементами и идеализированными узлами, не влияющими на основные характеристики цельной конструкции и ее напряженно-деформированное состояние.

Таким образом, основная расчетная схема системы может быть представлена набором четырех типов конечных элементов: тонкая пластина – оболочка, элемент изгибающей балки, стержень и граничные элементы (рис.6.1).

Для аппроксимации тонких лепестков применяется элемент тонкой пластины – оболочки с четырьмя узлами. Для улучшения изгибных свойств такого элемента добавляется пятый узел, координаты которого определяются как среднее от угловых координат. На стадии формирования матрицы жесткости элемента, степени свободы пятого узла конденсируются, тем самым элемент тонкой пластины–оболочки получает 20 степеней свободы, т.е. по 5 в каждом узле (степень свободы, соответствующая вращению вокруг нормали к плоскости конечного элемента, исключена).

Для моделирования расколов и ломающих стержней силового кольца, а также ферменной структуры опоры облучателя, используется балочный конечный элемент с двумя узлами, каждый из которых обладает 6-ю степенями свободы.

Моделирование узлового соединения двух расколов типа “ножницы” проводится с использованием зависимых и незави-

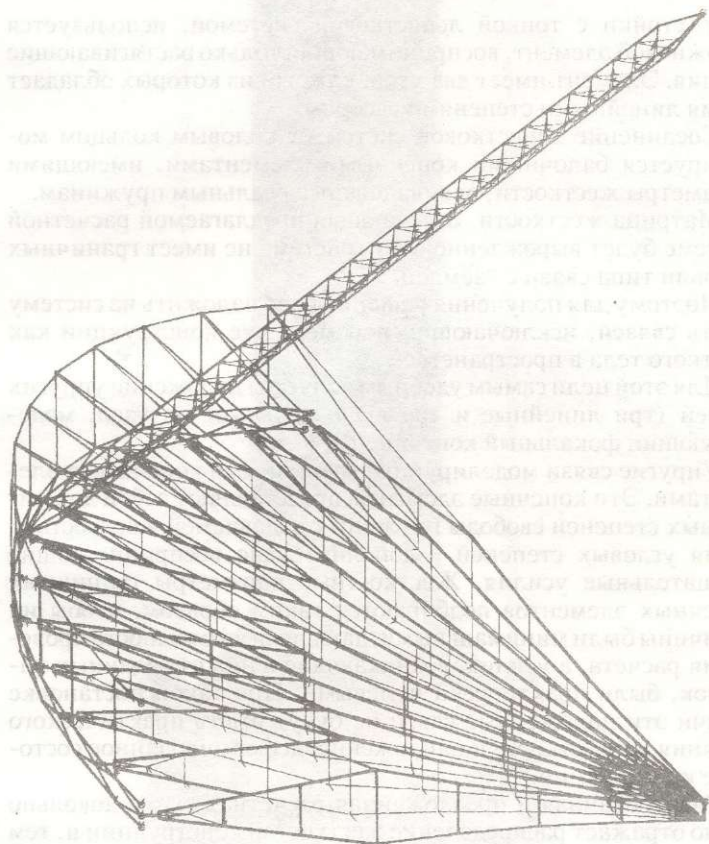


рис. 6.1

симых узлов. То есть в данном случае в пересечении двух раскосов имеются два узла, дающие возможность получить при жестком сочленении цельные раскосы. При этом зависимость степени свободы одного узла от степени свобод другого узла (кроме одной вращательной степени) создает систему пересечения цельных раскосов по типу “ножницы”.

Аналогичный вариант предлагается для моделирования ферменной структуры опоры облучателя.

Балочными конечными элементами аппроксимируется система стоек и опирающееся на них верхнее кольцо жесткости.

Для моделирования натянутых тросов, соединяющих вер-

хние стойки с тонкой лепестковой системой, используется стержневой элемент, воспринимающий только растягивающие усилия. Элемент имеет два узла, каждый из которых обладает тремя линейными степенями свободы.

Соединение лепестковой системы с силовым кольцом моделируется балочными конечными элементами, имеющими параметры жесткости, эквивалентные реальным пружинам.

Матрица жесткости, отвечающая предлагаемой расчетной системе будет вырожденной, т.к. система не имеет граничных условий типа связи с “землей”.

Поэтому для получения решения надо наложить на систему шесть связей, исключающих перемещение конструкции как жесткого тела в пространстве.

Для этой цели самым удобным является наложение упругих связей (три линейные и три вращательные) на узел, моделирующий фокальный контейнер.

Упругие связи моделируются граничными конечными элементами. Эти конечные элементы представляют собой для линейных степеней свободы пружины с задаваемой жесткостью, а для угловых степеней – дополнительно воспринимающие вращательные усилия. Жесткостные параметры граничных конечных элементов подбираются таким образом, чтобы их величины были минимальными, дающими возможность проведения расчета, а усилия, возникающие в них от заданных нагрузок, были практически нулевыми. При такой постановке задачи эти наложенные связи не будут иметь практического влияния на жесткость и напряженно-деформированное состояние конструкции.

Разработанная и предложенная расчетная схема довольно точно отражает распределение жесткостей конструкции и, тем самым, дает возможность получить достоверные результаты расчета антенны, на статические воздействия.

Представленная схема содержит около 1000 узлов, 96 стержневых, 240 плитно-оболочечных, 720 балочных и 6 граничных конечных элементов. Число степеней свободы такой математической модели составляет 6000. Таким образом, для получения напряженно-деформированного состояния конструкции, на одно сочетание нагрузок требуется решить линейную систему алгебраических уравнений порядка 6000 уравнений при ширине ленты свыше 500.

Поэтому предложенную расчетную схему желательно упростить, проводя эквивалентную замену определенных частей конструкции более простыми, не искажая при этом реальной картины распределения жесткости системы в пространстве.

### Определение усилий от предварительного натяжения и изменения температуры

В расчетной схеме введены следующие допуски. Лепестки заменены системой балочных конечных элементов с эквивалентными жесткостными параметрами на изгиб, сжатие, кручение и т.д.

Ферменная структура опоры облучателя заменена системой балочных элементов с соответствующими геометрическими и физическими параметрами.

После такого уровня допуска мы получаем расчетную схему (рис.6.2), состоящую из 301 узла, 96 стержневых, 540 балочных и 6 граничных конечных элементов.

Для предлагаемой расчетной схемы общее число степеней свободы равно 1788.

Предварительное натяжение моделируется заданием отрицательной температуры в центральной части конструкции.

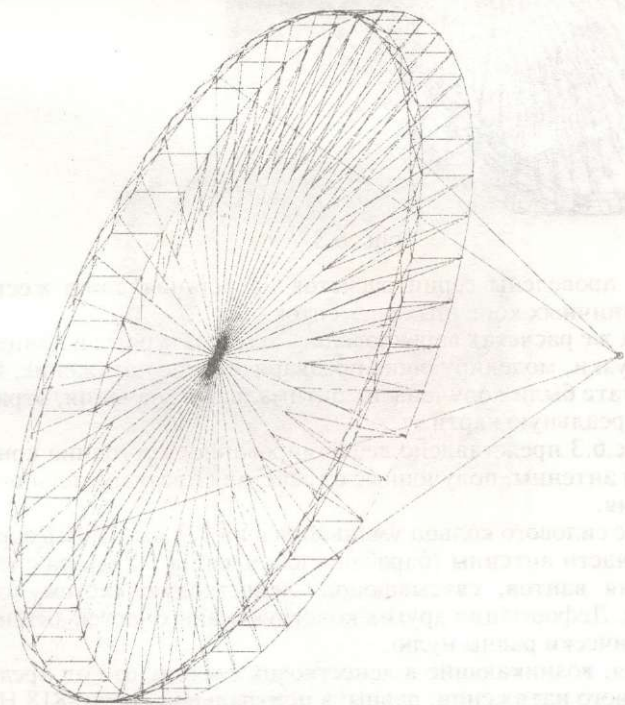


рис. 6.2

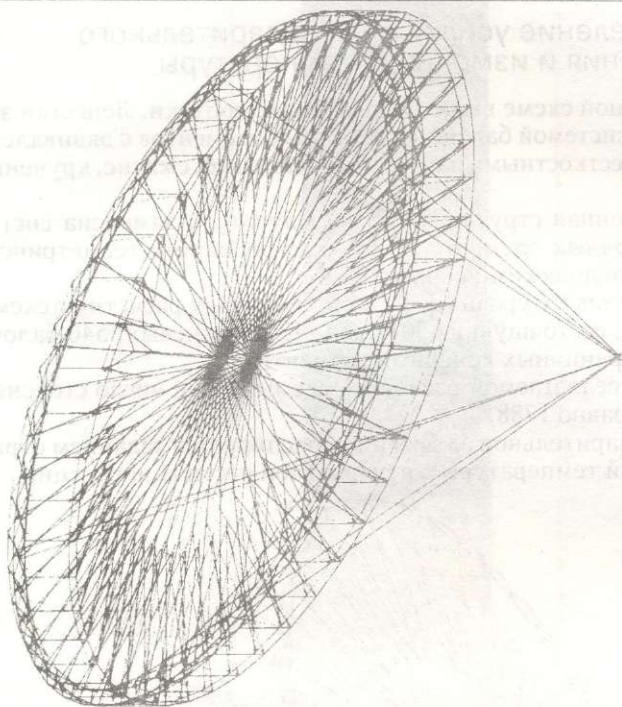


рис. 6.3

Были проведены серии расчетов по установлению жесткости граничных конечных элементов.

В этих же расчетах варьировались температурные и конечные нагрузки, моделирующие предварительное натяжение. И в результате были получены их оптимальные значения, отражающие реальную картину.

На рис.6.3 представлено деформированное состояние конструкции антенны, полученные от действия предварительного натяжения.

Радиус силового кольца уменьшился на 1,2 мм. Центр зеркальной части антенны (барaban) поднялся на 3,2 мм за счет натяжения вантов, связывающих лепестковую систему со стойками. Деформации других конструктивных частей антенны практически равны нулю.

Усилия, возникающие в лепестковой системе от сил предварительного натяжения, равны: в центральной части -818 Н, в конце лепестка (около пружины) -790 Н. Эта разница объяс-

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШВИЛИ \* ЛЕПЕСТКОВАЯ СИСТЕМА КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



няется натяжением вантов, усилия в которых равны 28 Н.

В ломающихся стержнях усилия от предварительного натяжения таковы: в верхнем ломающемся стержне они равны 2,95 кН, а в нижнем -3,07 кН. В этих элементах поперечные силы и моменты практически отсутствуют.

В сложном напряженном состоянии находятся раскосы. Сжимающие усилия в них равны 1,13 Н. Поперечные усилия, направленные к центральной части (барабану), меняются от 200 Н до 400 Н, а поперечные силы в плоскости силового кольца незначительны и равны 0,27 Н.

Максимальный момент в раскосе возникает в его середине -124 Н.м, на концах же момент равен 82 Н.м.

В верхнем кольцо от сил предварительного натяжения воз-

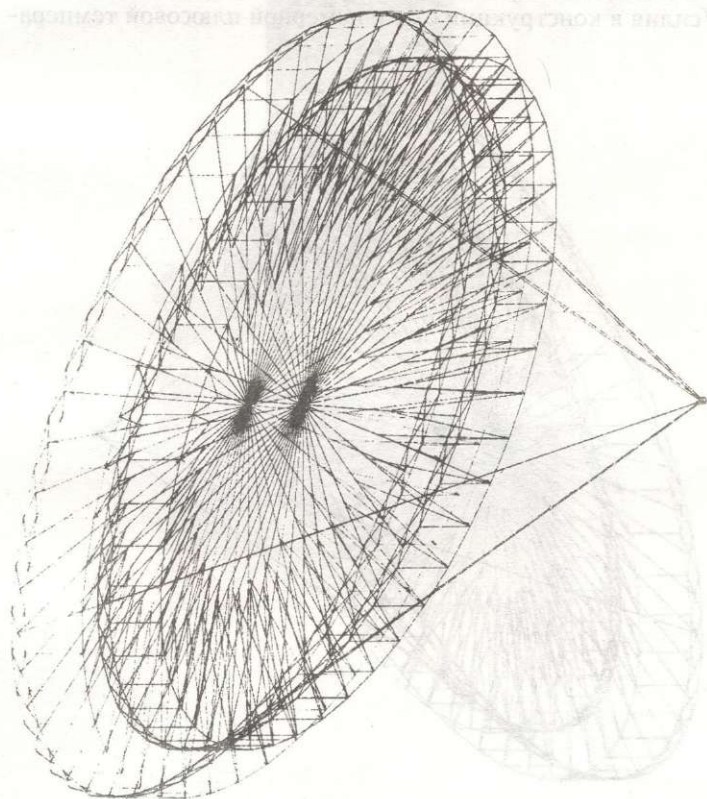


рис. 6.4

никают только сжимающие усилия, равные 220 Н.

В стойках максимальные усилия – это также сжимающие усилия, равные 12,4 Н. Это обуславливается передачей сил от вантовой части к верхнему кольцу.

В опорах облучателя от сил предварительного натяжения усилия практически не возникают.

На рис.6.4 представлено деформированное состояние антенны от равномерного температурного воздействия в  $150^{\circ}\text{C}$  с учетом сил предварительного натяжения.

По этой комбинации нагрузок смещение центральной части зеркала относительно точек крепления лепестков с силовым кольцом по вертикали составляет 4,7 мм, а вертикальное смещение относительно фокального контейнера – 69,3 мм. Радиусы силового и верхнего колец увеличились на 50,3 мм.

Усилия в конструкции от равномерной плюсовой темпера-

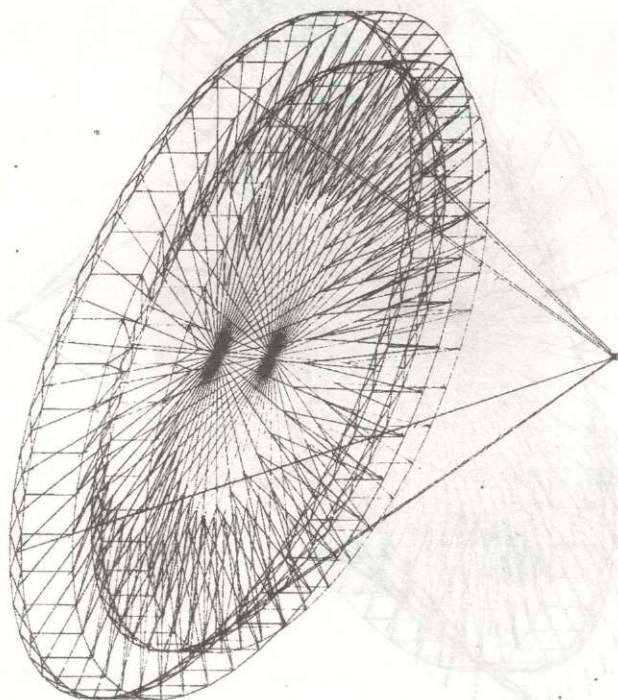


рис. 6.5

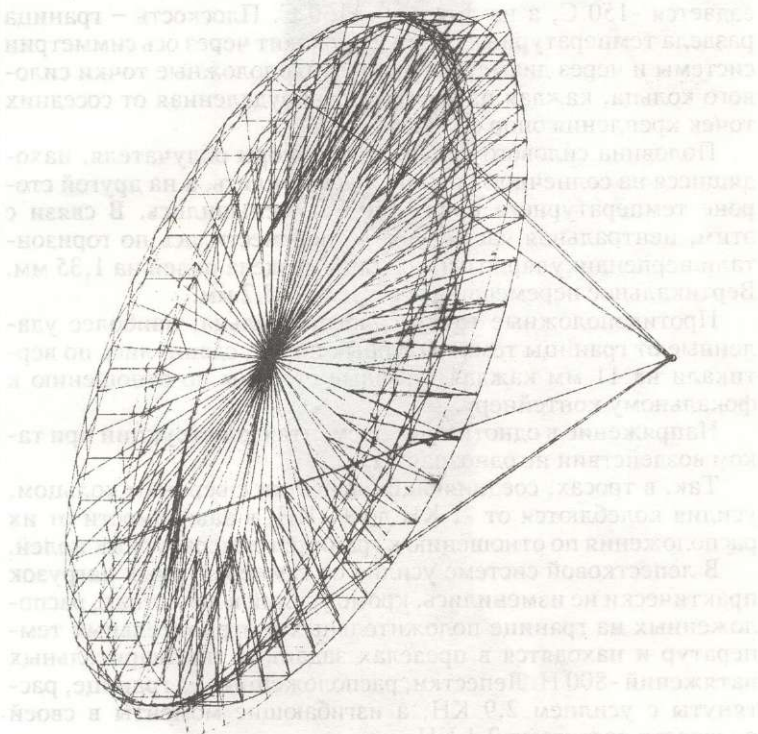


рис. 6.6

турной нагрузки, с учетом предварительного натяжения, практически не меняют величины и картину распределения усилий.

При задании отрицательной температурной нагрузки на конструкцию, с учетом начального натяжения, смещение центра зеркала по вертикали относительно силового кольца равно 3,4 мм, а относительно фокального контейнера – 75,7 мм (рис.6,5). Уменьшение радиусов силового и верхнего колец составляет 52,8 мм. Равномерная отрицательная температура также, как и положительная, не влияет на общую картину напряженного состояния конструкции.

На рис.6.6 представлено деформированное состояние антенны от неравномерного температурного воздействия, с учетом сил предварительного натяжения.

Температурная нагрузка на одной половине конструкции

задается  $-150^{\circ}\text{C}$ , а на другой –  $+150^{\circ}\text{C}$ . Плоскость – граница раздела температурных полей – проходит через ось симметрии системы и через диаметрально противоположные точки силового кольца, каждая из которых равноудаленная от соседних точек крепления опор облучателя.

Половина силового кольца и две опоры облучателя, находящиеся на солнечной стороне, расширились, а на другой стороне температурного поля  $-150^{\circ}\text{C}$ , уменьшились. В связи с этим, центральная часть зеркала переместилась по горизонтали перпендикулярно оси границы раздела полей на 1,35 мм. Вертикальное перемещение составляет 3,2 мм.

Противоположные точки силового кольца, наиболее удаленные от границы температурных полей, сдвинулись по вертикали на 11 мм каждая в разные стороны по отношению к фокальному контейнеру.

Напряжение в однотипных элементах конструкций при таком воздействии не однозначны.

Так, в тросах, соединяющих лепестки с верхним кольцом, усилия колеблются от  $-1$  КН до  $+1$  КН, в зависимости от их расположения по отношению к границе температурных полей.

В лепестковой системе усилия от температурных нагрузок практически не изменились, кроме усилий в лепестках, расположенных на границе положительных и отрицательных температур и находятся в пределах заданных предварительных натяжений  $-800$  Н. Лепестки, расположенные на границе, растянуты с усилием 2,9 КН, а изгибающие моменты в своей плоскости достигают 2,1 КН.м.

Усилия сжатия – растяжения в раскосах силового кольца колеблются от  $-1$  КН до  $+1$  КН. Максимальный изгибающий момент в плоскости силового кольца равен 0,53 КН.м.

Сжимающие усилия в ломающихся стержнях от предварительного натяжения изменились незначительно при несимметричной температурной нагрузке, и, находятся в пределах  $2,9$  КН  $\div$   $3,6$  КН. В верхнем кольце усилия сжатия равны  $-0,2$  КН.

Опоры облучателя не ощущают эту комбинацию нагрузок и усилия в них практически равны нулю.

Серия проведенных расчетов на температурные воздействия не учитывает функцию самой конструкции антенны орбитальной ориентации в установлении реальных температурных полей, т.е. параметров температурных воздействий, которые резко облегчают те экстремальные представления о величинах и разнице одновременно и раздельно действующих температур, на основе которых были определены зна-

чения температур, которые составляют  $\pm 150^\circ\text{C}$ .

Для решения этой задачи были проведены научно-исследовательские работы (1. Исследование деформаций зеркала ОРА-1 в космических условиях при неравномерном нагреве антенны. Отчет о НИР, 1990, инв. №132, 226 стр. Аллатов А.П., Шичанин В.Н., Скорик А.Д., Кулик А.Д. и др. Институт технической механики АН Украины, Днепропетровск; 2. Разработка программ расчета и численное моделирование тепловых деформаций элементов конструкций. Отчет о НИР, инв. №136, 224 стр. Шичанин В.Н., Аллатов А.П., Белоношко П.А. и др. Институт технической механики АН Украины, Днепропетровск), некоторые результаты и выводы которых приводятся здесь в целях более широкого представления поведения космического трансформируемого радиотелескопа – КТРТ.30.ОРА.Б.М.30 от температурных воздействий.

В работе отображены проблемы численно-аналитических исследований периодических тепловых режимов, определения температурного поля конструкции и температурные деформации антенны, а также комплекс программ вычислений. Получены практические результаты для проектирования и оценки поведения конструкции на космической орбите.

Предложенные исследования опираются на физику природы теплоприема и передачи в зависимости от конструкции и материала. При такой постановке вопроса автономная картина теплового поля резко смягчает параметры искажения формы и концентрации напряжений в элементах радиотелескопа. Этому способствует строение антенны и конструкционные способы, применяемые при необходимости.

В итоге цели и основные результаты работы сформулированы следующим образом:

“Цель исследований тепловых деформаций конструкции ОРА, результаты которых составляют основное содержание отчета, заключается в решении следующих задач:

- расчет плотности тепловых потоков, падающих на элементы конструкции;
- расчет температурного поля конструкции антенны в различных ее положениях на орбите;
- расчет тепловых деформаций элементов конструкции, наиболее существенно влияющих на свойства антенны.

Составлена программа и проведен расчет плотности суммарного теплового потока на элементы конструкции ОРА. Максимальные значения плотности: на лепестки –  $800 \text{ вт/м}^2$ , на секции кольца жесткости –  $1500 \text{ вт/м}^2$ , на стойки облучателя –  $1100 \text{ вт/м}^2$ . Минимальные значения плотности для всех

элементов можно оценить одной величиной – около  $100 \text{ вт/м}^2$ .

Проведено численно-аналитическое исследование периодических температурных режимов. Получены оценочные соотношения, связывающие параметры периодичности режима с конструктивными параметрами. Показано, что в первом приближении на амплитуду колебаний температуры и ее среднее значение влияют всего два условных конструктивных параметра, выраженные, в свою очередь, через естественные параметры: площади излучения и поглощения, степень черноты, масса и теплоемкость элемента.

Показано, что величина среднеквадратического отклонения, а также абсолютного отклонения по оси антенны от номинальной профилированной части лепестка, существенно зависит от координат места крепления к центральному телу.

Проведен расчет температурных деформаций профиля лепестков для различных положений ОРА на орбите. Максимальное отклонение на расстоянии 9 м от корня лепестка составляет величину порядка 2 мм; минимальное – 0,08 мм; максимальное значение среднего квадрата отклонения равно  $1,0 \text{ мм}^2$ , минимальное –  $0,2 \text{ мм}^2$ .

Для определения деформаций трубчатых элементов и лепестков ОРА получены соотношения некоторых простейших распределений температуры, обусловленных неравномерным нагревом. При значениях плотности тепловых потоков  $400 \text{ вт/м}^2$  и  $100 \text{ вт/м}^2$ , падающих на лепесток с разных сторон, отклонение оси лепестка составляет величину порядка 0,1 мм на расстоянии 10 м от места крепления.

Для линейного распределения температуры, при рассмотрении пластины, ширина которой равна усредненной ширине лепестка в виде балки на двух опорах, наибольший прогиб в середине пластины составляет 0,6 мм при перепаде температуры по ширине пластины в  $1^\circ\text{К}$ .

Величина отклонения оси полого кругового стержня, геометрические параметры которого соответствуют штанге опорного кольца, равна 0,1 мм при перепаде температур в поперечном сечении стержня в  $0,3^\circ\text{К}$  на расстоянии 1 м от места крепления. Перепад температуры в  $0,3^\circ\text{К}$  соответствует максимальному перепаду плотностей потоков с разных сторон стержня.

Составлены расчетные схемы и программы вычислений на ЭВМ температурных полей элементов конструкции ОРА-ферм (стоек облучателя), лепестков, секций опорного кольца и конструкции антенны в целом.

Расчетным путем определены установившиеся периодичес-

кие режимы изменения температуры граней стойки облучателя, средних точек секций опорного кольца и лепестков ОРА. Диапазон изменений температуры лепестков находится в интервале  $190 \div 260^\circ\text{K}$ , граней ферм –  $205 \div 280^\circ\text{K}$ , секций кольца –  $200 \div 280^\circ\text{K}$ .

Диапазон изменений температуры каждой грани фермы и каждой секции кольца незначителен и температуры этих элементов могут быть приняты постоянными.

Диапазон изменений в лепестках составляет: для лепестка 1 –  $200 \div 225^\circ\text{K}$ ; для лепестка 7 –  $215 \div 250^\circ\text{K}$ ; для лепестка 13 –  $250 \div 260^\circ\text{K}$ . Для уменьшения перепада значений температуры лепестков, в зависимости от их номера предложено осуществить закрутку ОРА вокруг ее продольной оси.

В результате расчета температурных полей получено, что периодические режимы изменения температуры, при неизменном взаимном положении плоскости орбиты и солнца, устанавливаются для лепестков – на 4-м витке, для ферм и секций опорного кольца – примерно на 35-м витке.

Произведен расчет деформаций антенны в целом. С этой целью введены понятия натуральной (исходной) и актуальной (деформированной) конфигурации антенны. Для описания деформации антенны как целого введены следующие характеристики: смещение зеркала антенны как жесткого целого, отсчитываемое от его положения в натуральной конфигурации; среднее квадратичное отклонение поверхности деформированного зеркала относительно этого смещенного положения и смещение излучателя относительно его положения в натуральной конфигурации.

На основе полученных числовых характеристик можно сделать следующие выводы:

Смещение облучателя в плоскости, перпендикулярной оси антенны равно нулю; смещение зеркала как жесткого целого в плоскости, перпендикулярной оси антенны, составляет  $0,1 \div 0,7$  мм. На этом основании можно утверждать, что ось антенны своего положения практически не меняет.

Максимальное смещение зеркала антенны как жесткого целого вдоль оси антенны относительно его положения в натуральной конфигурации составляет 15,9 мм (в направлении к облучателю); максимальное смещение облучателя вдоль оси антенны относительно его положения в натуральной конфигурации составляет 4,5 мм (в направлении к зеркалу); таким образом, расстояние между зеркалом и облучателем сокращается на 20,4 мм.

Среднее квадратичное отклонение точек поверхности, от-

считываемое по вертикали от его смещенного положения, лежит в пределах  $1,0 \div 1,2$  мм.

Все проведенные исследования подтверждают способность конструкции в космических условиях соответствовать эксплуатационным требованиям радиотелескопа при его изготовлении из алюминиевых и титановых сплавов”.

Однако, при конструировании системы из композиционных углепластиковых материалов проблемы точности от температурных воздействий практически исчезают, так как тепловые деформации качественно уменьшаются.

### Определение форм собственных колебаний

Пространственная динамическая расчетная схема представляет собой, как и при статических расчетах, совокупность конечных элементов, только во всех узлах несущую сосредоточенные массы.

Количество узлов равно количеству масс – 301. Для аппроксимации геометрии сооружения использованы 96 стержневых, 540 балочных, и 6 граничных конечных элементов. Здесь также, как и при статических расчетах, лепестковая система заменена балочной системой, опоры облучателя – балками. Для исключения перемещения конструкций как жесткого тела, на узел, моделирующий фокальный контейнер, наложены упругие связи в виде граничных конечных элементов.

Жесткостные параметры замененных частей конструкций приняты такими же, как и при статических расчетах, а жесткости наложенных упругих связей получены путем численных экспериментов, дающих возможность получить частоты и формы собственных колебаний при их минимальном значении.

Таким образом, пространственная динамическая расчетная схема представляет собой совокупность 642 конечных элементов, несущих 301 сосредоточенную массу.

По предложенной схеме проведены расчеты по определению напряженно-деформированного состояния конструкции от динамических воздействий, возникающих при эксплуатации антенны.

Основными динамическими нагрузками на конструкцию являются воздействия от двигателей, расположенных около крепления опор облучателя с силовым кольцом и на фокальном контейнере.

Для решения поставленной задачи принят метод суперпозиции форм собственных колебаний. Первой фазой решения является определение частот и форм собственных колебаний.



Во второй фазе, используя полученные формы и частоты, определяется реакция конструкции по времени на различные воздействия.

Определение частот и форм собственных колебаний антенны по предложенной пространственной расчетной схеме происходит по методу итерации подпространства. Решение ищется с использованием матриц жесткости. В ней участвуют как линейные, так и вращательные степени свободы. В данном случае мы имеем расчетную схему, обладающую 1788 степенями свободы. Максимальное количество итераций при решении принято считать 16, а точность схождения наивысшей формы собственных колебаний —  $10^{-5}$ . По предложенной расчетной схеме определены 20 первых форм и частот собственных колебаний антенны.

Первые 6 форм соответствуют фиктивным колебаниям кон-

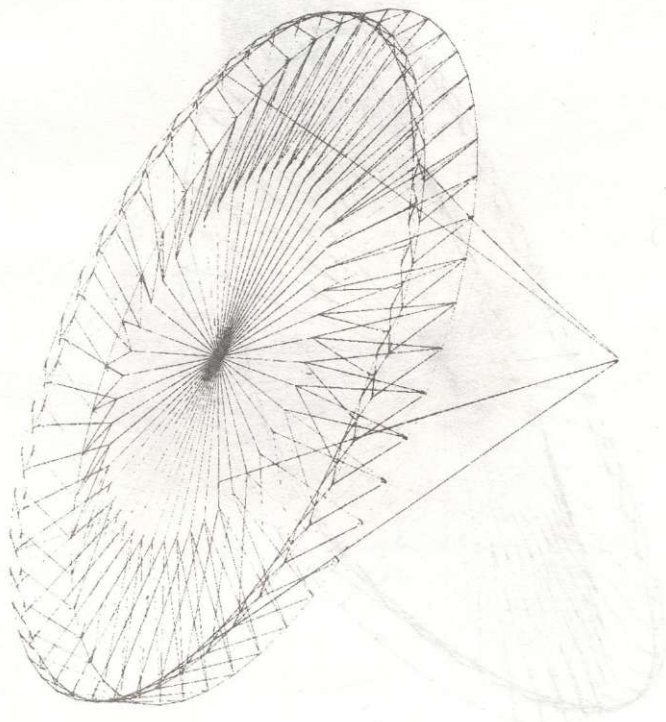


рис. 6.7

струкции, обусловленные наложением упругих связей, которые исключают перемещение антенны как жесткого тела. Частоты этих колебаний имеют порядок  $10^{-3} - 10^{-2}$  Герц (Гц).

На рис.6.7 дана I основная (в расчете 7) форма собственных колебаний конструкции с частотой  $f_1 = 0,8$  Гц (период  $T_1 = 1,25$  сек).

Эта форма представляет собой вращение верхнего кольца и лепестков относительно центральной вертикальной оси, вызывая при этом изгиб стоек.

На рис.6.8 дана II форма с частотой колебаний  $f_2 = 0,929$  Гц ( $T_2 = 1,076$  сек) представляющая собой сложное колебание, которое можно разбить на составляющие части колебаний конструкции. Так силовое кольцо колеблется из своей плоскости по синусоиде, где точками перегиба (нулевыми) являются узлы крепления опор облучателя. Массы, принадлежащие сило-

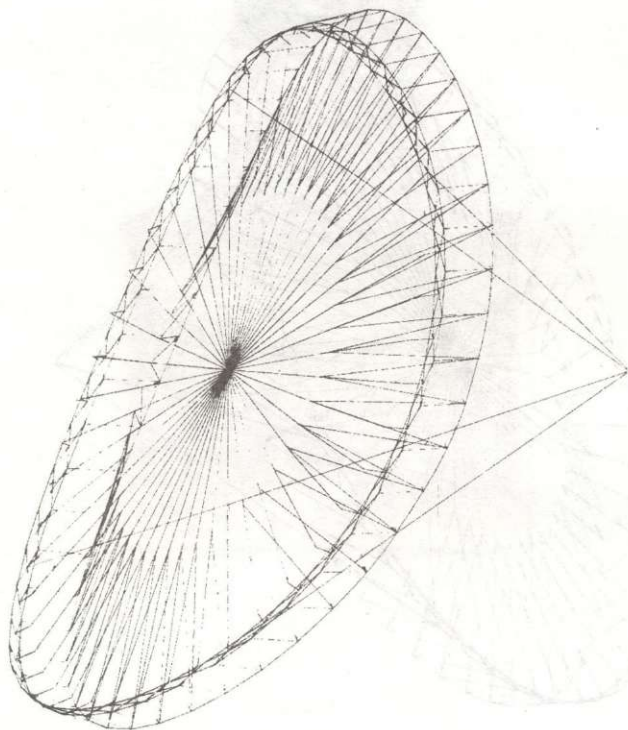


рис. 6.8

вому кольцу, расположенных в середине между креплениями опор, последовательно смешаются из плоскости кольца на величину  $+1,0$  и  $-1,0$  последовательно.

Верхнее кольцо колеблется в своей и перпендикулярной к ней плоскостях. В последней – колебание аналогично силовому кольцу (по синусоиде, с максимальными ординатами  $\pm 1,0$ ). В своей плоскости кольцо колеблется по радиальному направлению равномерно расширяясь и сужаясь. Максимальное увеличение радиуса –  $0,18$ .

Центральная, лепестковая часть следует (концы лепестков) за силовым кольцом, колеблющимся из своей плоскости, только максимальные смещения равны  $\pm 0,5$ . Центр лепестковой системы в данной форме колебаний является неподвижным.

На рис.6.9 представлена III форма собственных колебаний антенны. Частота колебаний равна  $f_3 = 0,950$  Гц ( $T_3 = 1,04$  сек). Как видно из рисунка, по данной частоте колеблются только

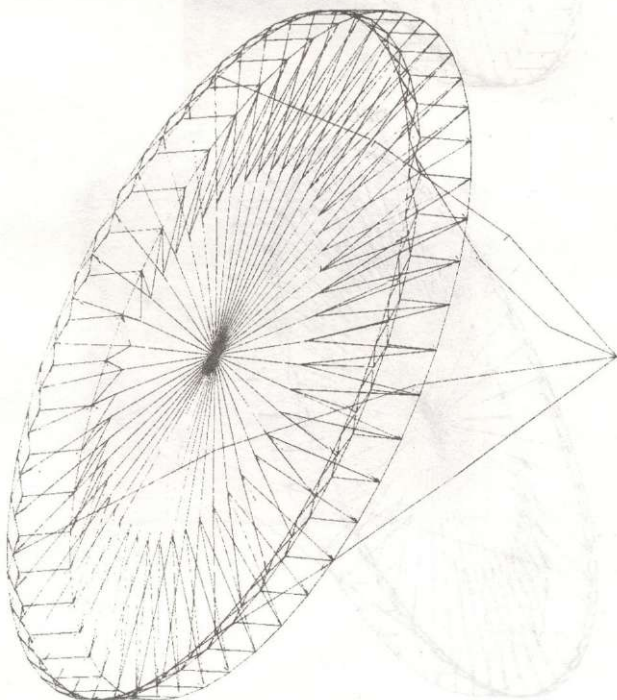


рис. 6.9

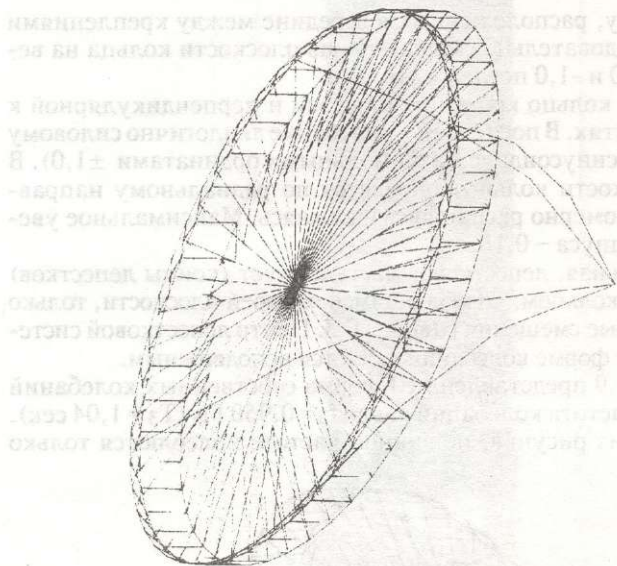


рис. 6.10

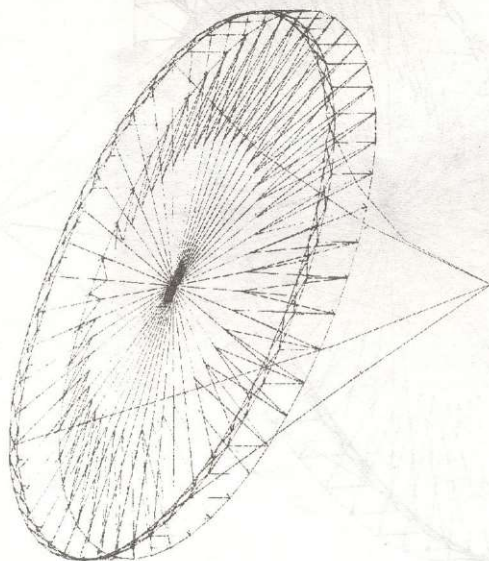


рис. 6.11

Э. В. МЕДВЕДЬ, МАРШАЛЫШЫИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

опоры облучателя.

Средние массы опор облучателя перемещаются в направлении, перпендикулярном к плоскости, проходящей через ось опоры и центральную вертикальную ось.

В IV и V формах собственных колебаний, как и в III, колеблются в основном только опоры облучателя (рис.6.10, 6,11) Частоты колебаний имеют одинаковые величины  $f_4 = f_5 = 1,074$  Гц ( $T_4 = T_5 = 0,931$  сек), а сами формы идентичны, только они сдвинуты между собой на угол  $\pi/2$  в плоскости силового кольца.

Следующая VI форма собственных колебаний показана на рис.6.12. Собственная частота колебаний равна  $f_6 = 1,238$  Гц, ( $T_6 = 0,808$  сек). При этой форме проявляются колебания верхнего и силового колец. Силовое кольцо колеблется по I кольцевой форме, имея окружность в две полуволны (эллипс). Этот эллипс выходит из своей плоскости и является загнутым в

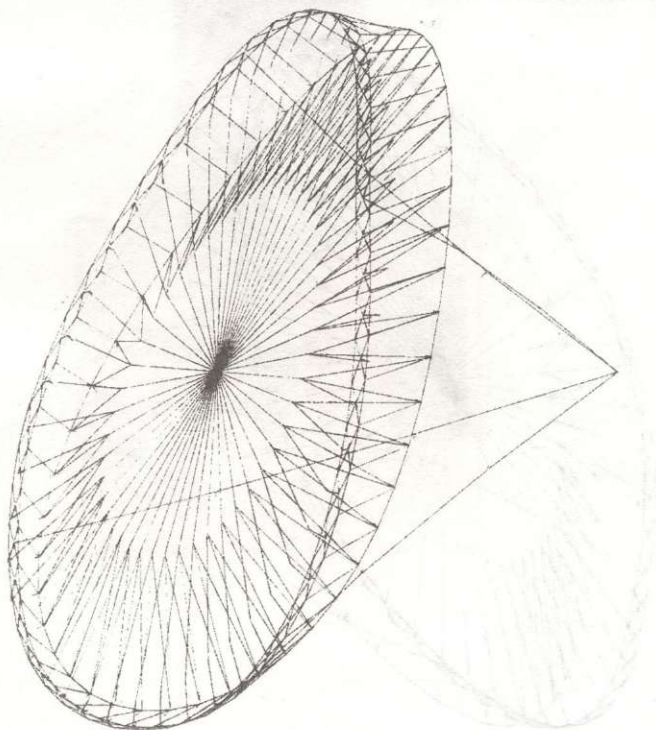


рис. 6.12

сторону фокального контейнера. Осью перегиба является малая ось эллипса. Увеличение и уменьшение радиуса кольца равно  $\pm 1.0$ ; а перемещение при вертикали —  $\pm 0.7$ . Верхнее кольцо колеблется по аналогичной форме, только это колебание сдвинуто относительно силового кольца на угол  $\pi/2$  и изгиб его направлен от фокального контейнера.

Концы лепестков следуют движению силового кольца по вертикали на 0,38. Разницу в величинах и направлениях перемещения воспринимают на себя пружины, соединяющие концы лепестков с силовым кольцом.

Остальные высшие формы собственных колебаний показаны на рис.6.13–6.20. Их частоты колебаний соответственно равны:  $f_7 = f_8 = 1,320$  Гц ( $T_7 = T_8 = 0,757$  сек),  $f_9 = 1,401$  Гц, ( $T_9 = 0,714$  сек),  $f_{10} = 1,448$  Гц, ( $T_{10} = 0,619$  сек),  $f_{11} = 1,625$  Гц, ( $T_{11} = 0,615$  сек),  $f_{12} = f_{13} = 1,63$  Гц ( $T_{12} = T_{13} = 0,6135$  сек),  $f_{14} = 1,743$  Гц, ( $T_{14} = 0,574$  сек).

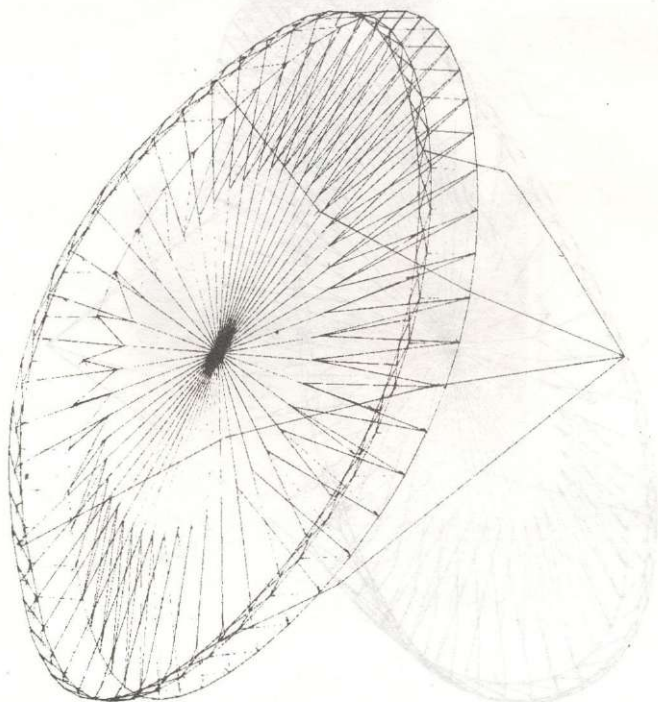


рис. 6.13

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ И В. П. АНФОРОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИ И ПЕРМСКО-МУРГУШЕВЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

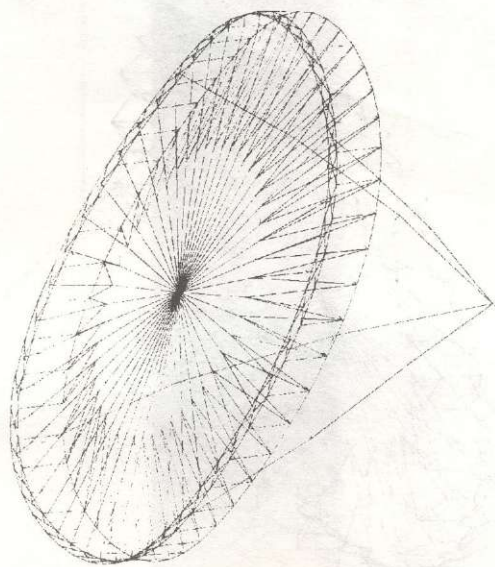


рис. 6.14

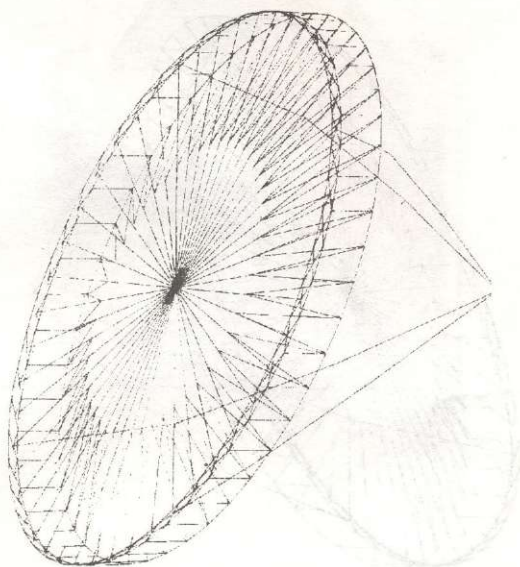


рис. 6.15

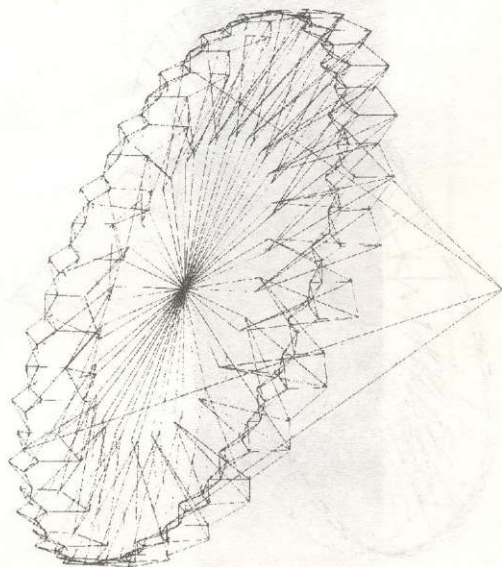


рис. 6.16

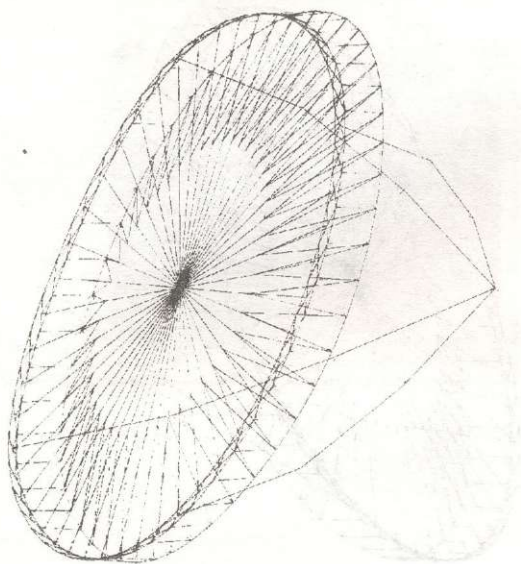


рис. 6.17

Э. В. МЕДЗМАРИШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



И. И. МАРИШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

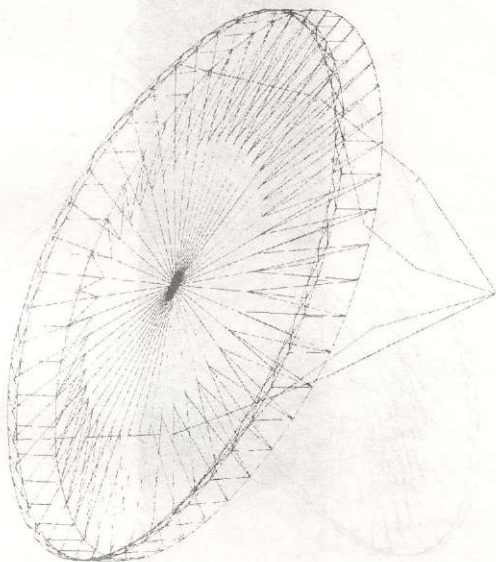


рис. 6.18

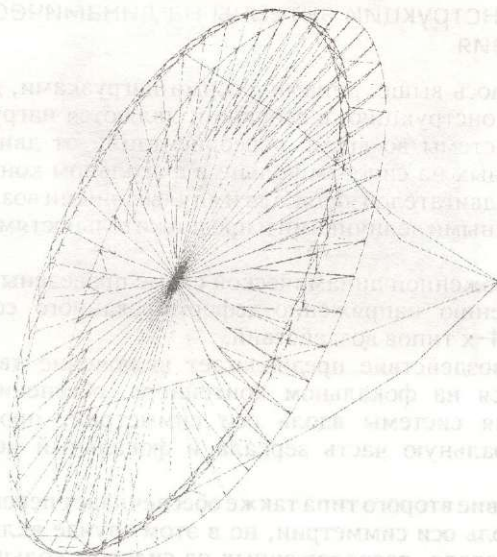


рис. 6.19

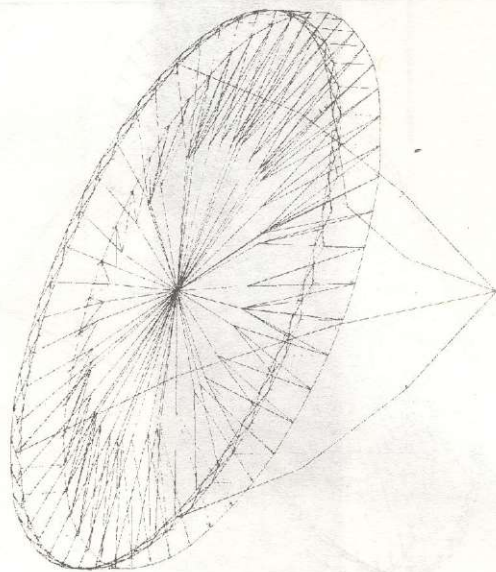


рис. 6.20

### Расчет конструкции антенны на динамические воздействия

Как отмечалось выше, динамическими нагрузками, действующими на конструкцию, в основном, являются нагрузки управления системы во время переориентации от двигателей, расположенных на силовом кольце и фокальном контейнере. Нагрузки от двигателей являются импульсивными воздействиями с различными величинами и продолжительностями во времени.

По предложенной динамической схеме проведены расчеты по определению напряженно-деформированного состояния антенны от 4-х типов воздействий.

Первое воздействие предполагает включение двигателя, находящегося на фокальном контейнере, обеспечивающим перемещение системы вдоль оси симметрии, проходящей через центральную часть зеркала и фокальный контейнер (рис.6.21,а).

Воздействие второго типа также обеспечивает перемещение антенны вдоль оси симметрии, но в этом случае включаются четыре двигателя, расположенных на силовом кольце у опор облучателя (рис.6.21,б). Третьим типом является воздействие,

вызывающее прямолинейное перемещение антенны в плоскости силового кольца. Это движение обеспечивается включением двух противоположных двигателей, расположенных на силовом кольце, и одного двигателя, находящегося на фокальном контейнере (рис.6.21,в).

Четвертый тип динамических нагрузок возникает от переориентации антенны относительно оси симметрии, вызывая при этом вращение системы относительно центра масс в плоскости, проходящей через центральную ось симметрии и одну из опор облучателя. Такое вращение осуществляется включением в противоположных направлениях двигателей фокального контейнера и двигателей расположенных на силовом кольце (рис.6.21,г).

Для каждой динамической нагрузки рассматривались четыре типа загрузки, отличающиеся собой только длитель-

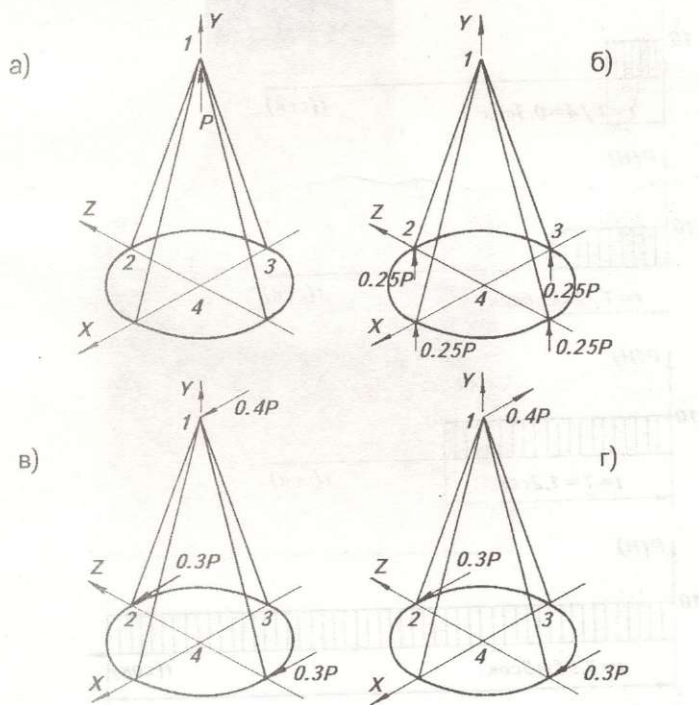


рис. 6.21

ностью воздействия.

Были выбраны продолжительности воздействий, находящиеся в зависимости от основного периода рассматриваемой конструкции:

$t_1 = T_1/4 = 0,3$  сек,  $t_2 = T_1/2 = 0,6$  сек,  $t_3 = T_1 = 1,2$  сек,  $t_4 = 2,5 \times T_1 = 3,0$  сек.

Ввиду того, что мы рассматриваем решение задачи в линейной постановке, то целесообразнее для удобства анализа и сопоставления результатов суммарную величину уровня воздействия двигателей привести к 10 Н (1 кг сила).

Схемы воздействия двигателей в основном подобраны для определения всех возможных случаев с целью выявления наилучших комбинаций с точки зрения деформированно-напряженного состояния конструкций.

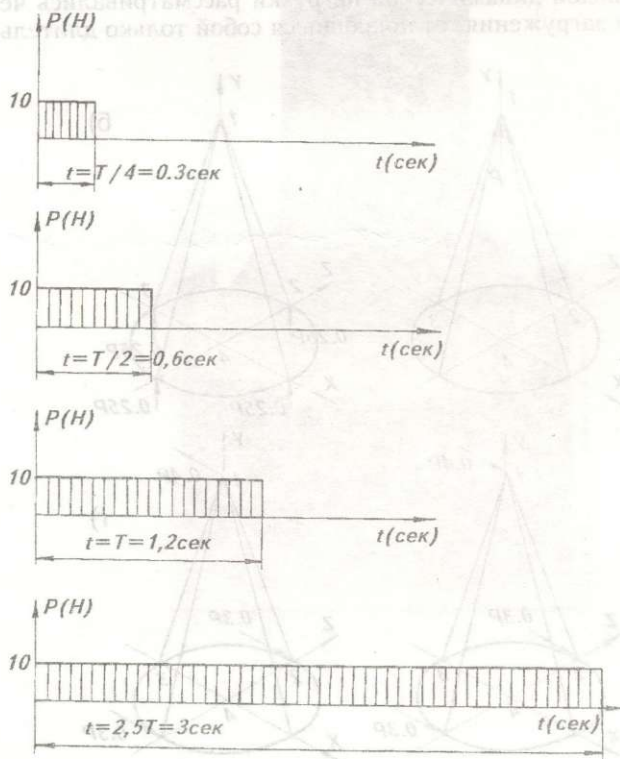


рис. 6.22

На рис.6.22 представлены изменения воздействий двигателей на конструкцию.

Рассмотрим результаты расчетов конструкции антенны на определенные выше динамические нагрузки, обусловленные включением двигателей при ее переориентации.

На рис.6.23 представлено распределения усилий сжатия-растяжения во времени в элементах конструкции антенны от динамического воздействия (импульса), вызванного включением двигателя фокального контейнера (движение вдоль оси симметрии) при длительности воздействия  $1/4$  основного периода собственных колебаний  $t = T_1/4 = 0,3$  сек.

Максимальные усилия в элементах конструкции наблюдаются на  $t = T_1/4 = 0,3$  сек. Практически во всех элементах усилия возрастают от 0 до максимального своего значения за 0,3 сек, а затем уменьшаются и становятся равными 0 при

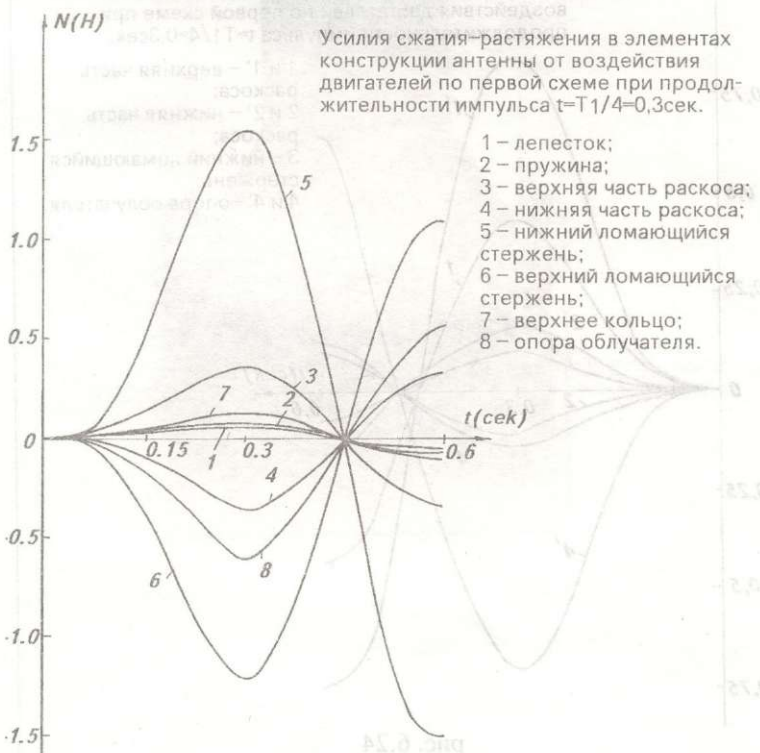


рис. 6.23

$t = 0,45$  сек. Далее они возрастают с противоположным знаком. Таким образом, мы имеем колебание усилий с полупериодом  $0,45$  сек.

В центральной части лепестка максимальное усилие равно  $5,34 \times 10^{-2}$  Н, а в местах соединения с силовым кольцом —  $7,58 \times 10^{-2}$  Н. При таком нагружении максимально напряженными являются ломающиеся стержни.

Позицией 5 на рис.6.23 показан график изменения этих усилий, максимальное значение которого равно  $1,57$  Н. Здесь же даны графики изменения усилий в раскосах (поз. 3, 4), расположенных у опор облучателя. Своего пикового значения —  $0,37$  Н — эти усилия достигают при  $t = 0,3$ . Растягивающие усилия в опорах облучателя (поз. 8) доходят до  $0,61$  Н.

На рис.6.24 даны графики изменений поперечных усилий и

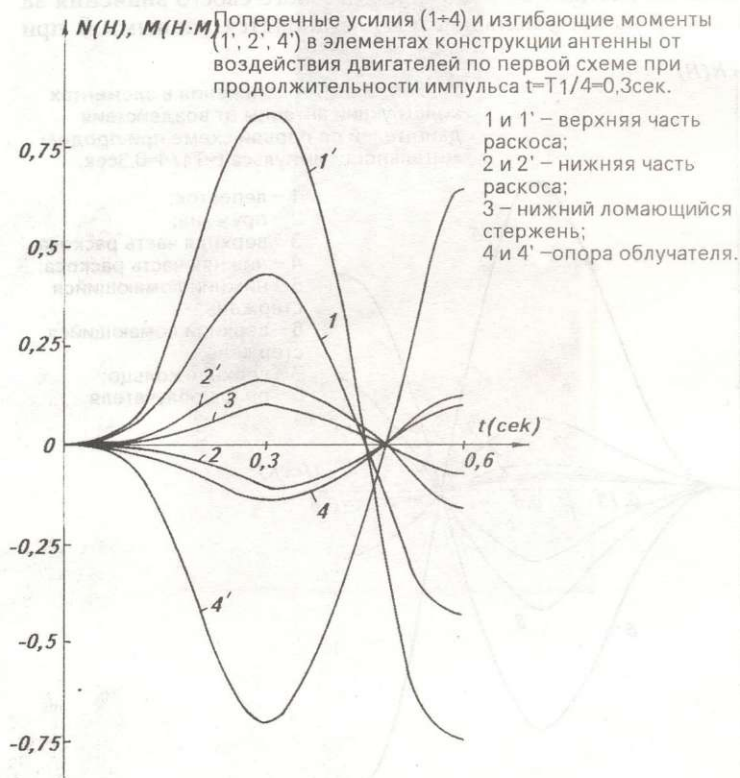


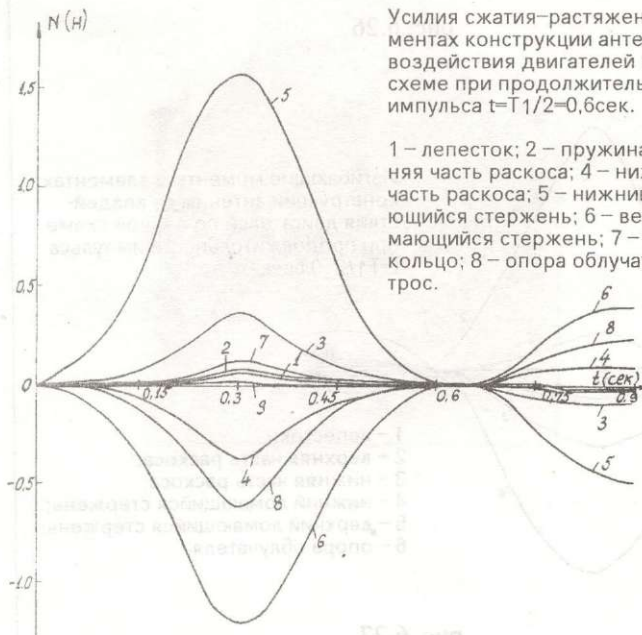
рис. 6.24

Э. В. МЕДВЕДЕВА И ДРУГИЕ. АНТЕННЫ ДЛЯ КОСМОСА И НА ЗЕМЛЕ

изгибающих моментов в выше рассмотренных элементах. Здесь наблюдается аналогичная картина изменения этих факторов, т.е. при  $t = 0,3$  сек они имеют максимальное значение, а при  $t = 0,45$  сек – равны. Максимальные перерезывающие усилия и изгибающие моменты действуют в раскосах силового кольца, значения которых, соответственно, равны  $0,44$  Н и  $0,84$  Н.М.

При увеличении длительности воздействия импульса до  $t = T_1/2 = 0,6$  сек максимальные значений усилий во всех элементах практически не меняются (рис.6.25, 6.26, 6.27). Как видно из этих графиков, максимальные усилия возникают опять на  $0,3$  сек. Влияние изменения длительности импульса в данном случае выражается в вытягивании графиков по оси времени, т.е. в увеличении полупериода колебаний усилий от  $0,45$  до  $0,6$  сек.

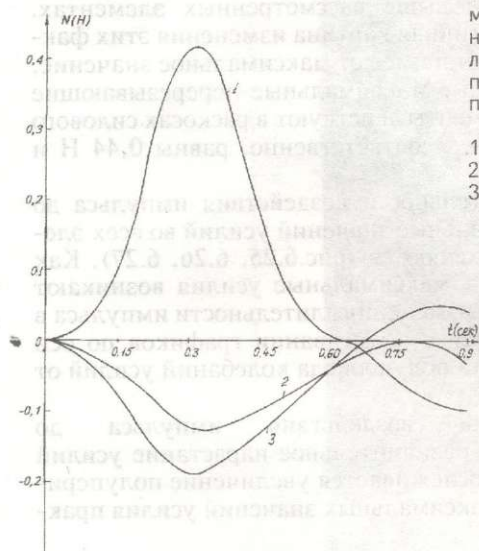
Увеличение времени воздействия импульса до  $t = T_1 = 1,2$  сек вызывает незначительное нарастание усилий ( $5 \div 10\%$ ). Здесь также прослеживается увеличение полупериода колебания усилий. Максимальных значений усилия прак-



Усилия сжатия-растяжения в элементах конструкции антенны от воздействия двигателей по первой схеме при продолжительности импульса  $t = T_1/2 = 0,6$  сек.

1 – лепесток; 2 – пружина; 3 – верхняя часть раскоса; 4 – нижняя часть раскоса; 5 – нижний ломающийся стержень; 6 – верхний ломающийся стержень; 7 – верхнее кольцо; 8 – опора облучателя; 9 – трос.

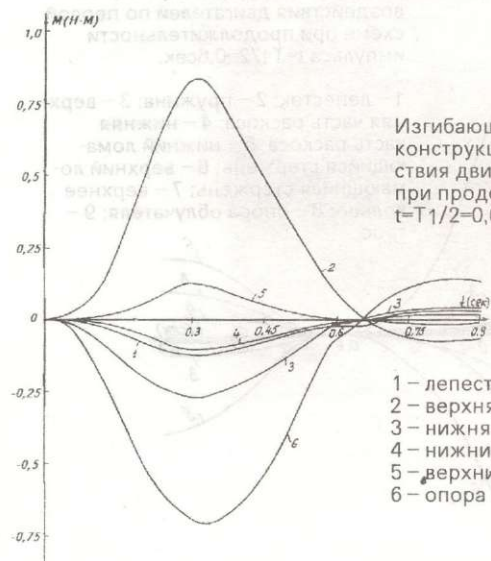
рис. 6.25



Поперечные усилия в элементах конструкции антенны от воздействия двигателей по первой схеме при продолжительности импульса  $t=T/2=0,6$ сек.

- 1 – верхняя часть раскоса;
- 2 – нижняя часть раскоса;
- 3 – опора облучателя.

рис. 6.26



Изгибающие моменты в элементах конструкции антенны от воздействия двигателей по первой схеме при продолжительности импульса  $t=T/2=0,6$ сек

- 1 – лепесток;
- 2 – верхняя часть раскоса;
- 3 – нижняя часть раскоса;
- 4 – нижний ломающийся стержень;
- 5 – верхний ломающийся стержень;
- 6 – опора облучателя.

рис. 6.27

Э.В. МЕДВЕДЕВА И ДРУГИЕ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ



тически во всех элементах достигают при  $t = T_1/4 = 0,3$  сек. При длительности включения двигателя  $t = 2,5 \times T_1 = 3,0$  сек воздействие уже практически не носит характер импульса. Данное нагружение приближается к стационарному воздействию с постоянным ускорением. Усилие, вызванное этим воздействием выше, чем при более коротких импульсах. Так, в раскосах сжимающие усилия возросли от 0,37 Н до 1,5 Н, в ломающихся стержнях – от 0,61 Н до 2,13 Н. Величины этих усилий получены в конце расчетной временной области при  $t = 0,45$  сек. Этим самым можно заключить, что они не являются максимальными для данного нагружения.

Теперь перейдем к рассмотрению расчетов, полученных при воздействии четырех двигателей, расположенных на силовом кольце у опор облучателя, каждый из которых воздейству-

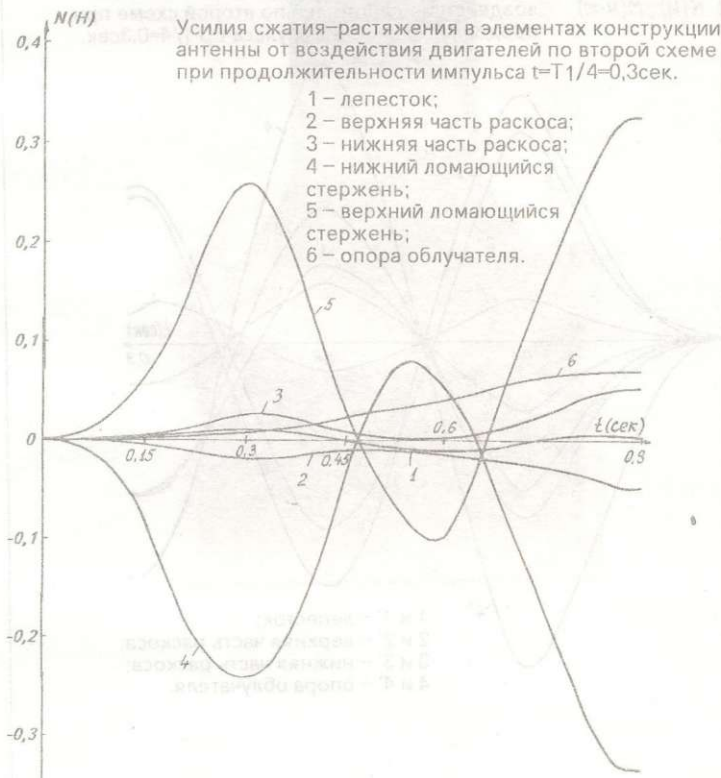


рис. 6.28

ет с силой 2,5 Н (суммарная величина равна  $2,5 \times 4 = 10\text{Н}$ ).

На рис.6.28 представлены графики изменения и распределения усилия сжатия-растяжения, возникших в элементах конструкции при длительности воздействия четырех двигателей  $t = T_1/4 = 0,3$  сек.

Усилия в лепестках являются знакопеременными. Максимальное значение наблюдается при  $t = 0,285$  сек и равно  $1,14 \times 10^{-2}$  Н. Нулевые значения имеют при  $t = 0,45$  сек и  $t = 0,75$  сек. В раскосах наибольшее усилие возникает при  $t = 0,87$  сек и равно  $5,24 \times 10^{-2}$  Н. В них усилия развиваются волнообразно, не изменяя своего знака. Аналогичная картина наблюдается и для усилий в опорах облучателя, максимальное

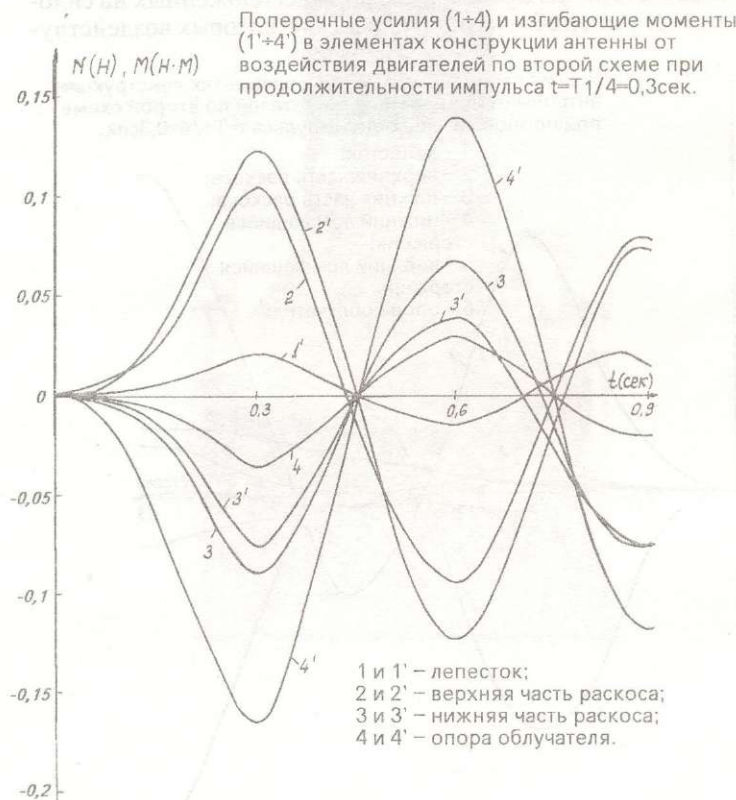


рис. 6.29

значение которых равно  $7,23 \times 10^{-2}$  Н при  $t = 0,84$  сек.

В верхних и нижних ломающихся стержнях усилия сжатия-растяжения меняют знак в расчетной временной области (рис.6.28). Так, при  $t = 0,47$  сек и  $t = 0,66$  сек они равны нулю. В верхних ломающихся стержнях сначала возникают сжимающие усилия с локальным максимумом 0,26 Н при  $t = 0,3$  сек, а потом  $t = 0,47$  сек перерастают в растягивающие и доходят до 0,1 Н. Затем, уменьшаясь при  $t = 0,66$  сек, растягивающие усилия меняют свой знак (переходят в сжимающие) и своего максимума 0,34 Н. достигают во время  $t = 0,885$  сек. В нижних ломающихся стержнях наблюдается аналогичная картина, только сначала в них появляются и нарастают растягивающие усилия, которые далее переходят в сжимающие и т.д.

На рис.6.29 представлены графики изменения поперечных сил и изгибающих моментов. Здесь мы видим колебание этих факторов при  $t = 0,45$  сек и  $t = 0,75$  сек.

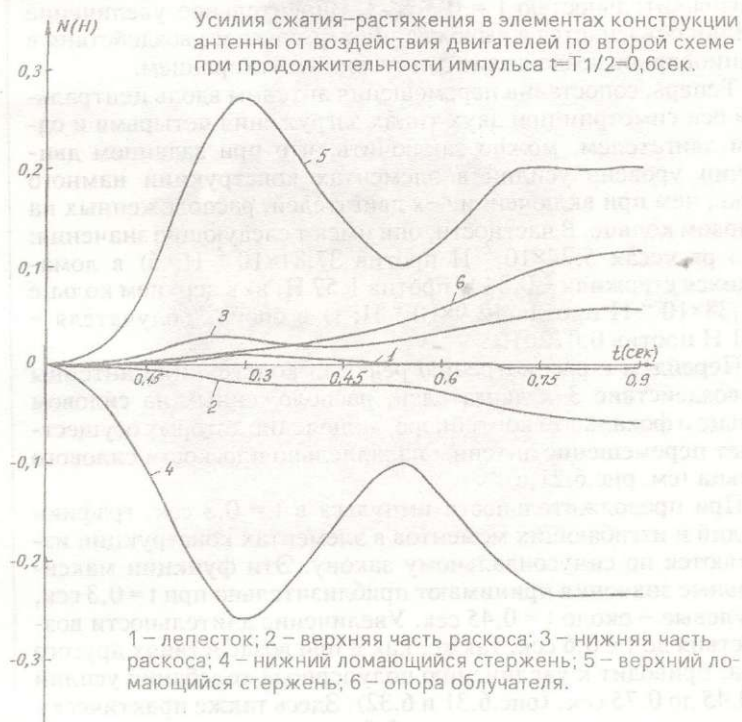


рис. 6.30

При увеличении длительности воздействия импульса четырех двигателей до 0,6 сек, графики функций усилий становятся более длиннопериодными (вытягиваются вдоль оси времени, т.е. происходит более плавное изменение их величин). При этом практически не меняются их максимальные значения (рис.6.30). Исключением являются только усилия в раскосах, максимумы которых в расчетно-временной области 0,9 сек. сместились к  $t = 0,3$  сек и равны 0,3 Н.

Увеличивая действие данной нагрузки до  $t = T_1 = 1,2$  сек, усилия в различных элементах возрастают от 30 до 50 %.

Дальнейшее увеличение длительности загрузки до  $t = 2,5 \times T_1 = 3,0$  сек вносит ощутимые изменения в усилиях.

Так, в опорах облучателя сжимающие усилия возросли от  $7,2 \times 10^{-2}$  Н до 1,99 Н, в ломающихся стержнях – от 0,34 Н до 4,52 Н, в верхнем кольце – от  $1,4 \times 10^{-2}$  Н до 0,38 Н (сопоставление произведено для усилий, вызванных импульсом продолжительностью  $t = 0,3$  сек). Значительное увеличение усилий объясняется в вырождении импульсного воздействия в стационарное воздействие с постоянным ускорением.

Теперь, сопоставив перемещения антенны вдоль центральной оси симметрии при двух типах загрузки четырьмя и одним двигателем, можно заключить, что при заданном движении уровень усилий в элементах конструкции намного ниже, чем при включении 4-х двигателей, расположенных на силовом кольце. В частности, они имеют следующие значения: а) в раскосах  $5,24 \times 10^{-2}$  Н против  $37,81 \times 10^{-2}$  Н; б) в ломающихся стержнях – 0,34 Н против 1,57 Н; в) в верхнем кольце –  $1,38 \times 10^{-2}$  Н против  $12,9 \times 10^{-2}$  Н; г) в опорах облучателя – 0,61 Н против 0,072 Н.

Перейдем к рассмотрению реакции конструкции антенны на воздействие 3-х двигателей, расположенных на силовом кольце и фокальном контейнере, включение которых осуществляет перемещение антенны параллельно плоскости силового кольца (см. рис.6.21,в).

При продолжительности импульса в  $t = 0,3$  сек, графики усилий и изгибающих моментов в элементах конструкции изменяются по синусоидальному закону. Эти функции максимальные значения принимают приблизительно при  $t = 0,3$  сек, а нулевые – около  $t = 0,45$  сек. Увеличение длительности воздействия до  $t = 0,6$  сек, также, как и при воздействиях другого типа, приводит к увеличению полупериода колебания усилий от 0,45 до 0,75 сек. (рис.6.31 и 6.32). Здесь также практически все усилия имеют максимум  $t = 0,3$  сек.

Максимально напряженными элементами являются лома-

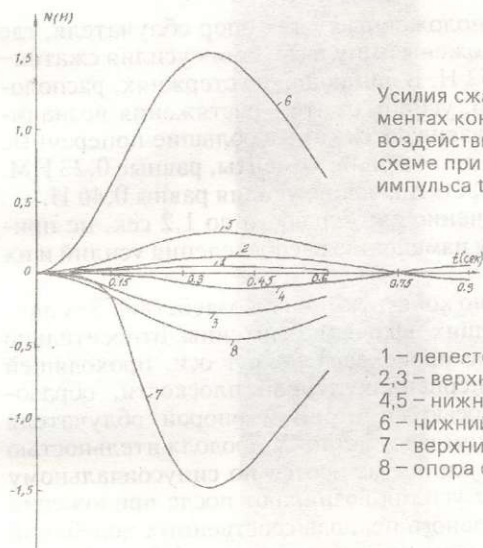


рис. 6.31

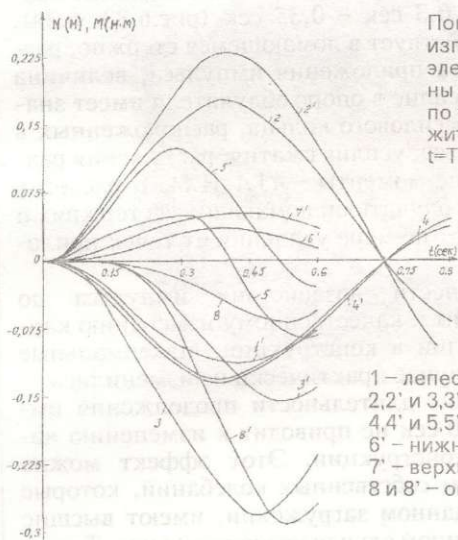


рис. 6.32

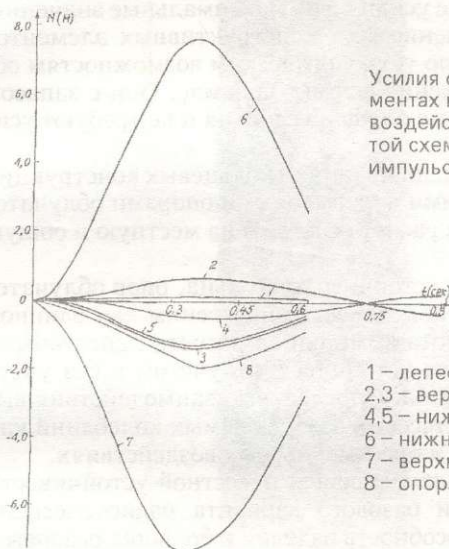
ющиеся стержни, расположенные у тех опор облучателя, где непосредственно приложены импульсы. В них усилия сжатия–растяжения равны 1,52 Н. В ломающихся стержнях, расположенных у других опор, усилия сжатия–растяжения незначительные, зато в них развиваются самые большие поперечные силы, равные 0,18 Н и изгибающие моменты, равные 0,23 Н·м. В опорах облучателя растягивающие усилия равны 0,46 Н.

Дальнейшее увеличение длительности до 1,2 сек. не приводит к значительному изменению распределения усилий и их величин.

Рассмотрим реакцию конструкции на воздействие 3-х двигателей, обеспечивающих вращение антенны относительно центра масс. Вращение происходит вокруг оси, проходящей через центр масс и перпендикулярной плоскости, образованной центральной осью симметрии и опорой облучателя (см. рис.6.21). При таком воздействии с продолжительностью импульса  $t = 0,3$  сек, усилия меняются по синусоидальному закону. Максимальные усилия возникают после приложения нагрузки около  $1/4$  основного периода собственных колебаний антенны (0,3 сек), а нулевые значения – при  $t = 0,3$  сек. Увеличивая продолжительность импульса до 0,6 сек., полупериоды колебания усилий возрастают до 0,75 с., а максимальные значения остаются при  $t = 0,3$  сек – 0,35 сек (рис.6.33, 6.34). Максимальное усилие действует в ломающемся стержне, расположенном вблизи места приложения импульса, величина которого равна 7,64 Н. Усилие в опоре облучателя имеет значение 18,9 Н. В раскосах силового кольца, расположенных в точке приложения импульса, усилия сжатия–растяжения равны 11,8 Н., а изгибающие моменты – 11,1 Н·м. В раскосах силового кольца, опорах облучателя, ломающихся стержнях и лепестках усилия убывают по мере удаления от точек приложения импульсов.

Увеличение длительности воздействия импульса до  $t = T_1 = 1,2$  сек не приводит к качественному изменению картины распределения усилий в конструкции. Максимальные значения усилий в этом случае практически не изменились.

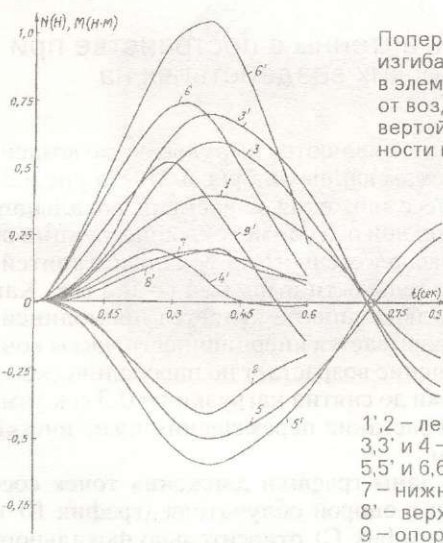
Дальнейшее увеличение длительности продолжения импульса до  $t = 2,5 \times T_1 = 3,0$  сек не приводит к изменению напряженного состояния конструкции. Этот эффект можно объяснить тем, что формы собственных колебаний, которые формируют усилие при данном нагружении, имеют высшие частоты и их влияние в данном случае незначительное. Таким образом, при данном нагружении, усилия практически не зависят от длительности приложения импульса.



Усилия сжатия-растяжения в элементах конструкции антенны от воздействия двигателей по четвертой схеме при продолжительности импульса  $t=T/2=0,6$ сек.

- 1 – лепесток;
- 2,3 – верхняя часть раскоса;
- 4,5 – нижняя часть раскоса;
- 6 – нижний ломающийся стержень;
- 7 – верхний ломающийся стержень;
- 8 – опора облучателя.

рис. 6.33



Поперечные усилия (2,3,5+7) и изгибающие моменты (1',3'+6',8',9') в элементах конструкции антенны от воздействия двигателей по четвертой схеме при продолжительности импульса  $t=T/2=0,6$ сек.

- 1',2' – лепесток;
- 3,3' и 4' – верхняя часть раскоса;
- 5,5' и 6,6' – нижняя часть раскоса;
- 7' – нижний ломающийся стержень;
- 8' – верхний ломающийся стержень;
- 9' – опора облучателя.

рис. 6.34

Оценивая возникшие усилия и их максимальные значения, надо отметить, что сечение всех конструктивных элементов подобраны в основном по технологическим возможностям облегчения веса и достижения формы на земле. Они с запасом удовлетворили требуемые площади сечения и не требуют усиления элементов.

При составлении модели механики кольцевых конструкций с лепестковыми, центрами и ферменными опорами облучателя, была решена задача расчета системы на местную и общую устойчивость.

Рассмотрены задачи устойчивости кольца, опор облучателя, плоской формы изгибы лепестка и антенны как единой системы. Также разработана методика расчета лепесткового центра на динамическую устойчивость с учетом и без учета работы сетеполотна экрана. Определены взаимодействия вынужденных и параметрических возбуждаемых колебаний как при вибрационных, так и при импульсных воздействиях.

Все расчеты по проблемам общей и местной устойчивости элементов конструкции базового варианта радиотелескопа подтвердили несущеспособность изделия и большие резервы в этом отношении от всех ожидаемых орбитальных нагрузок и воздействий.

### Перемещение точек антенны в пространстве при различных динамических воздействиях на конструкцию

Нагрузками на конструкцию являются импульсивные воздействия, задаваемые по схемам данных на рис.6.21. На рис.6.35 (график А) показан процесс движения во времени фокального контейнера вдоль центральной оси симметрии конструкции от воздействия двигателя, расположенного на фокальном контейнере (рис.6.21,а) при длительности импульса  $t = 0,3$  сек. Как видно из этого графика, движение не является прямолинейным. В начальной фазе сказывается инерционность массы конструкции, далее перемещение возрастает по параболическому закону с пологими ветвями до снятия нагрузки  $t = 0,3$  сек (импульса). Дальнейшее возрастание перемещения практически можно считать линейным.

На этом же чертеже даны графики движения точек соединения силового кольца с опорой облучателя (график В) и центрального барабана (график С) относительно фокального контейнера.

Можно отметить, что на стадии приложения импульса



Э. В. МЕДЗМАРЬЯНИЦЫ И П. АНФОРМАНУЭЛЬЕ. КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

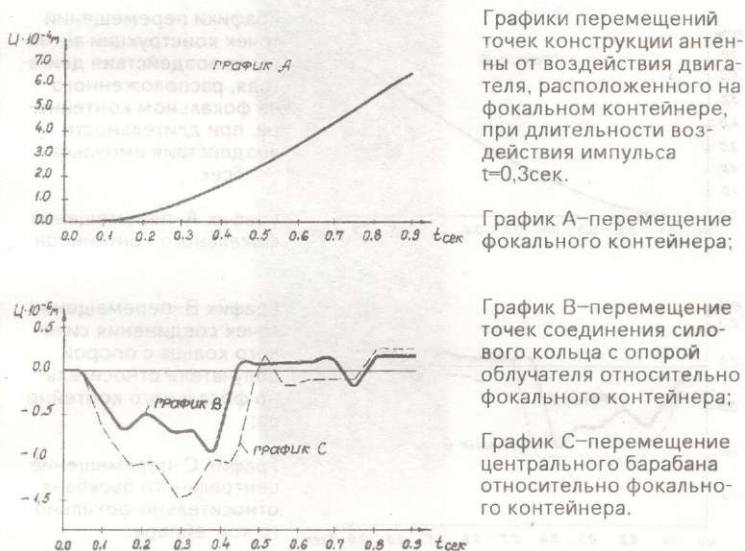
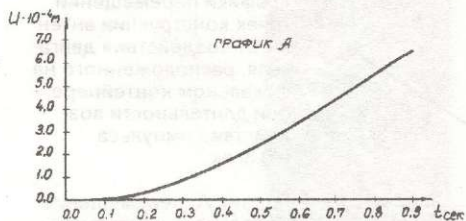


рис. 6.35

0,3 сек центральный барабан и точки силового контейнера отстают от фокального контейнера. Точки силового кольца отстают на меньшую величину, чем центральный барабан, так как они связаны с фокальным контейнером более жесткой связью (опорой облучателя). После снятия нагрузки, из-за собственных колебаний конструкции (в частности, лепестковой системы и опоры облучателя), скорость движения этих точек больше, чем скорость самого фокального контейнера. Таким образом, рассматриваемое движение является довольно сложным, содержащим поступательное перемещение, которое сопровождается процессом собственных колебаний конструкции.

На рис.6.36 представлены графики движений тех же точек конструкций, но с увеличением длительности воздействия импульса (воздействие снимается при  $t = 0,6$  сек). Первая часть перемещений во времени до 0,3 сек полностью соответствует графикам предыдущего рисунка. Перемещения силового кольца и центрального барабана уравниваются с перемещением фокального контейнера на  $t = 0,5$  сек, и в дальнейшем колебания практически сглаживаются.

Рассмотрим начальный процесс движения конструкции от воздействия четырех двигателей, расположенных на силовом кольце. Движение предполагается вдоль центральной оси сим-



Графики перемещений точек конструкции антенны от воздействия двигателя, расположенного на фокальном контейнере, при длительности воздействия импульса  $t=0,6$ сек.

График А—перемещение фокального контейнера;

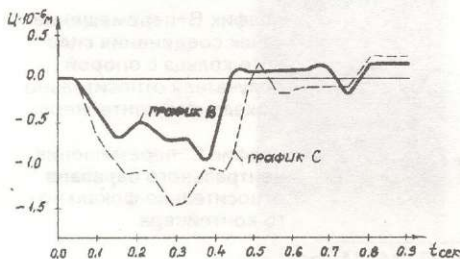
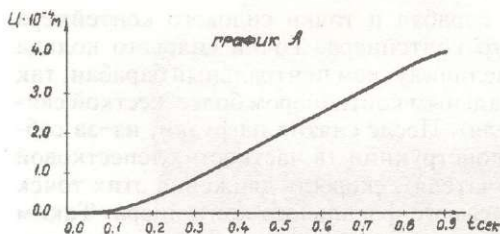


График В—перемещение точек соединения силового кольца с опорой облучателя относительно фокального контейнера;

График С—перемещение центрального барабана относительно фокального контейнера.

рис. 6.36



Графики перемещений точек конструкции антенны от воздействия четырех двигателей, расположенных на силовом кольце, при длительности воздействия импульса  $t=0,3$ сек.

График А—перемещение фокального контейнера;

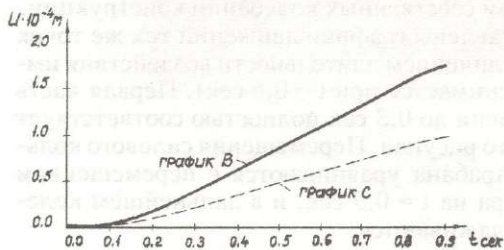


График В—перемещение точек силового кольца;

График С—перемещение центральной части зеркала.

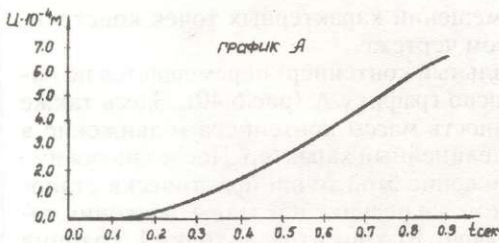
рис. 6.37

Э. В. МЕДВЕДЕВА И В. И. ПЕТРОВИЧ

метрии конструкции. Графики перемещений во времени выше отмеченных трех точек показаны на рис.6.37. Здесь время действия нагрузки  $t = 0,3$  сек. Фокальный контейнер, преодолев инерционность массы, практически движется равномерно (график А):

Относительные перемещения точек силового кольца (график В) и центральной части зеркала (график С) незначительны и происходят без каких-либо явно выраженных колебаний. Дальнейшее увеличение времени воздействий импульсов до  $t = 0,6$  сек и  $t = 1,2$  сек качественно не меняет картину перемещений во времени (рис.6.38 и 6.39). Сопоставляя движения, задаваемые по первой схеме (включен один двигатель, расположенный на фокальном контейнере) и по второй схеме (четыре двигателя, расположенных на силовом кольце), можно заключить, что движение по второй схеме более плавное, приближающееся к равномерному. При этом уровень усилий, возникающих в конструкции от такого воздействия, должен быть ниже.

Перейдем к рассмотрению движения точек конструкции от динамического воздействия, показанного на рис.6.21, в. при различных длительностях импульсивной нагрузки. Ниже при-



Графики перемещений точек конструкции антенны от воздействия четырех двигателей, расположенных на силовом кольце, при длительности воздействия импульса  $t = 0,6$  сек.

График А — перемещение фокального контейнера;

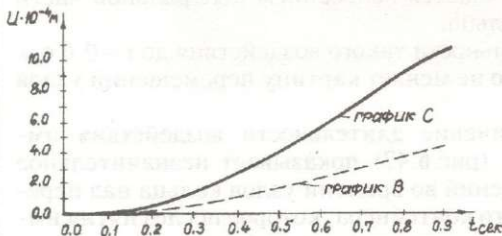
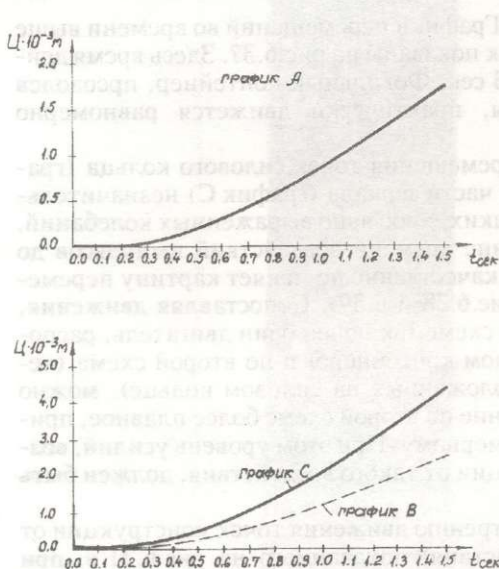


График В — перемещение точек силового кольца;

График С — перемещение центральной части зеркала.

рис. 6.38



Графики перемещений точек конструкции антенны от воздействия четырех двигателей, расположенных на силовом кольце, при длительности воздействия импульса  $t=1,2$  сек.

График А—перемещение фокального контейнера;

График В—перемещение точек силового кольца;

График С—перемещение центральной части зеркала.

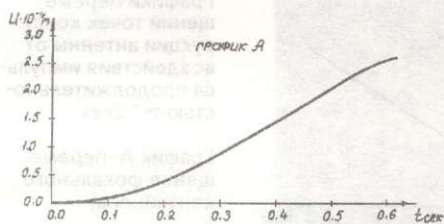
рис. 6.39

водятся графики перемещений характерных точек конструкции, показанных на этом чертеже.

Первая точка (фокальный контейнер) перемещается по направлению оси X согласно графику А (рис.6.40). Здесь также проявляется инерционность массы контейнера и движение в начальной базе носит нелинейный характер. После снятия импульса ( $t = 0,3$  сек) движение этой точки практически становится линейным. На этом же рисунке показаны движения точек 3 (график С) и 4 (график В) относительно точки 1. Разница в графиках В и С указывает на то, что такое перемещение конструкции сопровождается колебанием центральной части зеркала и силового кольца.

Увеличение длительности такого воздействия до  $t = 0,6$  сек (рис.6.41) качественно не меняет картину перемещений узлов системы.

Дальнейшее увеличение длительности воздействия импульса до  $t = 1,2$  сек (рис.6.42) показывает незначительное превышение перемещений во времени узлов кольца над перемещениями фокального контейнера, которое после снятия импульса в  $t = 1,3+1,5$  сек начинает спадать, т.е. проявляются колебания кольца в своей плоскости.



Графики перемещений точек конструкции антенны от воздействия импульса продолжительностью  $t=0,3$ сек.

График А—перемещение фокального контейнера;

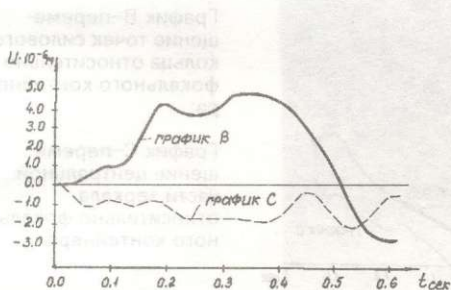
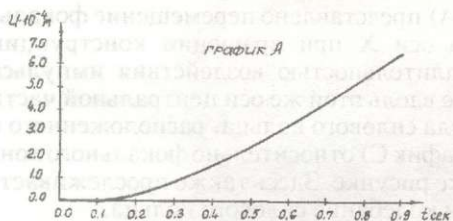


График В—перемещение точек силового кольца относительно фокального контейнера;

График С—перемещение центральной части зеркала относительно фокального контейнера.

рис. 6.40



Графики перемещений точек конструкции антенны от воздействия импульса продолжительностью  $t=0,6$ сек.

График А—перемещение фокального контейнера;

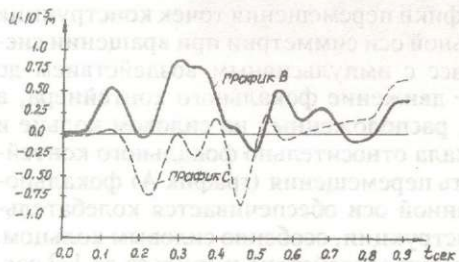
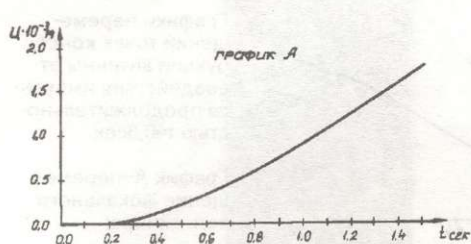


График В—перемещение точек силового кольца относительно фокального контейнера;

График С—перемещение центральной части зеркала относительно фокального контейнера.

рис. 6.41



Графики перемещений точек конструкции антенны от воздействия импульса продолжительностью  $t=1,2$ сек.

График А—перемещение фокального контейнера;

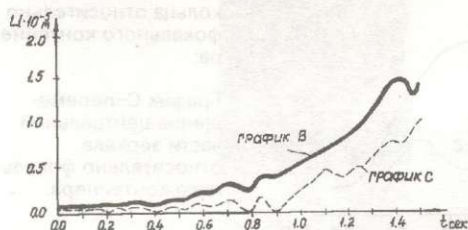


График В—перемещение точек силового кольца относительно фокального контейнера;

График С—перемещение центральной части зеркала относительно фокального контейнера.

рис. 6.42

На рис.6.43 (график А) представлено перемещение фокального контейнера вдоль оси X при вращении конструкции вокруг центра масс с длительностью воздействия импульса  $t = 0,6$  сек. Перемещение вдоль этой же оси центральной части зеркала (график В) и узла силового кольца, расположенного в плоскости вращения (график С) относительно фокального контейнера, даны на этом же рисунке. Здесь также прослеживается инерционность масс и колебание силового кольца.

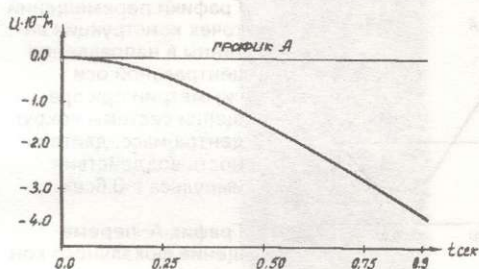
Увеличение длительности воздействия до 1,2 сек. не меняет характер движения (рис.6.44).

На рис.6.45 даны графики перемещения точек конструкции в направлении центральной оси симметрии при вращении системы вокруг центра масс с импульсивным воздействием до  $t = 0,6$  сек. График А — движение фокального контейнера, а графики В и С — точек, расположенных на силовом кольце и центральной части зеркала относительно фокального контейнера. Знакопеременность перемещения (график А) фокального контейнера вдоль данной оси обеспечивается колебательным процессом всей конструкции, особенно силовым кольцом.

При увеличении времени воздействия импульса до 1,2 сек. (рис.6.46) характер перемещений точек не меняется.

Кинематические и кинетические процессы космического

Э. В. МЕДВЕДЕВА И ДРУГИЕ



Графики перемещений точек конструкции антенны вдоль оси X при вращении системы вокруг центра масс; длительность воздействия импульса  $t=0,6$ сек.

График А — перемещение фокального контейнера;

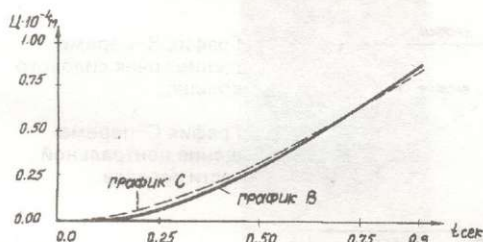
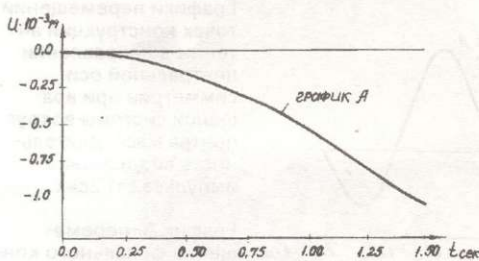


График В — перемещение точек силового кольца;

График С — перемещение центральной части зеркала.

рис. 6.43



Графики перемещений точек конструкции антенны вдоль оси X при вращении системы вокруг центра масс; длительность воздействия импульса  $t=1,2$ сек.

График А — перемещение фокального контейнера;

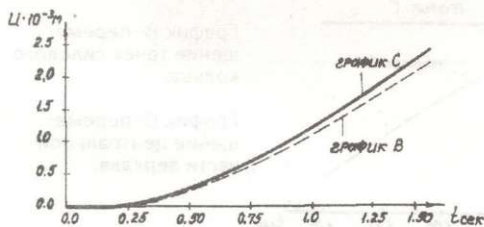
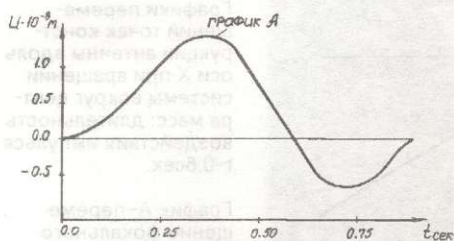


График В — перемещение точек силового кольца;

График С — перемещение центральной части зеркала.

рис. 6.44



Графики перемещений точек конструкции антенны в направлении центральной оси симметрии при вращении системы вокруг центра масс; длительность воздействия импульса  $t=0,6$ сек.

График А—перемещение фокального контейнера;

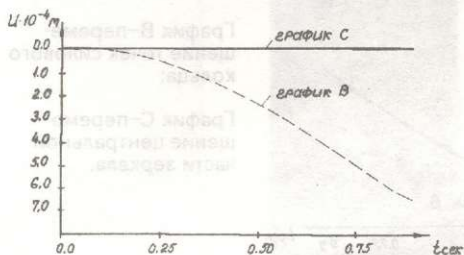
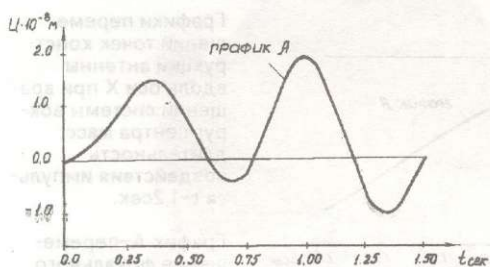


График В—перемещение точек силового кольца;

График С—перемещение центральной части зеркала.

рис. 6.45



Графики перемещений точек конструкции антенны в направлении центральной оси симметрии при вращении системы вокруг центра масс; длительность воздействия импульса  $t=1,2$ сек.

График А—перемещение фокального контейнера;

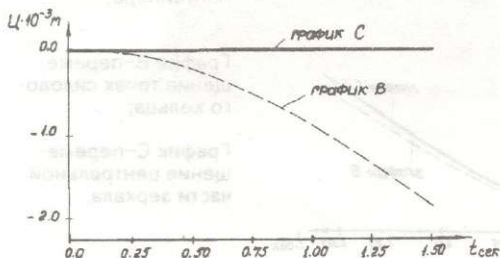


График В—перемещение точек силового кольца;

График С—перемещение центральной части зеркала.

рис. 6.46



трансформируемого радиотелескопа заслуживает большой интерес не только в стадии ее функционирования, управления и стабилизации, но и в процессе развертывания на орбите, где и происходит формообразование конструкции от сложного транспортного пакета до завершенной формы, т. е. фиксированной системы.

Значительная часть в исследованиях по механике радиотелескопа диаметром 30 метров была посвящена этим проблемам.

### Динамика трансформации космического кольцевого радиотелескопа

На основе конструктивной особенности антенны ее раскрытие осуществляется в два этапа: одновременное раскрытие четырех стоек облучателя, а затем – кольца вместе с центром.

На рис. 6.47 представлена принципиальная расчетная схема одной стойки облучателя вместе с двумя основными массами, расположенными на ее концах. Так как стоек четыре и они раскрываются одновременно, то на каждую из них приходится четверть массы кольца  $M_1$  и четверть массы облучателя  $M_2$ . В то же время, вся масса собственно конструкции считается приведенной ко всем шарнирам, в каждой из которых она одинакова и равна  $M$ . Стойка представляет собой пространственную механическую систему, образованную упругими звеньями (стержнями), соединенными между собой шарнирно. В пространстве эти стержни лежат на гранях воображаемой правильной треугольной призмы. Рис. 6.47 представляет собой схему расположения элементов конструкции, лежащих в одной плоскости (на одной грани). Таким образом, стойка является тремя одинаковыми плоскими механизмами, соединенными между собой в крайних точках цилиндрическими шарнирами (рис. 6.48) с некоторым эксцентриситетом. Шарниры, расположенные на ребрах, последовательно соединены с помощью ломающихся стержней, в которых расположены пружины (рис. 6.49).

Раскрытие стойки осуществляется при помощи основных пружин, расположенных в плоскости ее поперечного сечения



рис. 6.47

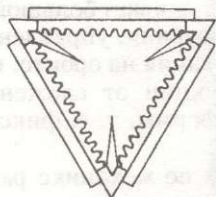


рис. 6.48

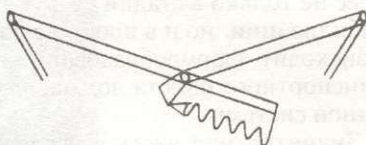


рис. 6.49

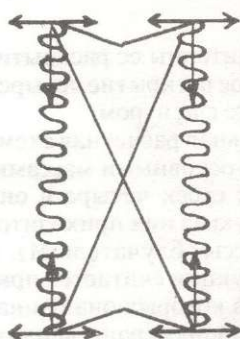


рис. 6.50

и соединяющей соответственные узлы, находящиеся на ребрах и дополнительных пружин, стоящих в ломающихся стержнях. Кроме того, в конструкции предусмотрено устройство пружины с тросом для создания начального импульса и торможения системы в конце раскрытия.

Момент, создаваемый пружиной в ломающихся стержнях, передается в виде усилия на шарниры, которые она связывает. Он действует вдоль линии, соединяющей эти шарниры и стремится их раздвинуть (рис.6.50).

В начале раскрытия на крайние большие массы  $M$  действует сила  $P$ , создаваемая сжатой пружиной начального импульса (рис.6.51,а).

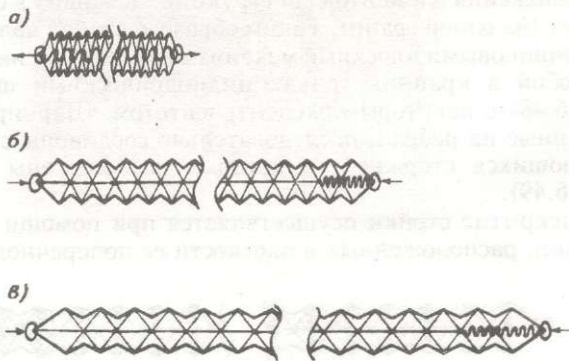


рис. 6.51

После окончания работы этой пружины при протягивании троса сквозь направляющие возникает сила трения (рис.6.51,б). При достижении определенной длины пружина начального импульса работает как демпфер, создающий тормозящую силу  $P$  (рис.6.51,в).

S3

§

На основе решения выведенной системы уравнений, получаем результаты, определяющие перемещение координатных точек ферменной конструкции опор облучателя в пространстве в зависимости от времени, упругих и действующих сил, аргументами которых являются геометрические, упругие и силовые параметры конструкции. Графики, описывающие эти процессы, приводятся на рисунках 6.52, 6.53 и 6.54.

I

На рис.6.55 представлена принципиальная расчетная схема кольца с центром и четырьмя уже раскрытыми стойками.

Is

Данная конструкция несет некоторое количество сосредоточенных масс.

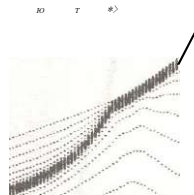
I

Вся масса кольца приводится ко всем шарнирам, в каждой из которых она одинакова и равна  $M_j$ . Четыре массы гироскопов и остальных приборов  $M_g$ , расположены слева у каждой стойки. На кольцо также симметрично расположены 8 двигателей с массой  $M_3$  (в другом варианте конструкции - двигате-

!

I

I



1

рис. 6.52,а

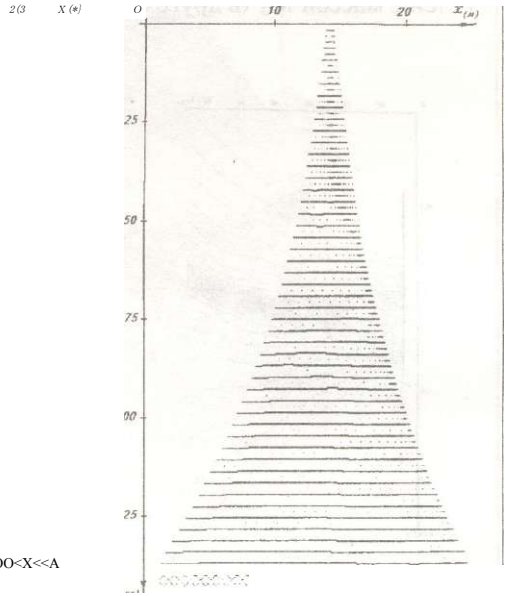
рис. 6.52,б

§  
I

рис. 6.52,в

рис. 6.52,г

I



I  
V  
I

§

XXXXXXXXXWOOOOCOOOOOOOOO<X<<A

рис. 6.53

рис. 6.54

SIU

Э. В. МЕДЗМАРИАШВИЛИ ✧ ПРЕАНФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

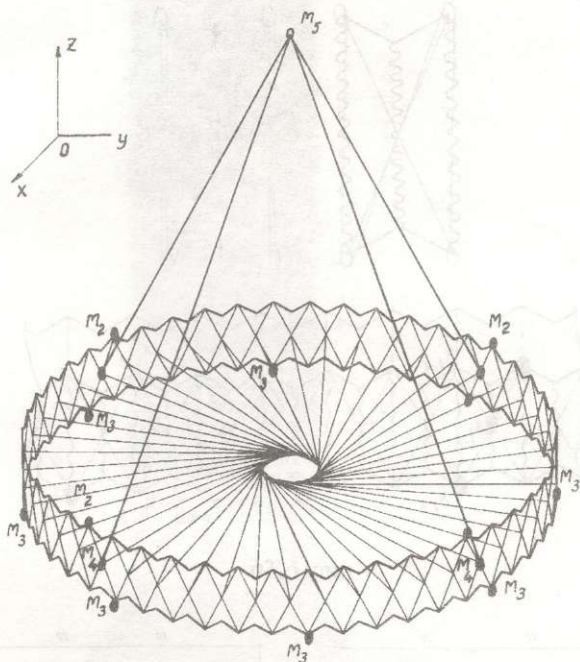


рис. 6.55

лей 48 и они расположены в каждой секции). В шарнирах крепления стоек к кольцу считается сосредоточенной приведенная масса стойки и солнечных батарей, суммарная величина которой равна  $M_4$ . В месте соединения стоек сосредотачиваем массу облучателя и приведенную массу всех четырех стоек и обозначим ее  $M_5$ .

Рассмотрим силовые факторы, действующие в процессе раскрытия кольца. На рис.6.56 показан фрагмент кольца. На нее действуют силы, возникающие от основных пружин  $P_i$  и пружин, стоящих в ломаных стержнях  $P'_i, P''_i$ , а также сила тяги двигателя  $P_{дв.}$ . Кроме того, на средние шарниры действует сила от центра и от сетки  $F_i^1$  и ее тангенциальная составляющая  $F_{\alpha_i}^1$ , а на крайние шарниры – сила от сетки  $F_i^1$ .

Кольцо представляет собой замкнутый рычажной механизм, образующий в пространстве воображаемую призму с 48 гранями (секциями). Ее раскрытие осуществляется при помощи 8 двигателей с канатной системой, основных пружин,

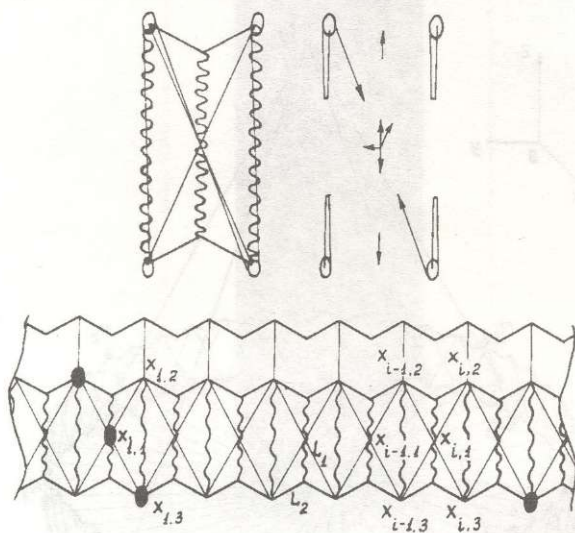


рис. 6.56

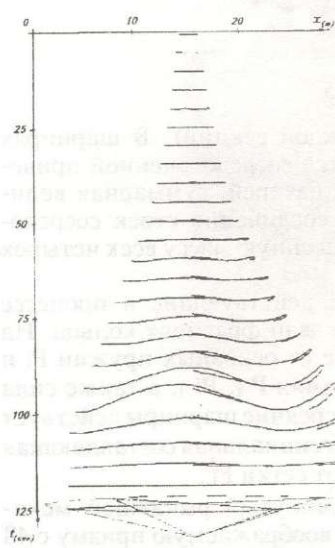


рис. 6.57

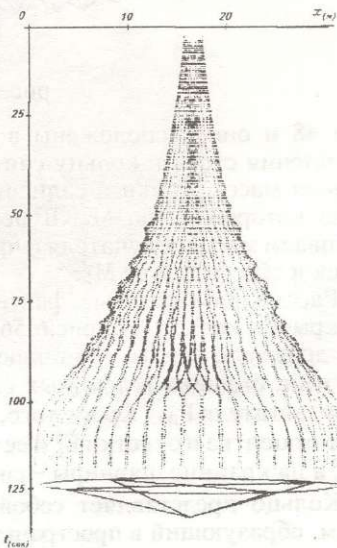


рис. 6.58

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ  $\diamond$  ПЕРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

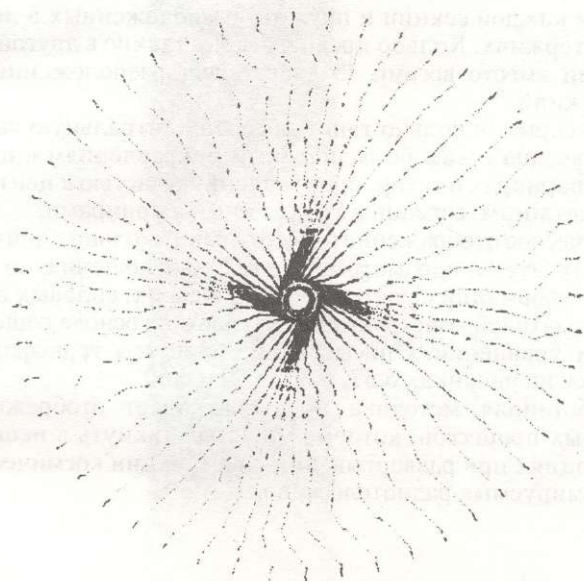


рис. 6.59

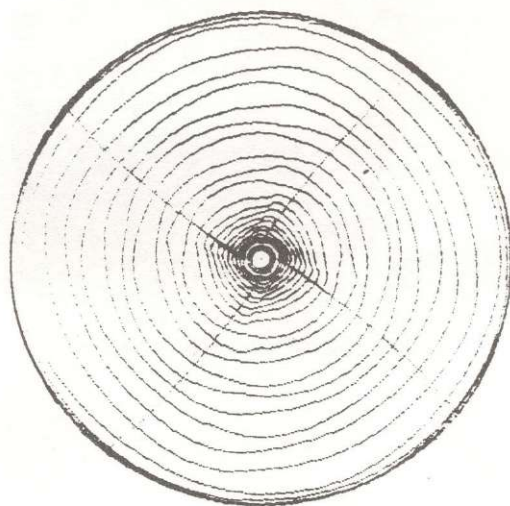


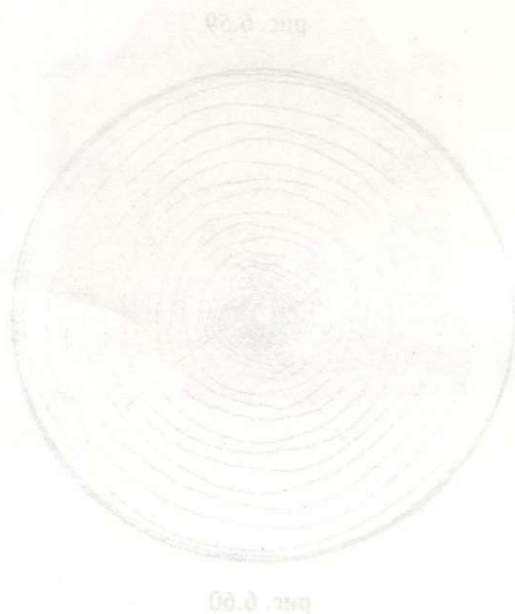
рис. 6.60

стоящих в каждой секции и пружин, расположенных в ломающихся стержнях. Кольцо предполагает наличие в другой модификации вместо восьми 48 двигателей, расположенных в каждой секции.

При раскрытии кольцо тянет за собой центральную часть, которая связана с ним по радиальным направлениям в центральных шарнирах и сетку, прикрепленную частью к центру и частью к штангам, связанным с крайними шарнирами.

Графическое отображение разворачивания кольца с центром и опор облучателя, параметры которых по отношению ко времени трансформации с учетом геометрических, силовых и упругих показателей конструкции, получены на основе решения составных уравнений. Описывающие процессы трансформации даются на рисунках 6.57, 6.58, 6.59 и 6.60.

Разработанная методика предусматривает отображения аномальных процессов, которые могут возникнуть в нештатных ситуациях при разворачивании конструкции космических трансформируемых радиотелескопов.



Э. В. МЕДВЕДЕВА И ШИШКИН ✧ ТЕРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



## 7 Наземный стендовый комплекс создания и испытания больших космических конструкций

Техническое и технологическое обеспечение наземной сборки, монтажа, испытания и приведения к летной готовности больших орбитальных радиотелескопов и других инженерных сооружений в условиях, имитирующих космические воздействия, является основой логики построения стендового комплекса [46], [120], [121].

Решение такой задачи объединяет аспекты проектирования, строительства и монтажа уникальных мобильных и беспилотных сооружений, сложных электромеханических и механических систем, функциональная взаимность которых осуществляется автоматическими системами управления.

Создание такого уникального наземного комплекса открывает новые широкие возможности в области создания больших конструкций космического базирования.

Еще в стадии завершения строительства комплекса стало возможным проведение на нем цикла наземных экспериментальных раскрытий кольцевой конструкции "Краб", [8], [55], которая была установлена на корабле "Прогресс-40" и развернута в открытом космосе. Начало развертывания конструкции на космическую орбиту показано на рис. 7.1.

В стендовом комплексе изготовлена и частично апробирована базовая система технологического оборудования (рис. 7.2), которая в последующем установлена в открытом космосе на станции "Мир" по программе "Софора" – 90.

Технологический прецизионный стенд, гидробассейн, стенд трансформации, мобильный стапель и поворотное устройство практически создает полный набор сервиса наземных имитаторов орбитальных условий, необходимых для создания и испытания больших инженерных сооружений и радиотехнических комплексов космического базирования.



рис. 7.1

Э. В. МЕДЗМАРЦЯНИ *◆* ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШКИН ✧ ПЕРАНФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

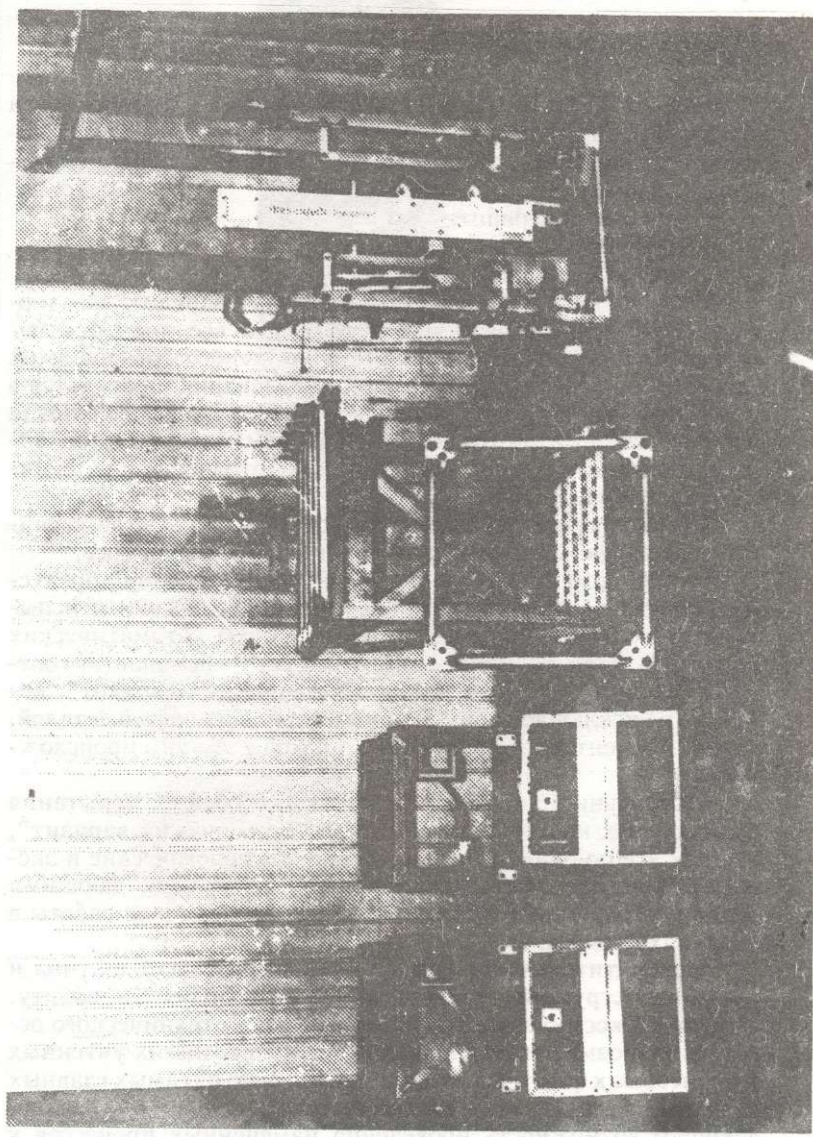


рис. 7.2

## 1

## Принципы построения комплексов

Создание и испытание космической техники, в особенности больших орбитальных сооружений, имеют разные варианты осуществления, которые можно классифицировать следующим образом:

- наземный вариант;
- смешанный вариант;
- космический вариант.

Сразу же надо отметить, что “наземный вариант” как термин включает в себя понятие того, что все процессы изготовления конструкции, вплоть до штатного образца и их всесторонние экспериментальные исследования, проводятся в земных условиях. После этого на орбиту доставляется готовая штатная система, которая с проведением манипуляций, апробированных на земле, приводится к готовности для функционирования.

При смешанном варианте этапы создания и испытания конструкций осуществляются как на земле, так и в космосе.

По предложенной логике “космический вариант” предусматривает проведение сборочных, технологических и испытательных работ в космосе с применением автоматических процессов, спец. техники, манипуляторов и космонавтов соответствующими инструментами. “Космический вариант”, конечно, не исключает применения материалов, частей деталей, узлов, элементов и укрупненных блоков “земного происхождения”.

Натуральным условием создания и, особенно, испытания орбитальных конструкций является “космический вариант”, так как все полученные технические, технологические и эксплуатационные параметры будут естественными, дающими реальную картину процессов создания системы и ее работы в условиях космоса.

Предпочтительность каждого варианта зависит от типа и схемы конструкции, средств доставки изделия на орбиту, структуры космического комплекса, уровня технического оснащения, возможностей космонавтов и еще многих учтенных и неучтенных факторов и ситуаций. Но одно из самых главных условий – это наличие наземного испытательного комплекса, дающего возможность проведения намеченных процессов в имитирующих условиях космоса и требующих меньше мате-

риальных, финансовых, технических, психологических и временных затрат.

Однако, создание такого комплекса и проведение работ для конкретной единичной задачи, в большинстве случаев, может во многих показателях оказаться дороже и сложнее “космического варианта”. Поэтому создание комплекса на принципах универсальности и многопрофильности является основой для технико-экономического обоснования “наземного варианта”, наряду с другими позициями создания и испытания больших конструкций космического базирования.

Такая постановка вопроса не исключает случаев индивидуального решения проблемы, когда, несмотря на финансовые и технические трудности, “наземный вариант” является единственным решением, так как другие варианты на определенном этапе развития космической техники не осуществимы.

Порой может наблюдаться и обратная вышесказанному ситуация, когда в “наземном варианте”, из-за технических и технологических особенностей конструкции и проблем имитации определенных ситуаций космоса, выполнение изделия необходимо в “космическом варианте”. Мотивами выбора этого варианта могут быть не только решение возникших научных и технических задач, но и вопросы финансирования и времени.

“Наземный вариант” имеет определенную ценность и в том отношении, что при выборе “космического варианта” предварительные экспериментальные исследования в “наземном варианте” практически во всех случаях будут обоснованы и полезны.

При таких постановках проблем, выбор принципов построения наземного стендового комплекса, создания и испытания крупных космических конструкций, с учетом технических сложностей и больших финансовых и материальных затрат, приобретает особый статус в сфере развития космических исследований и орбитальной техники.

Разработанный принцип построения комплекса опирается на универсальность его назначения. Это дает возможность при создании крупногабаритных прецизионных конструкций в имитируемых условиях космоса проводить контроль радиотехнических, оптических и других эксплуатационных параметров, а также испытания на всесторонние механические, тепловые и другие силовые воздействия.

Решение проблемы создания больших инженерных конструкций космического базирования как в конкретных, так и в общих случаях требует построения наземного стендового комплекса.

При этом необходимо решить следующие задачи:

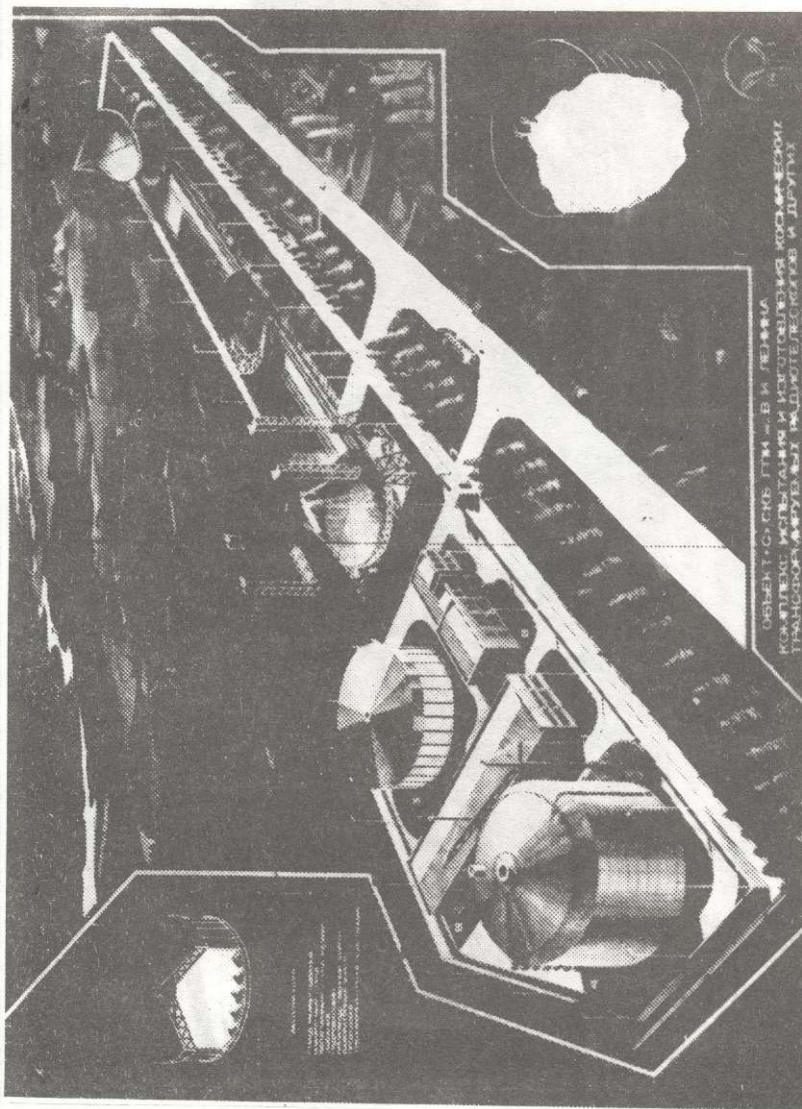
- наземная укрупненная сборка;
- освоение космических процессов сборочных и других технологических процессов, выполняемых в космосе космонавтами соответствующими техническими и технологическими средствами;
- обеспечение и исследование процесса формообразования больших сооружений в имитирующих условиях космоса;
- испытание на внутренние и внешние силовые факторы, возникающие в процессе монтажа и сборки, транспортировки, доставки на орбиту и развертывания, а также обслуживания и функционирования в открытом космосе;
- измерение эксплуатационных параметров и показателей, обеспечивающих функционирование в космосе.

Каждая задача требует выбора путей и способов ее решения, так как космическая техника весьма разнообразна, а специфика больших сооружений обуславливает соответствующий выбор метода и средств построения наземных стендов комплекса.

Методы и средства решения поставленных задач должны удовлетворять следующим условиям:

- создание экспериментальной среды больших объемов для возможностей размещения в ней конструкций космического базирования крупных размеров в пределах 30х30х30 метров;
- обеспечение имитируемых условий космоса теми методами, которые реализуемы и применимы для больших конструкций в вышеуказанных параметрах;
- создание технологической и технической среды для окончательной сборки и подготовки конструкции изделия к испытаниям и запуску с учетом повышенных геометрических и эксплуатационных требований к конструкциям космического базирования;
- создание среды для функционального исследования конструкции в условиях, максимально соответствующих эксплуатационной ситуации;
- аппаратное и приборное обеспечение процессов и исследований;
- обеспечение энергетическими и другими средствами для проведения процессов.

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ *◆* ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



ОБЪЕКТ С КИСЛОРОДНОЙ И ВОДНОЙ КОМПЛЕКСИМИ  
КОСМОСНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ КОМПЛЕКСИМИ  
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ДРУГИЕ

рис. 7.3

28

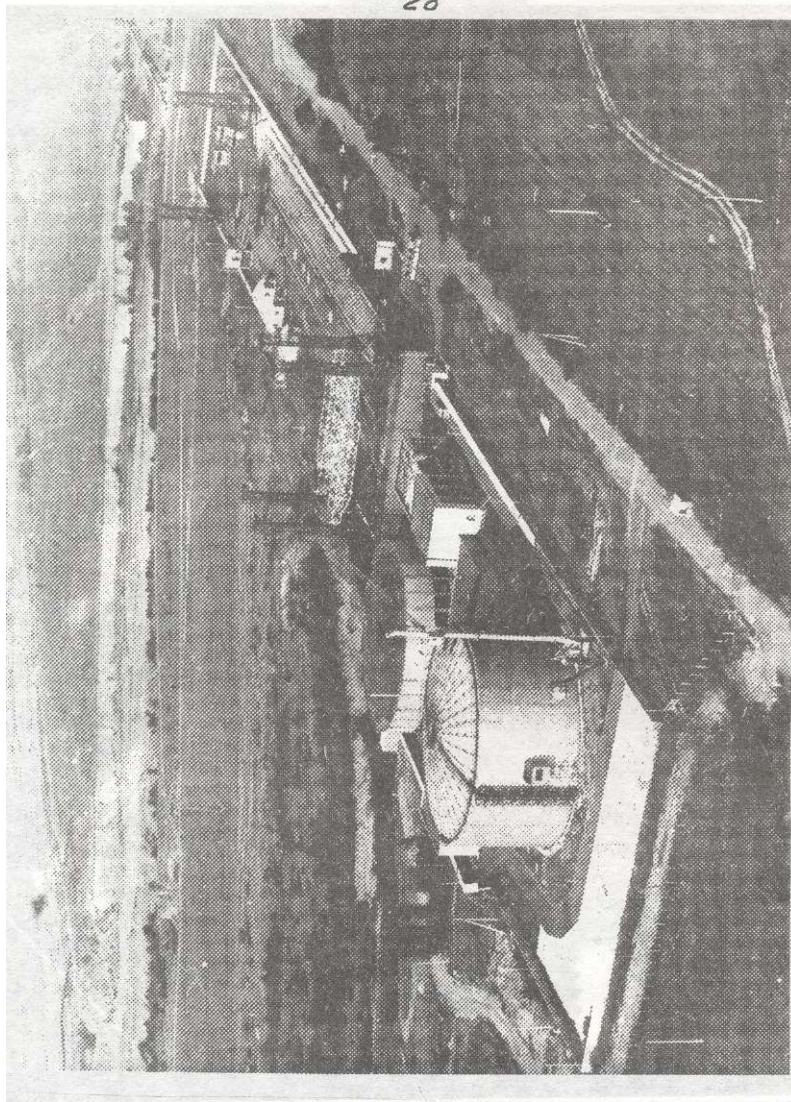


рис. 7.4

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУКИ ✧ ЛЭАНФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



Стеновый комплекс содержит в себе технологический прецизионный стенд, гидростенд, мобильный стапель, функциональный стенд и стенд трансформации, а также лабораторный корпус и ряд зданий и сооружений для административных и других хозяйственно-бытовых функций.

Стеновый комплекс имеет общее назначение – сборка и испытания крупногабаритных инженерных сооружений космического базирования размерами до 30 метров, и специализированное – испытания космических прецизионных систем в виде остронаправленных антенн, рефлекторов, концентраторов и отражателей разного назначения.

С учетом таких требований разработан проект (рис.7.3). Была подобрана территория, удовлетворяющая климато-метео, рельефным и коммуникационным требованиям комплекса.

Особое внимание заслуживает рельеф с точки зрения радиовидимости. Размещение объекта должно позволять проводить радиоизмерения изделия практически всеми методами “дальней зоны”, что является положительным показателем.

На основе проекта был построен уникальный в мировой практике стеновый комплекс наземных испытаний больших космических конструкций (рис.7.4), который по многим основным параметрам превосходит стенды и объекты аналогичного назначения других стран.

В стеновом комплексе образована цепь всех требуемых процессов. На примере рассмотрим стеновое обслуживание космического изделия в виде разворачиваемого радиотелескопа

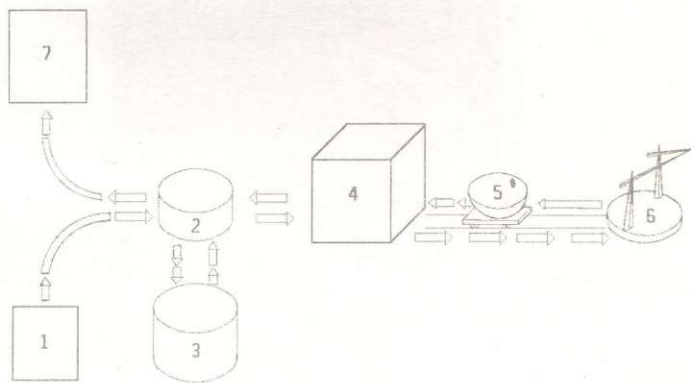


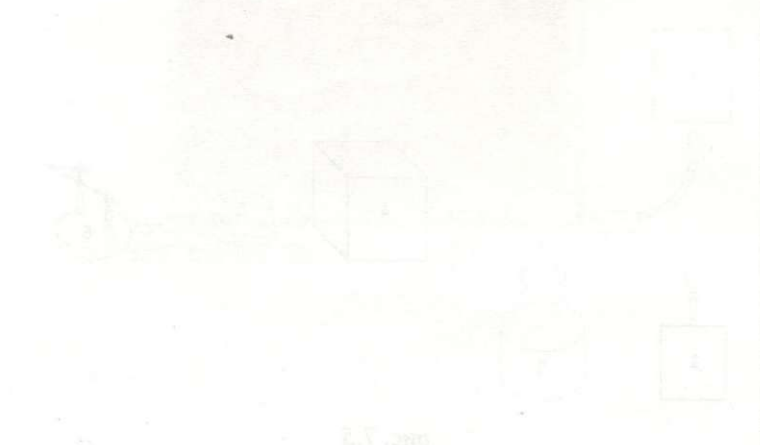
рис. 7.5

(рис. 7.5).

Комплектация (1) поступает в технологический прецизионный стенд (2), где производится сборка и монтаж изделия с частичным испытанием по апробации технических и технологических манипуляций, требуемых в космосе. Испытания продолжаются в гидростенде (3), после чего изделие возвращается на доработку в технологический прецизионный стенд. После доработки конструкция проходит полный цикл исследований в стенде трансформации (4). Далее, с помощью мобильного стапеля (5), изделие перемещается на функциональный стенд (6) для проверки эксплуатационных свойств. На обратном пути изделие доводится до летной готовности (7).

Процессы на отдельных стендах рассмотрены подробнее при описании каждого объекта.

...и ... ..



Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ *★* ПЕРАНФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

## 2 Технологический прецизионный стенд

**В** наземных условиях для сборки и наладки космических сооружений, особенно для остонаправленных антенн и других точных конструкций, обязательным является три основных условия:

- ограждение среды от внешних климато-метеорологических воздействий и создание автономных режимов температурных полей, механических и других воздействий;
- технические средства и аппаратурная база для обеспечения технологических процессов прецизионной сборки больших конструкций;
- чувствительные системы имитации космической невесомости для максимального уменьшения гравитационных факторов в процессе монтажа и наладки конструкции как в статике, так и в динамике.

По каждому пункту приняты инженерные решения с точки зрения проектирования и построения системы.

Стенд (рис. 7.6) представляет собой круглое помещение ди-

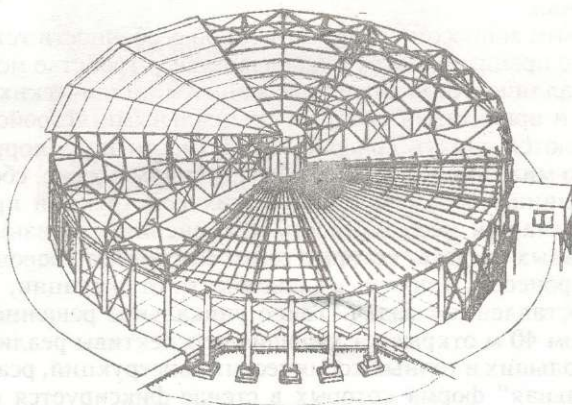


рис. 7.6

аметром 40 м. Перекрытие образовано из циклических балочных ферм, опирающихся на колонны высотой 12,5 м. Ограждение крыши и стен выполнено из профнастила и трехслойных плит. Помещение имеет два дверных проема размерами 4000х3500 мм в 4000х6000 мм. Дневное освещение осуществляется круговыми окнами, а искусственное освещение – распределенными прожекторами мощностью 100 КВт, которые обеспечивают равномерное освещение, достаточное для оптических измерений и использование фото-, кино- и видеотехники при 5-кратном ускорении съемки кинематических процессов.

Система обезвешивания образована из 96 циклически-лучеобразно расположенных монорельс, с соответствующими роликовыми контейнерами, противовесами, тросовыми связями, упругими балансами, фиксаторами, полиспастами и контрольными элементами. Техническое решение системы обезвешивания, которая подвешена к каркасу покрытия здания, характеризуется повышенной сложностью конструкции, которая, в целях создания чувствительной структуры обезвешивания, значительно сокращает потери энергии изделия при его развертывании. Для обслуживания верхней части конструкции обезвешивания здание имеет свободное пространство высотой более чем 2 м.

Без усиления максимальная масса испытуемого изделия – 2500 кг. Полезная высота стенда – 10,5 м. Помещение имеет смотровую площадку для размещения аппаратуры и пультов управления.

Узловым вопросом конструкционной особенности технологического прецизионного стенда является устройство монтажного металлического пола из массивных металлических плит, уровень и ориентация которых специальными устройствами регулируются снизу. Точность поверхности пола корректируется до миллиметра. Таким образом при монтаже, сборке и исследовании множества космических конструкций практически снимается необходимость применения капризных измерительных средств, которые резко осложняют сборочные и другие процессы, а порой, в зависимости от ситуации, не решают поставленных задач. Такое уникальное решение пола диаметром 40 м открывает хорошие перспективы реализации сборки больших и точных космических конструкций, реальная “орбитальная” форма которых в стенде фиксируется имеющейся системой обезвешивания.

Процесс строительства стенда осуществлен поэтапно. Сначала была введена круговая колоннада с временным тросовым

обезвешиванием, на которых до завершения комплекса под открытым небом проводились эксперименты.

В дальнейшем было устроено покрытие и специальный пол, после чего были завершены все работы и стенд принял окончательный вид.

## 3

## Гидростенд

**Г**идростенды, именуемые в космической технике "наземными гидробассейнами", являются узловым объектом при создании больших конструкций космического базирования.

Задачи, решение которых намечено перед гидростендом, делится на специальные и общие.

Специальные задачи касаются создания завершенной функциональной цепи комплекса, связанные в первую очередь с проблемами построения больших космических сооружений, предпочтительно в автоматическом режиме на основе процессов трансформации формы на орбитах.

Однако уникальность стенда, материальные и финансовые затраты дали бы ограничение эффекта при сокращении сфер интересов.

Поэтому построенный гидробассейн отвечает всем требованиям в этом направлении.

Гидростенд рассчитан как на целевые, так и на служебные космические операции, имитируемые в гидроневесомости.

Разнообразие функциональных возможностей гидростенда и соответствующий комплекс средств приводится на основе систематизации и предложений Московского авиационного института.

На гидростенде комплекса можно обеспечить процессы трансформации конструкций космического базирования и их складывание в транспортный пакет; элементную, узловую и крупноблочную сборку-разборку изделия; установку сооружений на космических аппаратах и их демонтаж; устройство энергетических, связанных, информационных и других коммуникационных сетей и их обслуживание; заполнение расходных компонентов и замену их емкостей; стыковку аппарата с изделием, их расстыковку и отвод изделия от орбиты аппарата и другие целевые операции в объеме среды до 20 000 м<sup>3</sup>.

Не менее актуальными являются возможности гидростенда для создания имитируемых условий космоса в интересах проведения и апробации служебных и аварийно-спасательных космических операций.

Практически на гидростенде можно имитировать все служебные и рабочие операции, выполняемые как в автоматическом режиме, так и космонавтами с помощью роботов и автоматов, а именно: передвижение космонавта, транспортировка и

ориентация аппарата, загрузка и разгрузка кораблей, установка аппаратуры, оборудования и др.

Можно также имитировать переход из одного аппарата или блока в другой через открытый космос или внутри станции, транспортировку спасаемого космонавта в скафандре или в портативной спасательной оболочке, являющимися аварийно-спасательными операциями.

Несмотря на множество классов и видов операций в открытом космосе, в гидростенде имитация проводится в основном по трем методологическим направлениям:

- проверка возможности осуществления и эффективности, а также поиск наилучших путей выполнения в безопорной среде заданных действий;
- определение точных параметров конструкции, аппарата, оборудования и процессов, выполняемых в автоматическом режиме совместно с космонавтами или с космонавтом индивидуально;
- тренировка космонавта.

Для удовлетворения такого сложного комплекса требований при создании гидростенда необходимо решение следующих проблем:

- создание несущей и ограждающей конструкций гидростенда;
- водо- и энергоснабжение гидростенда;
- система очистки воды;
- служебно-технический комплекс обеспечения проводимых работ;
- комплекс технологического оборудования и конструкции;
- система подводного освещения;
- система подводной фоторегистрации экспериментов;
- система подводной видеорегистрации процессов;
- система подводной кинорегистрации процессов;
- система погружения конструкции, оборудования и водолазов в гидросреде;
- система подогрева воды;
- система подводной связи;
- система телеметрии в гидросреде;
- система бесконтактного контроля изменения формы конструкции;
- система телевизионного отображения для моделирования процессов работы в космическом пространстве.

Построенный гидростенд имеет возможность проведения ряда классов экспериментов с учетом реализованных конструкций и оборудования стенда. Вместе с этим разработаны практически все системы для обеспечения работы гидростенда в универсальном режиме. Однако, здесь будут рассмотрены решения инженерных проблем построения гидростенда, который по своим основным геометрическим параметрам является самым крупным в мировой практике (рис. 7.7).

Металлическое дно гидростенда расположено на специальном основании в виде подушки для равномерного распределения напряжений в элементах стенда. Стена гидростенда имеет цилиндрическую форму диаметром 40 м, которая сверху покрывается металлическим куполом, подкрепленным ребрами. В центре купола устроено загрузочное отверстие диаметром 4 м. Для загрузочно-разгрузочных операций стенд укомплектован подъемным краном грузоподъемностью 10 т. Высота стенда – 21 м. Возможность максимального наполнения достигает 18 м.

Эксплуатационная емкость составляет  $20\,000\text{ м}^3$ , чему соответствует уровень воды до 15,92 м. Осветительная техника стационарно расположена на оболочке покрытия. На его контуре устроена механическая система обезвешивания, применение которой возможно как для гидросреды, так и других целей. Гидростенд оснащен лестницами обслуживания, оградами и помещением со смотровым люком. На стенде устроены три типа люков высокого давления. Габариты обслуживающего

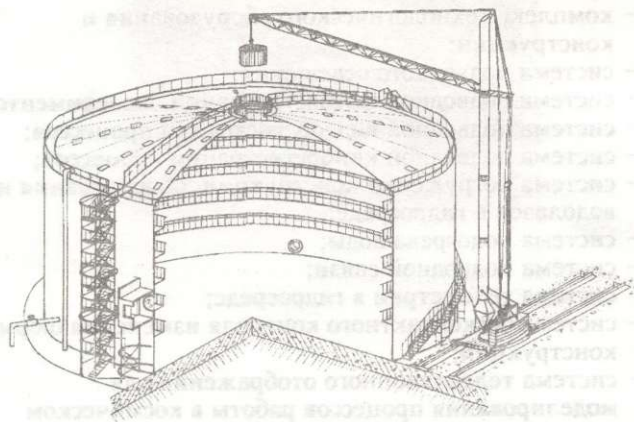


рис. 7.7



Э. В. МЕДВЕДЬКОВИЧ ✧ ПЕРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

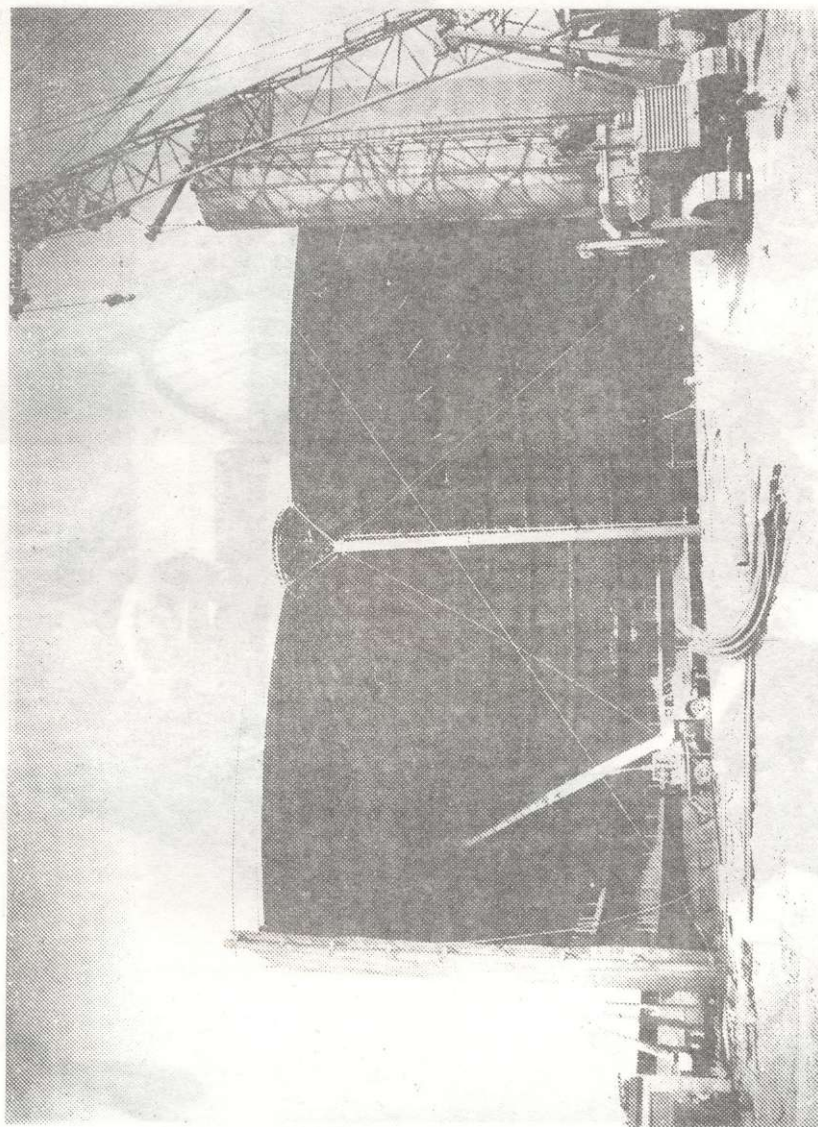


рис. 7.8



рис. 7.9

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУМ И ПЕРЕНСКОМУ ИДРУЧ. МЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

люка, имеющего контур эллипса – 900х600 мм. Диаметр кругового люка дополнительного обслуживания – 450 мм, а диаметр остекленных смотровых иллюминаторов в количестве 7 штук – 400 мм.

На внутреннюю поверхность стенда нанесено специальное антикоррозийное покрытие.

Внутри стенда устроено пять технологических ярусов.

Водопроводная система стенда состоит из насосной станции с всасывающим напорным трубопроводом и сливным трубопроводом.

Построение стенда осуществлялось на основе укрупненной сборки из больших монтажных частей (рис.7.8).

Наружный вид гидростенда показан на рис.7.9.

Внешний вид гидростенда показан на рис. 7.9. Стенд имеет сложную конструкцию с множеством ярусов и люков. Он предназначен для проведения экспериментов в космосе и на Земле. Стенд имеет диаметр 900 мм и высоту 600 мм. Он имеет пять технологических ярусов. Водопроводная система стенда состоит из насосной станции с всасывающим напорным трубопроводом и сливным трубопроводом. Построение стенда осуществлялось на основе укрупненной сборки из больших монтажных частей (рис. 7.8). Наружный вид гидростенда показан на рис. 7.9.

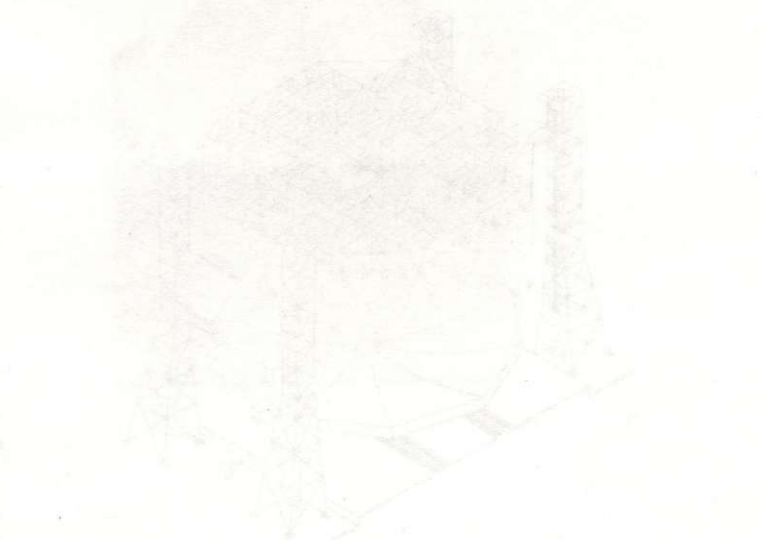


Рис. 7.10

## 4 Стенд трансформации

Центральным стендом комплекса является стенд трансформации. Он практически отвечает всем требованиям экспериментальной наземной системы испытаний больших статических и разворачиваемых космических конструкций в условиях имитации невесомости и других орбитальных воздействий.

Однако этим не ограничиваются функциональные возможности стенда. Он также может обеспечить технологические процессы сборки больших конструкций и, что особенно важно, синтезированное взаимоотношение с технологическим стендом. В такой комбинации оба стенда превращаются в единую универсальную систему для создания и всестороннего испытания крупногабаритных конструкций остронаправленных антенн, отражателей и концентраторов космического базирования.

При принятии решения выбора схемы конструкции, одним из требований является реальность испытания в земных условиях космических конструкций самых разных схем. Если

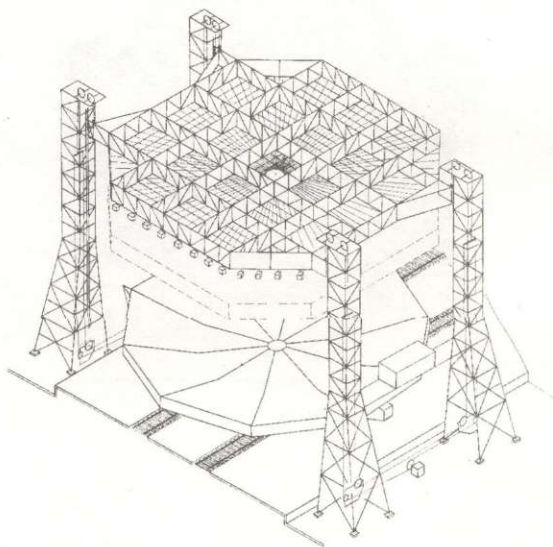


рис. 7.10

таких возможностей нет, тогда без наземной апробации возрастает риск появления непредвиденных факторов на орбитах, что и является причиной отказа от предложенного решения.

Но вместе с этим схемы конструкции и особенно процессы трансформации разворачиваемых конструкций для эффективных решений, часто являются весьма сложными. Поэтому стенд трансформации по своему строению и оснащению технически и технологически должен соответствовать и удовлетворять требованиям в широком диапазоне.

В этом аспекте одним из основных блоков является система обезвешивания. Она состоит из каркаса (рис.7.10) в виде параллельно-поясных перекрестных ферм, в совокупности образующих диск с размерами 36х36 м, который в четырех узлах опирается на башни высотой 32,6 м каждый. Башни представляют собой пространственную четырехугольную ферму ступенчато-переменного сечения. Размеры сечения в верхней части составляют 2х2 м, а внизу достигают 5х5 м.

Размеры и тип космического изделия, схема трансформации и условия их испытания, требуют разной высоты обезвешивания и уровня расположения изделия. При испытаниях часто становится обязательным подъем или опускание обезвешенного изделия. И что главное, проведение работ самого обезвешивания является сложным технологическим процессом и его выполнение и обслуживание на больших высотах в труднодоступных ситуациях резко усложняет решение задачи.

Поэтому ферменный диск (рис.7.11) системы обезвешивания с помощью полиспадов и противовесов, контрольно-измерительных приборов, электромеханической установки и фиксаторов, вертикально перемещается по направляющим элементам башенных опор.

Сама система обезвешивания реализована по принципам построения аналогичной системы в прецизионном стенде. Отличие заключается в электромеханических устройствах, обеспечивающих свертывание системы обезвешивания в автоматическом режиме.

Стенд трансформации расположен внутри металлического здания. Здание покрыто параллельными балочными фермами и профнастилом. Профнастильная обшивка закреплена на фахверке стен, устроенных между колоннами. Конструктивная структура зданий стенда трансформации наглядно представлена на рис.7.12, где показан монтаж сооружений.

Здание имеет подъемные двери по всей ширине стенда высотой 10 метров. С помощью электролебедок двери поднимаются при вводе и выводе антистапеля, который перемещается

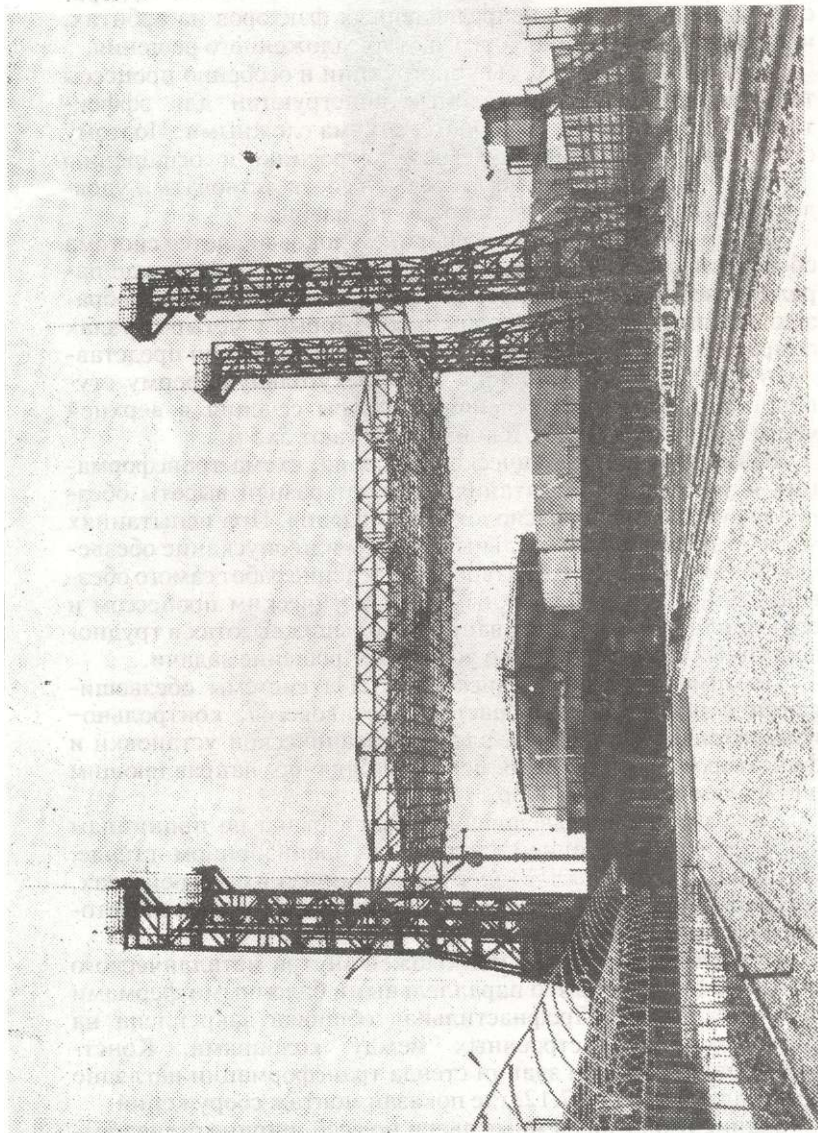


рис. 7.11

Э. В. МЕДВЕДИВЫМ И ПЛАН ФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДЗМАРЬЯНИЦЫМ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

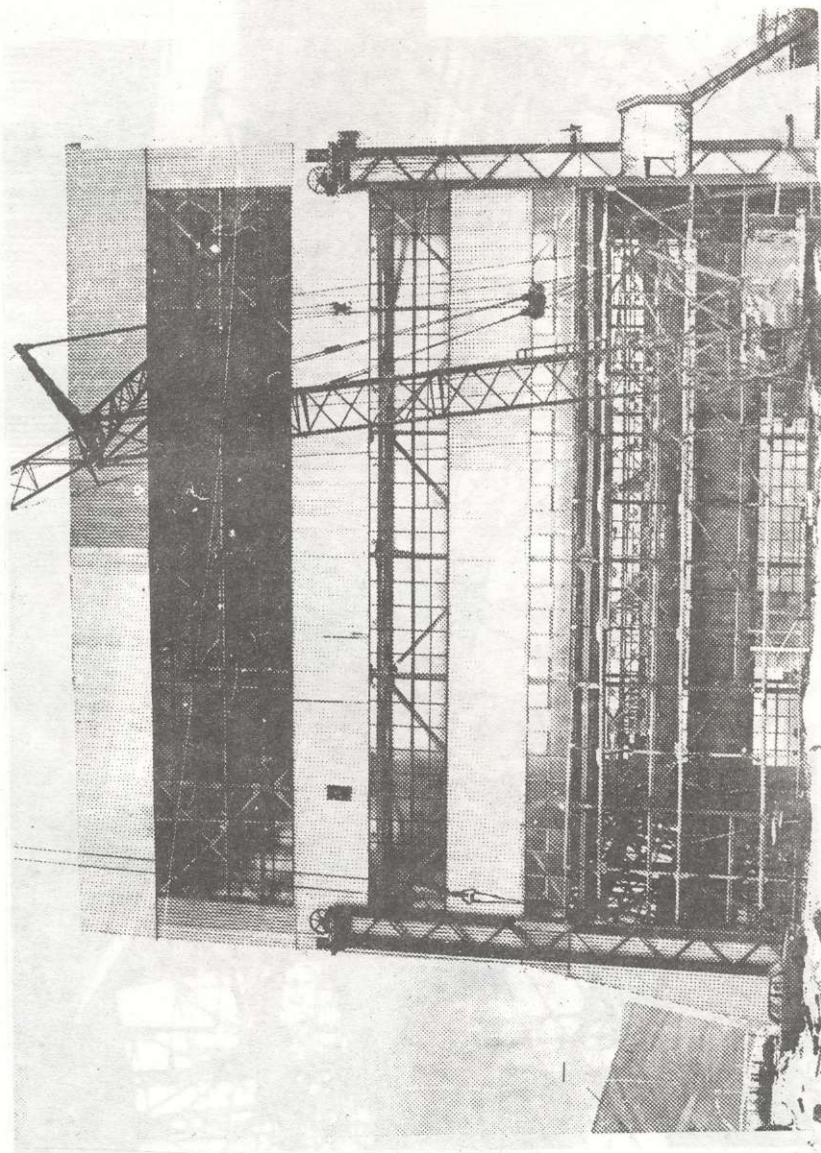


рис. 7.12

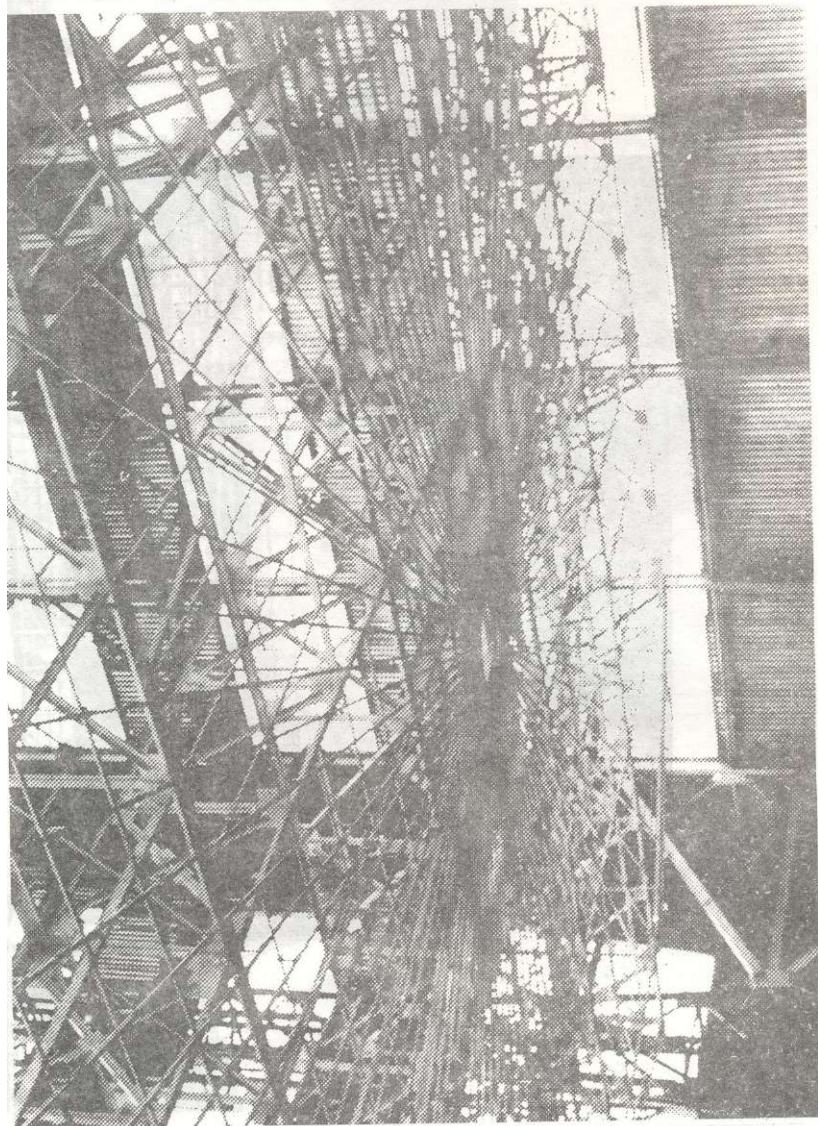


рис. 7.13

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУКОВИЧ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



по рельсам тяговой электромеханической системой с помощью троса. Внутреннее пространство (рис.7.13) освещается дневным светом и прожекторами.

Для исследования динамических, статистических, кинематических и геометрических параметров изделия в стадии развертывания и функционирования в имитированных условиях космоса, стенд укомплектован единой системой контроля и измерительной аппаратурой.



Рис. 7.13

## 5 Технологический стенд

Технологический стенд открывает широкие перспективы разработки и создания надежных и эффективных космических радиотехнических и энергетических сооружений, так как он решает проблему наземной апробации эксплуатационных качеств изделия в соответствии с их состоянием в условиях невесомости. Как известно, практические задачи космической техники больше всего будут требовать осуществления запусков по выводу, построению и функционированию на орбитах больших радиотелескопов с точными поверхностями. Поэтому нетрудно представить научное и практическое значение создания такого стенда, дающего возможность проведения комплекса радиотехнических исследований над изделиями космического базирования габаритами до 30 м.

Стенд представляет собой единую систему функционально взаимосвязанных конструктивных блоков мобильного стапеля, поворотного устройства, опорных башен и опор облучателя. В систему входят также рельсовые пути, электронный и электромеханический блок, осветительная техника и усиленные площадки расположения поворотного устройства со специальными фундаментами, основанием и дренажной сетью.

Для проверки радиотехнических параметров космического радиотелескопа основным требованием является фиксация геометрии зеркала в условиях имитации невесомости и без изменения его формы, проведение измерений независимо от метода проверки антенн.

Обеспечение такой фиксации осуществляется с помощью

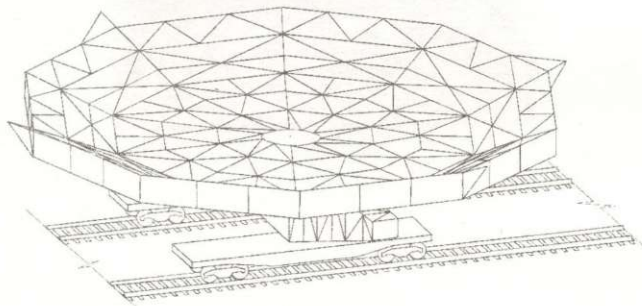


рис. 7.14

Э. В. МЕДВЕДЬКИВИЦЫМ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

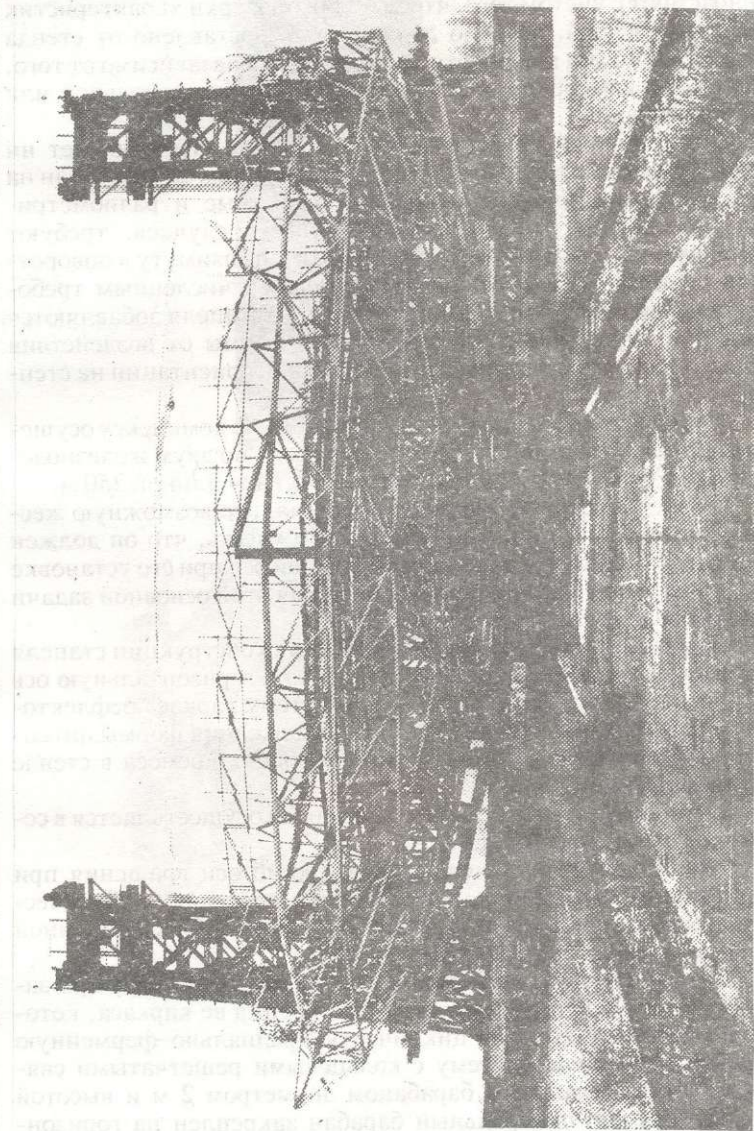


рис. 7.15

мобильного стапеля (рис.7.14) Требования к самому стапелю нарастают с учетом того, что, в целях проверки характеристик радиотелескопа, зеркало должно быть доставлено от стенда трансформации к поворотному устройству независимо от того, будут ли измерения антенны осуществляться в дальней или ближней зоне.

Построенный комплекс практически не ограничивает ни одного метода проверки антенн. Но в основном он рассчитан на радиоастрономические, облетные, наземные и радиометрические методы, которые в большинстве случаев, требуют ориентации изделия по углу местности и по азимуту в поворотном режиме. В связи с этим, к вышеперечисленным требованиям по конструированию мобильного стапеля добавляются жесткие ограничения по сохранению формы от воздействия гравитационных и ветровых нагрузок при ориентации на стенде.

Горизонтальное перемещение стапеля по комплексу осуществляется на двух спаренных платформах по двум железнодорожным путям нормальной колеи (рис.7.15) длиной 250 м.

Стапель должен обеспечить максимально возможную жесткость системы, при этом необходимо учесть, что он должен вращаться относительно горизонтальной оси при его установке на поворотном устройстве. Для решения этой основной задачи потребовалось найти новое решение.

В связи с этим было решено в системе конструкции стапеля четко выделить два основных элемента – горизонтальную ось его вращения и пространственную систему каркаса рефлектора, необходимую для фиксации и поддержания формы антенны, образованной в имитируемых условиях космоса в стенде трансформации.

Связь между указанными элементами осуществляется в середине оси вращения стапеля.

При такой взаимосвязи любой прогиб оси вращения при ориентации антистапеля и внешних воздействиях практически никакого влияния не оказывает на изменение собственной формы каркаса рефлектора стапеля.

Таким образом, деформации поверхности рефлектора зависит от внутренней структуры построения ее каркаса, который представляет собой циклическую радиально-ферменную пространственную систему с кольцевыми решетчатыми связями и с центральным барабаном диаметром 2 м и высотой 2,5 м. Именно центральный барабан закреплен на горизонтальной оси вращения, представляющей собой балочную ферменную пространственную систему, опирающуюся на две же-

лезнодорожные платформы. Ось по концам оснащена узлами ее подъема и крепления на башнях поворотного устройства. Для уменьшения крутящих моментов, центр масс максимально приближается к горизонтальной оси. С помощью электро-механической лебедки и тягового троса мобильный стапель, весом до 90 тонн и с закрепленной на нем космической антенной диаметром до 30 м, из стенда трансформации перемещается по рельсам к поворотному устройству.

Поворотное устройство является синтезом сооружений и механизмов. На специально подготовленном основании фундамента и при наличии дренажных сетей, на бетонную площадку уложена ширококолейная замкнутая круговая железная дорога диаметром 40 метров. На рельсы поставлены три

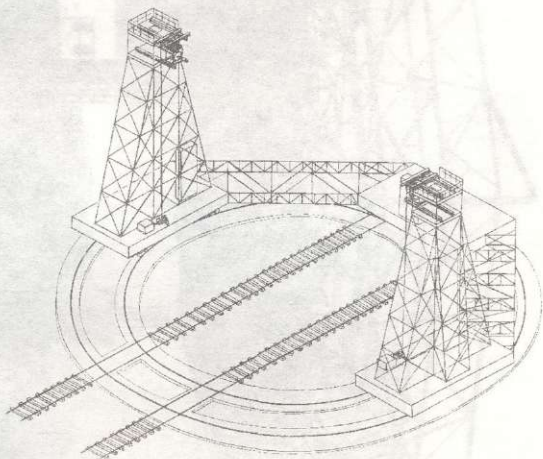


рис. 7.16

платформы с металлическим каркасом и бетонным балластом, размерами в плане 7x12 метров (рис.7.16).

Платформы взаимосвязаны жестко между собой металлическими ферменными связями, образующими единую полукруговую дисковую платформу. На диаметрально расположенных платформах возведены металлические башни. Каждая платформа опирается на 12 тележек, из которых 6 тележек, расположенные на внутренних рельсах – ведущие, а 6 – на наружных – ведомые. Прецизионная укладка рельсов, осно-

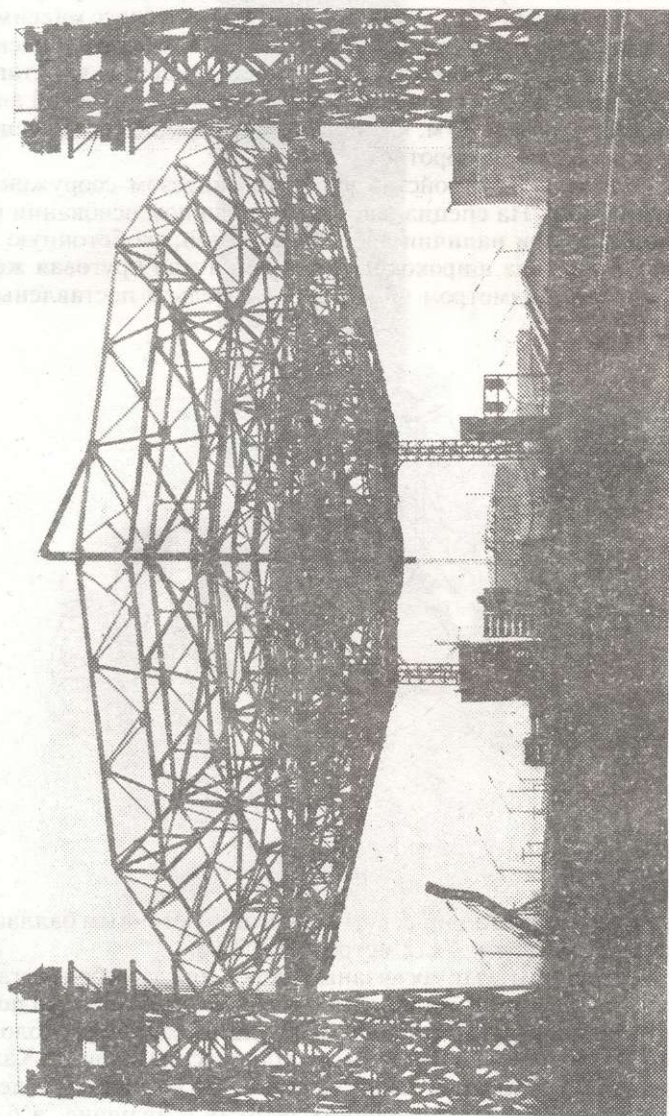


рис. 7.17

Э. В. МЕДЗМЯРИШВИЛИ ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДЗ. МАРШАЛЫЦЫ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

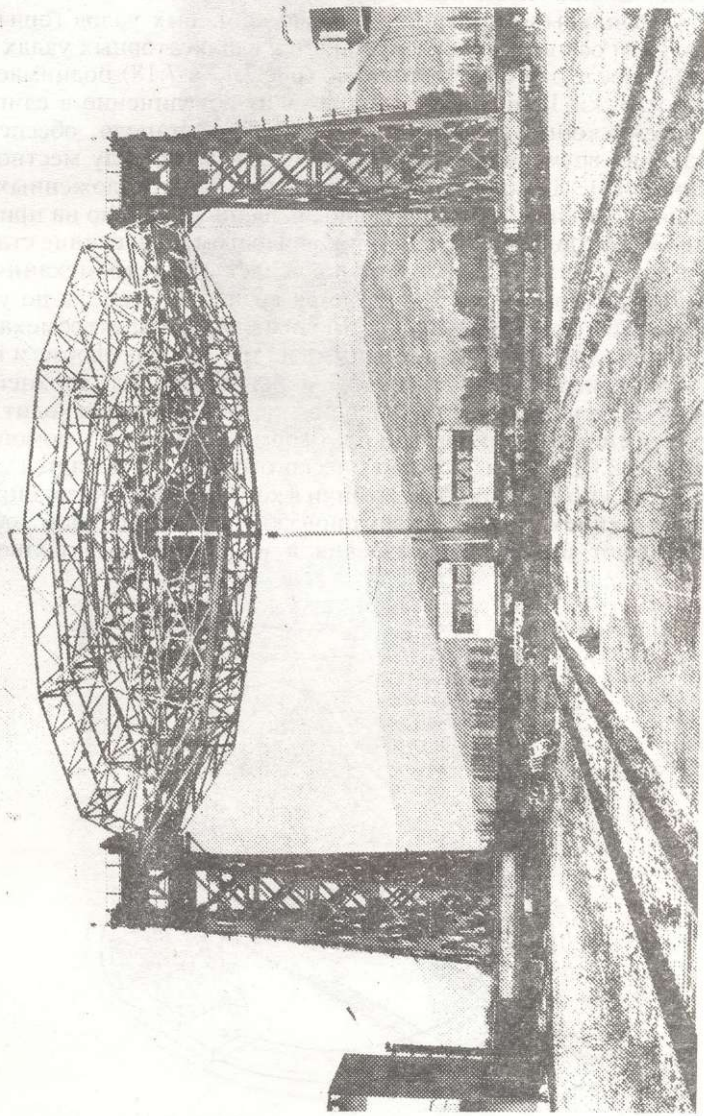


рис. 7.18

вание и фундамент обеспечивают большую точность их расположения по отношению к проектной плоскости.

Мобильный стапель с помощью концевых узлов горизонтальной оси вращения закрепляется в фиксаторных узлах башен. После этого он постепенно (рис. 7.17 и 7.18) поднимается до отметки 18 м, а затем происходит объединение в единую систему концевых осей и оси вращения стапеля, обеспечивающих возможность ориентации зеркала по углу местности (рис. 7.19). Для соосности конечных осей, расположенных на разных башнях, конструктивное решение основано на применении сферических подшипников. Подъем и опускание стапеля осуществляется системой полиспаст и электромеханическим оборудованием. Что касается вращения стапеля по углу местности, то такие процессы управляются электромеханическими лебедками, устроенными на третьей платформе и тросово-полиспастной системой закрепленной на верхней и нижней точках стапеля. Вращение по азимуту происходит перемещением полукруговой платформы с башнями с помощью тележек. Система технологического стенда оснащается датчиками управления. Эти датчики в комплексе с конструкцией, сооружением и электромеханическим оборудованием, обеспечивают ориентацию изделия в пространстве в полнопо-

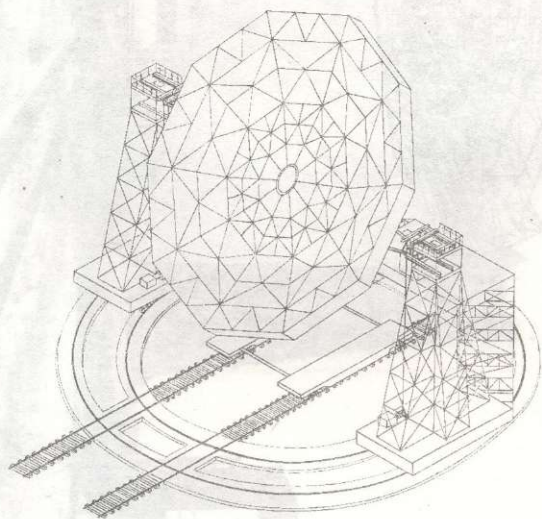


рис. 7.19



Э. В. МЕДЗМАРЦАШВИЛИ ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

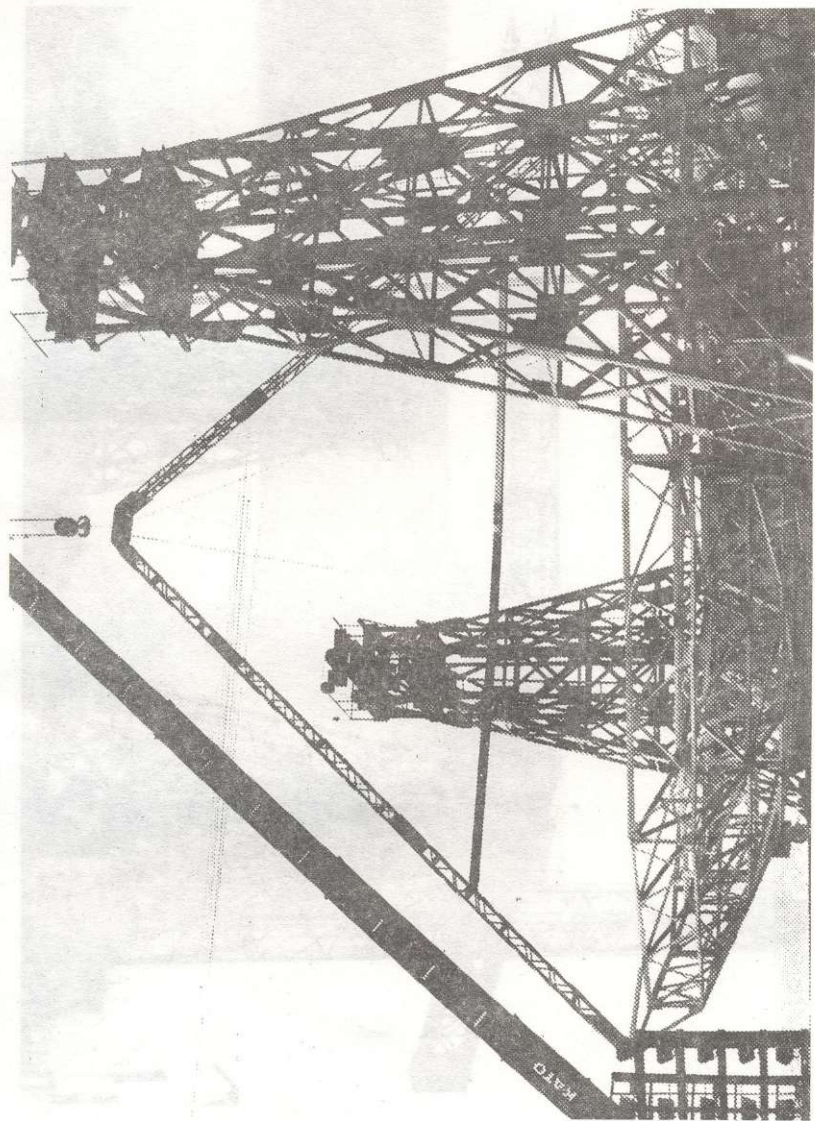


рис. 7.20

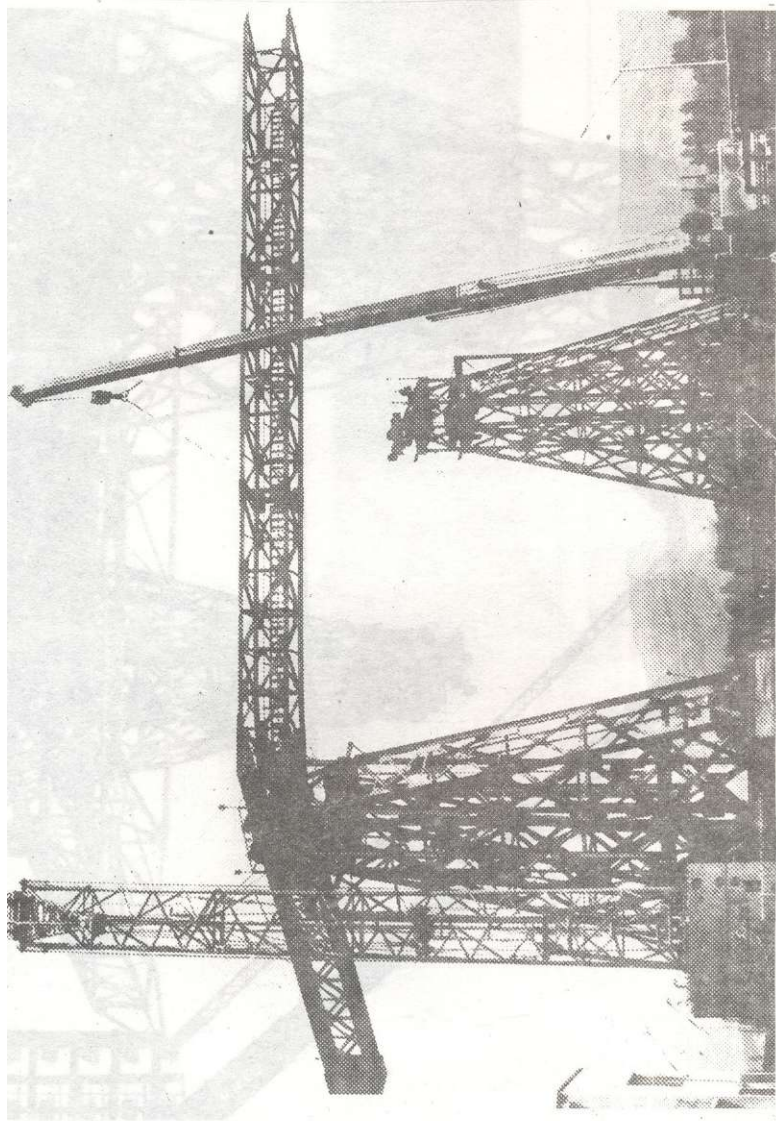


рис. 7.21

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИ *◆* ЛТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

воротном режиме работы для измерения радиотехнических характеристик радиотелескопа в сантиметровом диапазоне радиоволн.

С этой целью на технологическом стенде поэтапно были проведены монтажи временных и универсальных опор облучателя (рис. 7.20 и 7.21). Универсальные опоры облучателя, которые опираются на башни, ориентируются совместно со стапелем при помощи крепления к нему оттяжек. На вершине имеется фокальный контейнер для устройства и обслуживания облучателя и приемников.

Несущеспособность технологического стенда допускает восприятие максимальной ветровой нагрузки при любой схеме расположения стапеля и башен. Однако исследование космического радиотелескопа с дециметровым рабочим диапазоном радиоволн ограничено скоростью ветра до 7–10 м/сек, а в сантиметровом диапазоне – до 5 м/сек. Эти показатели корректируются отражающим экраном изделия космического базирования. От этого фактора и силовых параметров конструкции антенны зависят меры предосторожности при осадках. Режим работы в этом аспекте контролируется данными автономной метеостанции. Искусственное освещение позволяет проводить исследование и обслуживание технологического стенда в ночное время.

С большим успехом стенд можно применять для апробации солнечных концентраторов без изменения технологической цепи всего комплекса.

7/2

Вопросы создания космических конструкций рассматриваются в статье с точки зрения их роли в развитии космонавтики. Приводятся основные этапы создания космических конструкций, начиная с разработки концепции и заканчивая изготовлением и испытанием модели. Описаны методы проектирования космических конструкций, применяемые в настоящее время. Приведены примеры космических конструкций, созданных в настоящее время. Рассмотрены перспективы создания космических конструкций в будущем.

Э.В. МЕДЗМАРШАВИЛИ ✦ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

## 8 Экспериментальное исследование принципов построения трансформируемых конструкций и испытания образцов техники больших космических радиотелескопов

Создание стендового комплекса является основным условием реализации всесторонних экспериментальных исследований на земле больших космических разворачиваемых радиотелескопов и других крупногабаритных инженерных сооружений космического базирования. Он также дает возможность апробации орбитальной технологии с имитацией условий космоса, которые значительным образом влияют на материалы, технологические процессы, а также на характер работы конструкции.

На созданных стендах для проведения испытаний и исследований конкретной системы требуется решить и увязать целый комплекс возникающих при этом проблем и задач:

- технологическая оснастка и устройство для сборки изделия;
- создание средств для осуществления имитирующих температурных вакуумных, силовых статических и динамических воздействий;
- создание электронных и электромеханических комплексов для измерения возникающих механических сил, усилий, напряжений и колебаний;
- создание простых оптических, лазерных, ультразвуковых и других систем;
- обеспечение цифровых, графических, фото-, кино- и видеофиксаций кинематических процессов;
- создание отдельного класса приспособлений для гидросферы;

- математическое моделирование процессов трансформации, статической и динамической работы конструкций в условиях эксперимента;
- программное обеспечение получения и обработки информации;
- обеспечение специальной осветительной техникой;
- обеспечение мер безопасности при проведении испытаний и сборке экспериментальных образцов.
- получение гидрометеорологической информации.

В результате проделанной работы на созданном стендовом комплексе стало возможным проведение всесторонних экспериментальных исследований образцов космических больших радиотелескопов.

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИ И Л. П. АНДРОПОВЫЕ: КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

## 1 Исследование схематических моделей конструкции и фрагментов космических радиотелескопов

На первом этапе, кроме технического, технологического и математического обеспечения, особое место занимает предварительное экспериментальное исследование схематических моделей конструкции и его фрагментов.

В этом случае, в основном, решались две задачи. Первая — это практическая оценка общих принципов создания больших космических радиотелескопов, а вторая, немаловажная — оценка технологий средств и методики ее изготовления и экспериментального исследования на земле. Это для космических систем, как уже отмечалось, с экономической и технической стороны имеет огромное значение.

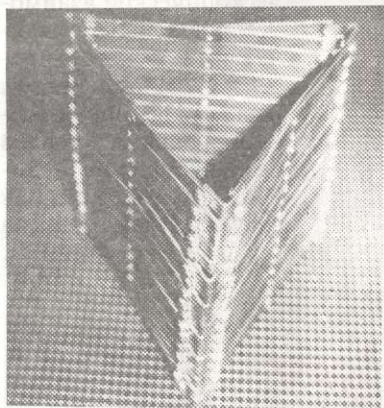


рис. 8.1, а

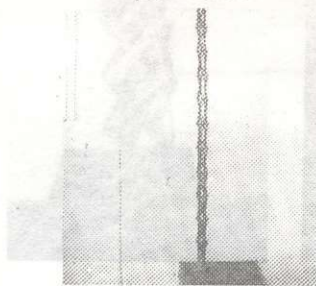


рис. 8.1, б

Был испытан принцип строения трехгранной пространственной пантографической развертываемой опоры (рис.8.1,а,б). Она показала большую кратность трансформации всех типов длиномерных элементов, возможность планомерного и управляемого разворачивания структуры с сохранением на каждом этапе достаточной жесткости и, что главное, простоту подходов к ее изготовлению. Это и было подтверждено на сравнительно большой модели (рис.8.2,а,б), где с добавкой поясных ломающихся стержней была дос-

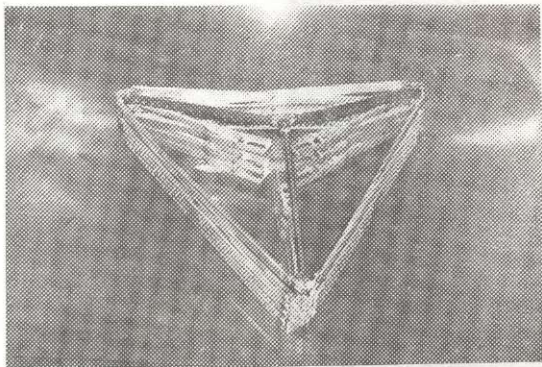


рис. 8.2,а

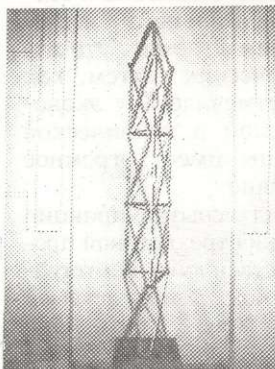


рис. 8.2,б

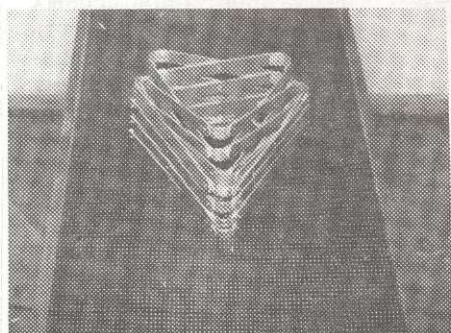


рис. 8.3,а

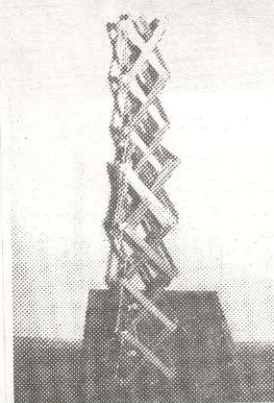


рис. 8.3,б

тигнута требуемая жесткость опор. Вместе с этим, в целях достижения минимального размера сложенного пакета длиномерных элементов, был смоделирован разработанный принцип телескопической взаимопантографической плоских и пространственных систем с различными размерами составляющих элементов без нарушения единой геометрической структуры пакета

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИ И ПЕРЕНСОНОВИЧУШИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



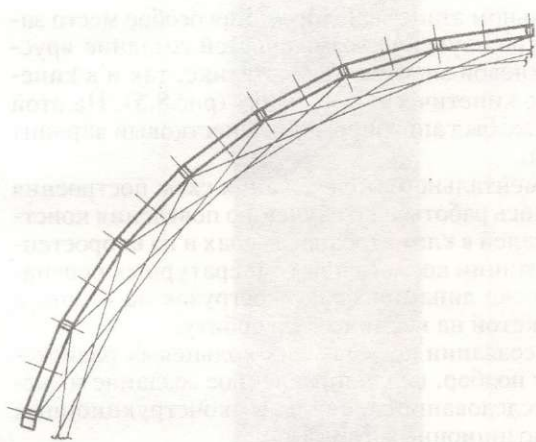


рис. 8.4

трансформируемых системах в целях облегчения силового кольца и повышения его жесткости.

(рис.8.3, а, в).

Самые приближенные модели, отражающие также разработанный принцип внутреннего обрамления кольца со сдвинутыми по отношению друг к другу многоугольниками из односторонних связей (рис.8.4), показали перспективность их применения в

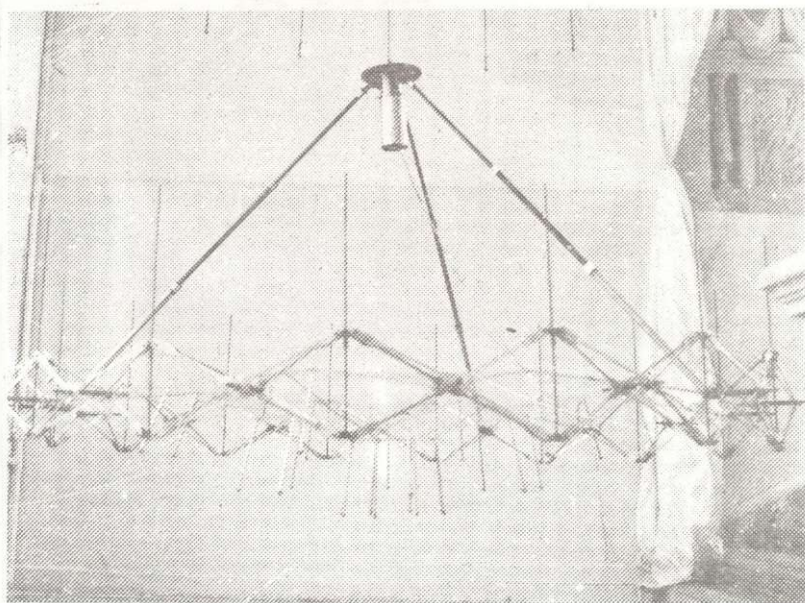


рис. 8.5

На предварительном этапе моделирования особое место занимает практическое изучение возможностей создания ярусной вантово-стержневой системы как в статике, так и в кинематике совместно с кинетическим кольцом (рис.8.5). На этой стадии в моделях уже был апробирован и лепестковый вариант кольцевой системы.

Кроме экспериментального исследования схем построения системы, проводились работы и по изучению поведения конструкции узлов и деталей в климатобарокамерах и на вибростендах в условиях имитации космоса при температурных перепадах, вакуума, а также динамических перегрузок на старте и выводе изделия ракетой на космическую орбиту.

Особое место в создании космических кольцевых радиотелескопов занимает подбор, целенаправленное создание и экспериментальное исследование специальных конструкционных материалов и композиционных структур.

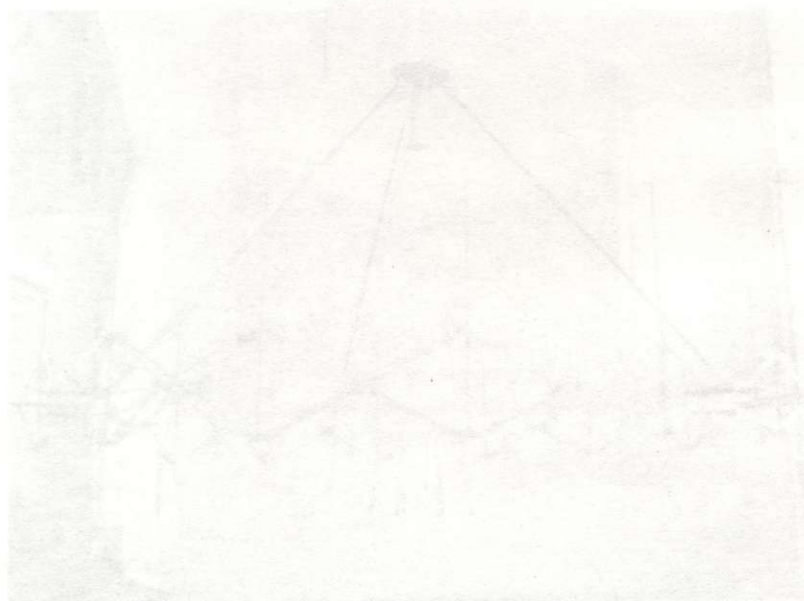


рис. 8.5

## 2

### Экспериментальное исследование кольцевой вантово-стержневой ярусной конструкции диаметром 15 метров КТРТ.ОРА.1.30(15)

В целях практической оценки принципов построения кольцевой ярусной системы и ее конструктивного решения, восприятия изделием динамических, статических и температурных воздействий и, что самое главное – анализа процесса трансформации и сохранения формы отражателя, был изготовлен 15 метровый вариант – КТРТ.ОРА.1.30(15), фрагмент которого в развернутом виде показан на рис.8.6.

Диаметр кольца изделия, как отмечалось, составил 15 метров, а экрана – 12 метров. Радиус сферической поверхности экрана – 15 метров. Сложенный пакет с центром имеет диаметр 0,6 м, а высоту 1 м. Его собственный вес 160 кг. Время раскрытия с тремя электродвигателями – 7,5 сек. Радиальное усилие натяжения каркаса в каждом узле кольца достигает 600 Н.

Проведенные исследования подтвердили реальность создания куполообразных форм из вантовых и стержневых элементов без взаимосвязи жестких стержней, т.е. формирования пространственной ярусной системы из т.н. “летающих” стержней, что для трансформируемых изделий весьма важно.

Как структура центра, так и кольцо по несущим способностям в развернутом виде не требует каких-нибудь усилений по отношению сил преднапряжения и других статических, динамических и температурных воздействий. Для сравнения с теоретическими данными, были проведены испытания, которые подтвердили правильность математической модели системы. Во время испытаний изучались не только характер общего поведения изделия, но и напряженно-деформированное состояние в отдельных частях и элементах конструкции антенны (рис.8.7)

Целиком система развертывания с электродвигателями и тросовой системой по принципу “полиспасть” удовлетворила поставленным требованиям по развертыванию кольца и развитию заданных сил натяжения центра. Однако разница тяговых сил в разных секциях, вызванная потерями в блоках за счет трения и другими аномальными процессами, вызвали неравномерное перераспределение сил в элементах разверты-

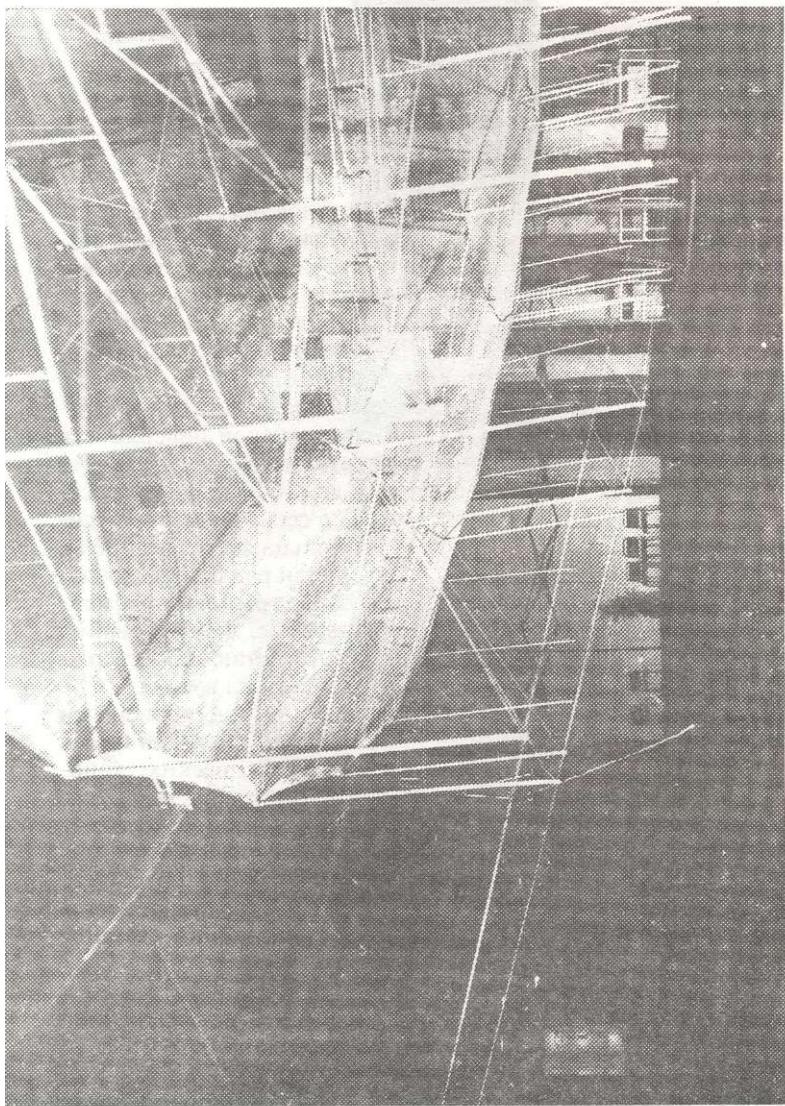


рис. 8.6

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ *✧* ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

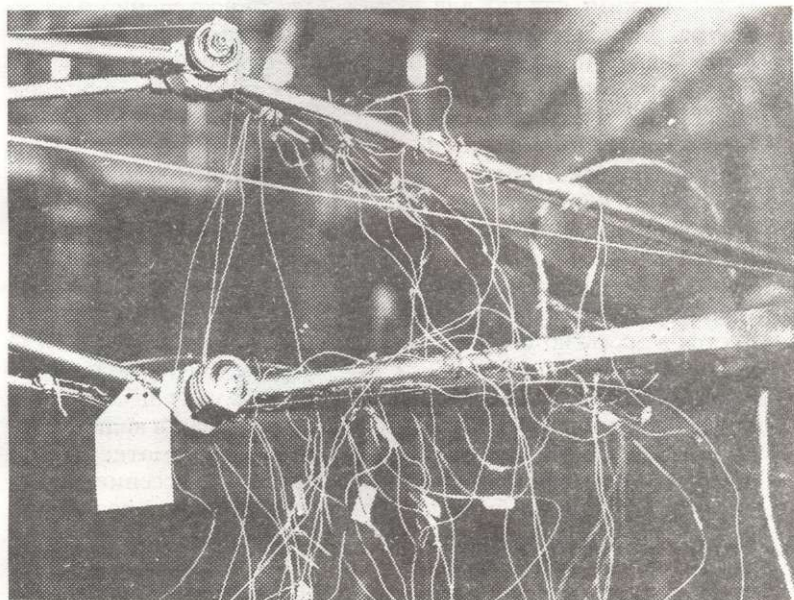


рис. 8.7

ваемого силового кольца. Это вызвало несимметричный процесс развертывания и разные, порой предельные прогибы в трубчатых элементах кольца. В процессе экспериментальных исследований, для частичной компенсации этого нежелательного эффекта стержни были усилены листовыми накладками. Для дальнейших же разработок было намечено принятие особых мер в этом направлении. Было решено отказаться от сферических узлов и установить зубчатки “синхронизаторы” между соседними секциями и включить в кольцо добавочные жесткие стержни в виде “ломающихся” поясов.

В отличие от зонтичных систем экрана в ярусном варианте, где сетеполотно экрана крепиться на круговые полигональные обрамляющие яруса, тросовый эффект “парусности” экрана наблюдается на 35÷50% меньше. Безотказно сработала конструкция регулирования формы экрана, устроенная на “летающих” стержнях. Надо отметить, что конструкция стержней и кольца, а также все узлы с учетом фиксаторов степеней свободы кольца, соответствовали техническим и технологическим требованиям. В этом отношении доработка потребовалась по узлам анкеровки вант и, что самое главное, по размерам вант

между узлами, так как для достижения равностепенного натяжения элементов ярусов система оказалась весьма чувствительной. По известным аналогам пространственных решетчатых систем это можно было ожидать. Но наличием односторонних связей и малых усилий по сравнению с наземными сооружениями, этот фактор резко дал о себе знать. Именно поэтому было принято решение установить длину между анкерами в напряженном состоянии вант с помощью силовых кондукторов. Эти кондукторы фиксируются на практически неподвижной площадке, где строго измеряется расстояние между ними. После этого в их узлах проводится трос, натянутый эксплуатационными силами, после чего система фиксируется и тросы по участкам анкетируются в узлах. Такая технология и была подобрана для других вариантов кольцевых систем с вантовыми структурами. Несмотря на существование предварительных разработок по противозацепам в виде технологических посадочных трубок на стержнях, намотке каната на ролики и их наклеивании к стержням или нанесении технологической сетки не было достигнуто решение, которое можно было бы назвать удачным. При испытаниях не было зацепок, но не было полной уверенности, что их не будет.

Конструкция 15-метровой антенны была развернута 295 раз со 100%-ой безотказностью. После разворачивания всегда формировалась заданная система и наблюдалось качественное натяжение сетеполотна экрана.

Несмотря на все это, ступенчатое падение сил натяжения системы по ярусам, особая точность изготовления и податливость вантово-стержневой системы затрудняет применение КТРТ.ОРА.1.30 в радиотелескопах, предназначенных для сантиметровых радиоволн.

Разработанная конструкция соответствует всем требованиям эффективности построения больших космических развертываемых радиотелескопов для метровых и дециметровых длин радиоволн.

Э. В. МЕДВЕДЕВ, А. В. МАТВИШИН, Л. П. АНФОРМОРОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

### 3

## Натурные испытания образцов конструкции КТРТ.ОРА.2.30 и КРТР.ОРА.3.30

Серии испытаний проводились в наземном испытательном комплексе космических трансформируемых радиотелескопов и других крупногабаритных конструкций космического базирования.

В этой большой программе многосторонних испытаний первой была конструкция КТРТ.ОРА.2.30 – вариант с кольцом, ярусной и двухслойной вантово–стержневой системой (см. рис.4.19).

Кольцо с учетом всего технологического цикла полностью изготовлено на заводе и в виде сложенного пакета доставлено на базу, где на круглом стенде, являющимся предварительным каркасом прецизионного стенда, оно было обезвешено и был отработан процесс развертывания без центра.

После оснащения кольца системой механизмов развертывания и его всесторонней наладки, совместно с ярусным и вантово–стержневым центром, был собран каркас зеркала КТРТ.ОРА.2.30 с помощью дифференцированного механического обезвешивания участков конструкции по упругим подвескам, которые в процессе трансформации специальными каретами перемещаются на радиальных вантовых направляющих.

Основные цели испытания каркаса зеркала КТРТ.ОРА.2.30 (рис.8.8) заключались в следующем:

- практической реализации ярусной и вантово–стержневой системы центра в натуральных решениях и в размерах структуры диаметром 30 м;
- общей оценке жесткости геометрической формы, особенно для фиксированных в пространстве “летающих” стержней ярусной системы;
- апробации технологического процесса построения каркаса зеркала из стержней и гибких односторонних связей и при этом достижение проектной геометрии расположения элементов экрана антенны;
- обработке противозацепочных приемов и средств как для элементов самого радиотелескопа, так и для довольно сложной системы механического

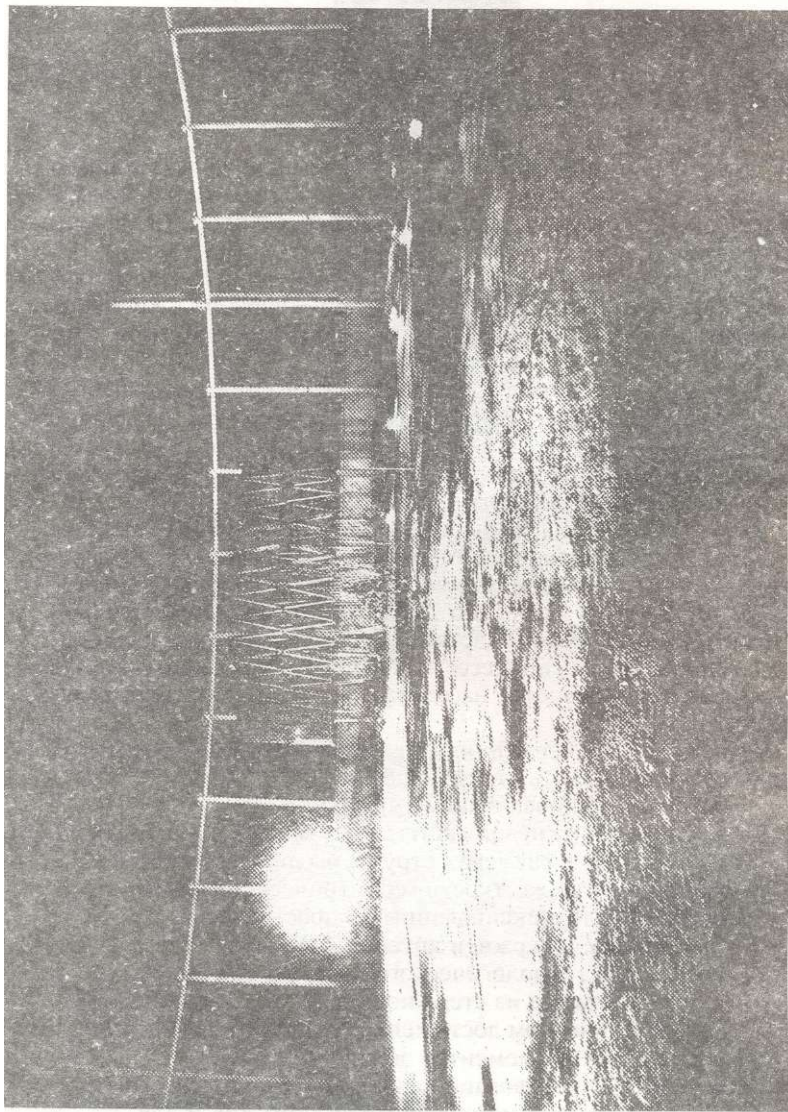


рис. 8.8

Э. В. МЕДЗМЯРИШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



обезвешивания, имитирующего условия невесомости при развертывании и напряженного состояния изделия;

- исследовании процессов трансформации и уровня ее надежности как при конкретных, так и при многократных развертываниях;
- уточнении вариантов свертывания конструкции и упаковки сложенного пакета;
- общей оценке основных принципов построения кольца с учетом работоспособности электромеханической силовой системы типа “полиспаст”, эффективности пружин, “ломающихся” поясов, тягового узла и шестерней “синхронизаторов”;
- выявлении достоинств и недостатков механической системы обезвешивания с учетом сравнения подвесок из гибких элементов или тросов с противовесами, оценке эффективности вантовых направляющих и типов карет.

На основе проведенных исследований, в принципе, была подтверждена правильность технического и технологического решения конструкции КТРП.ОРА.2.30.

Из цикла проведенных работ и полученных результатов надо отметить большую жесткость структуры ярусной системы, узлы которой не имеют кинематических перемещений. Это и способствовало при экспериментах устойчивому сохранению геометрии зеркала как от ожидаемых функциональных нагрузок, так и от воздействия снега и значительного ветра, что для известных традиционных космических конструкций практически неприслеме и недостижимо.

Эксперименты, проводимые еще на этапе строительства прецизионного стенда без покрытия, доказали способность кольца за счет электромеханической тросовой системы, крестообразных элементов, пружин и, что главное, шестерней “синхронизаторов” обеспечить равномерный, симметричный, силовой и надежный процесс развертывания и последующего натяжения центральной части, с сохранением устойчивости конструкции.

Кинематический признак кольца – наличие лишь одной степени свободы по всей системе – был нагляден при нештатной ситуации, когда трос обезвешивания зацепился за узел кольца и зафиксировал развертывание секции. В результате эта зацепка стала ограничителем единственной степени свободы. Поэтому энергии работы всех звеньев была сконцентрирована именно в этой секции. Впоследствии суммарная сила всех яче-

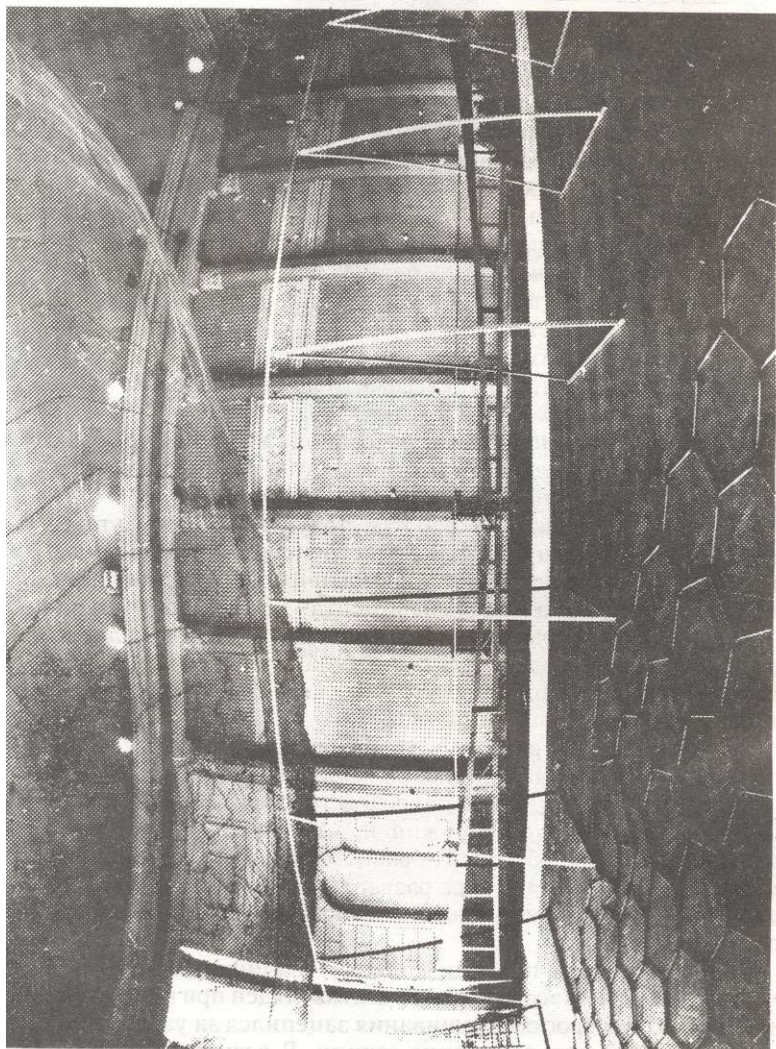


рис. 8.9

Э. В. МЕДЗМАРЦЬАШВИЛИ ✧ ТЕРМАНСКОР-ИЩУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

ек вызвала местный изгиб крестообразных элементов этой ячейки, что сняло ограничение и раскрытие с местной деформацией секции кольца всетаки состоялось.

Основными были серии и положительные результаты испытаний конструкции КТРТ.30.ОРА.2.30, обеспечивающие на космических орбитах формообразование конструкции.

Экспериментальные исследования оправдали теоретические предпосылки преимущества ярусной вантово-стержневой системы для метровых и дециметровых длин радиоволн.

Была выявлена также излишняя несущеспособность как кольца в целом, так и ее отдельных элементов, которые в целях оптимального проектирования потребовали дальнейших теоретических и экспериментальных исследований для определения экономичных форм и сечений элементов.

Путь совершенствования схемы зеркала совпадал с теоретическим прогнозом о введении в систему лепестковых элементов.

С учетом отмеченного выше, до изготовления и испытания конструкций КТРТ.ОРА.3.30 и КТРТ.ОРА.Б.М.30, в целях практической проверки намеченных конструктивных изменений, был проведен эксперимент над фрагментами и элементами конструкций радиотелескопов.

Для комбинированного варианта, при совместном применении вантово-стержневой и лепестковой систем, в целях совместимости степеней жесткости и концентрации веса отдельных структур, предпочтительным оказалась система не из сплошных или перфорированных лепестков, а рамная система лент и накладных распорных стоек или лепестков с окнообразными вырезами (рис.8.9).

На фрагменте при натяжении была достигнута жесткость и плоское состояние конструкции, что для параболических контуров экрана весьма важно.

Серии экспериментов множества вариантов фрагментов кольца разными механизмами разворачивания и типами изготовления (рис.8.10÷8.15) выявили предпочтение изготовления длинномерных элементов кольца без составных элементов в виде цельного изделия, которые изготавливаются из металлической плиты на обрабатывающих центрах с программным обеспечением. Определенным повышением расходов материала резко повышается жесткость и точность элемента с уменьшением ее собственного веса. Выявлено также преимущество механизмов разворачивания типа "полиспаг" по сравнению с механизмами типа "винт-гайка". Эта позиция подкреплена и мотивом однократного применения механизмов и

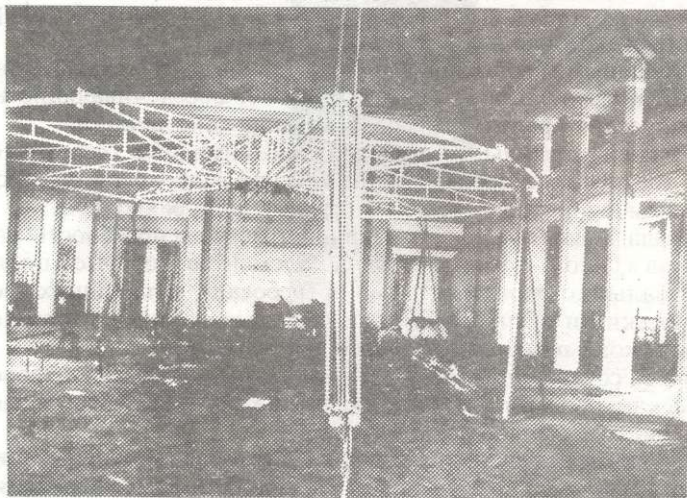


рис. 8.10

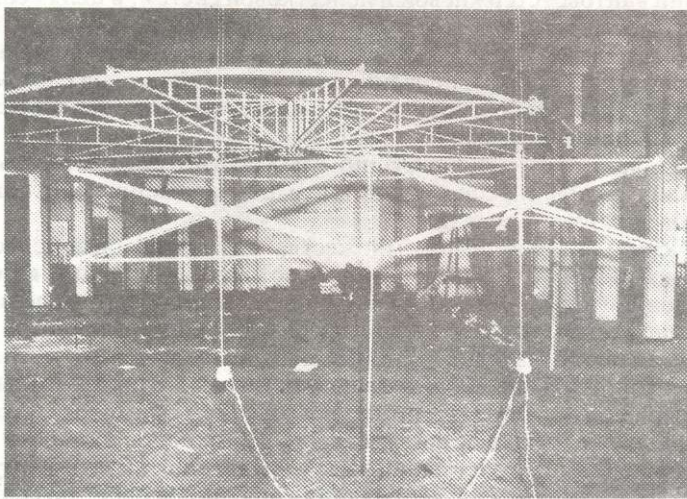


рис. 8.11

Э. В. МЕДЗМАРЦЯНИВЦЫМ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

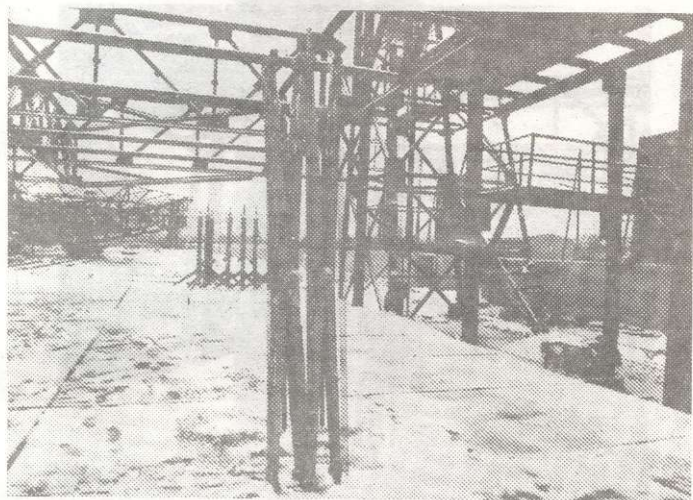


рис. 8.12

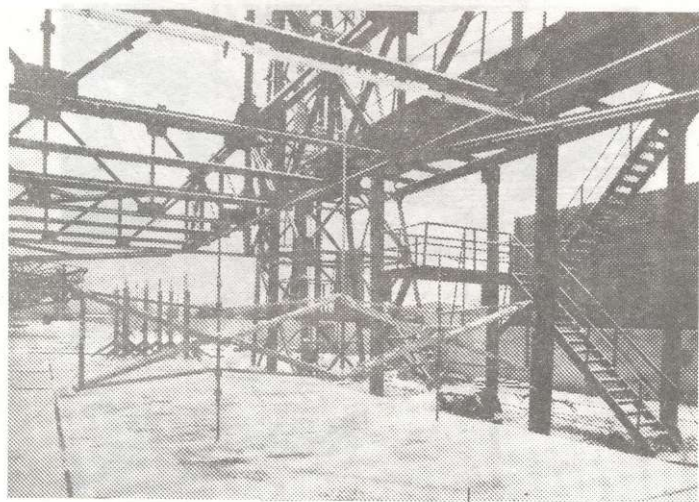


рис. 8.13

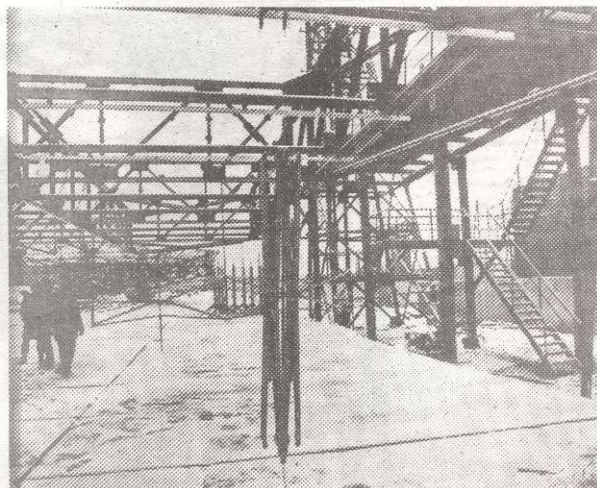


рис. 8.14

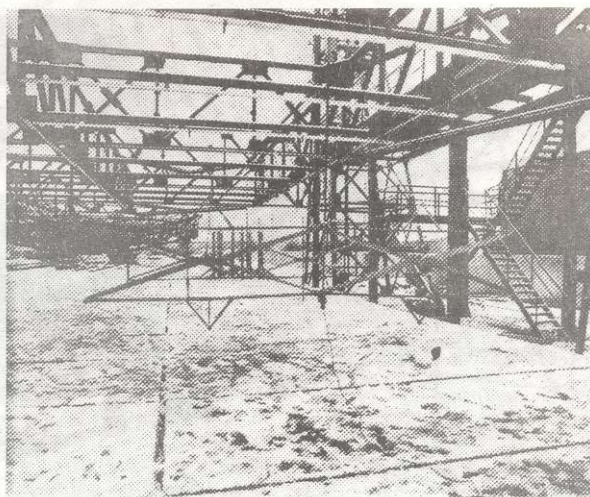


рис. 8.15

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИМ ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

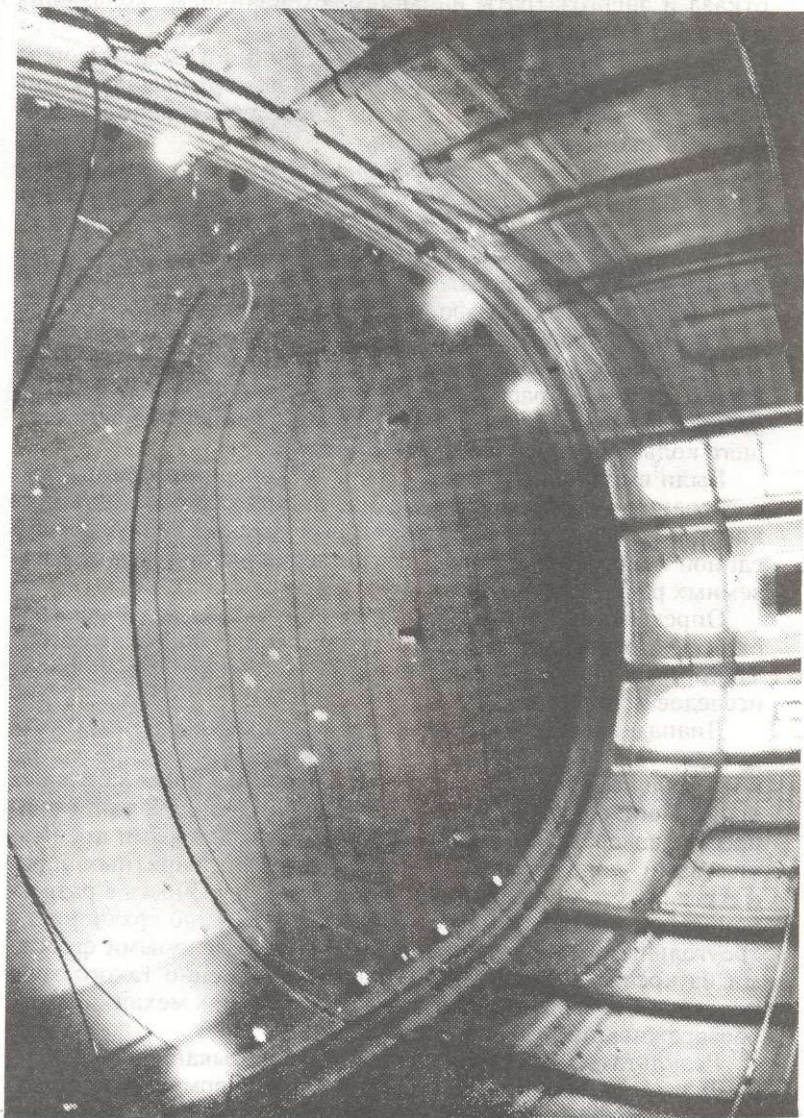


рис. 8.16

космической средой функционирования изделия, где вариант отказа и энергозатраты на системах с наличием скользящих поверхностей нарастает.

На основе проведенных силовых испытаний была получена реальная напряженно-деформированная картина элементов кольца и на основе этих данных определены сечение и конфигурации отдельных ее частей.

Большой объем экспериментальных работ был выполнен по определению оптимальных вариантов форм составных частей сетеполотна экрана. При разработке узлов и определения силы натяжения сетки в разных направлениях были сохранены допустимые величины искажений по форме "парусов".

В достижении общей формы (рис.8.16), в отличие от параллельного и кольцевого расположения рулонов в лепестковом варианте каркаса зеркала, предпочтительным является радиально-секторное расположение составных частей куполообразного экрана с силой растяжения в зоне контура обрамляющего кольца интенсивностью  $1,5 \div 2$  кг/м.

Были выполнены теоретические и экспериментальные исследования в области применения трикотажного металлического сетеполотна, результаты которых учтены при построении единой конструктивной структуры зеркал космических и наземных радиотелескопов.

Определение конструкции опор облучателя, являющегося одним из основных частей радиотелескопа, занимает особое место не только в теоретических, но и в экспериментальных исследованиях.

Диапазон испытаний охватывает широкий спектр конструкций.

Стендовые испытания рамно-дисковых крестообразных опор по оценке конструктивных решений напряжений и процессов развертывания (рис.8.17), наряду с силовыми преимуществами, показали повышение весовых и габаритных параметров пакета и неравномерную несущеспособность в разных направлениях поперечного сечения системы, по сравнению с треугольными пространственными развертываемыми фермами из крестообразно-рамных раскосов. Именно такого типа конструкции были исследованы как в условиях механического обезвреживания, так и в гидробассейне.

Результаты испытаний на стенде развертывания (рис.8.18 и 8.19) и на специальном устройстве трансформации подтвердили расчетную плотность и динамическую устойчивость сложенного пакета, а также требуемую продольную и поперечную жесткость развернутой структуры, надежность механизмов



Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИ И ТРАНСПОРТНЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

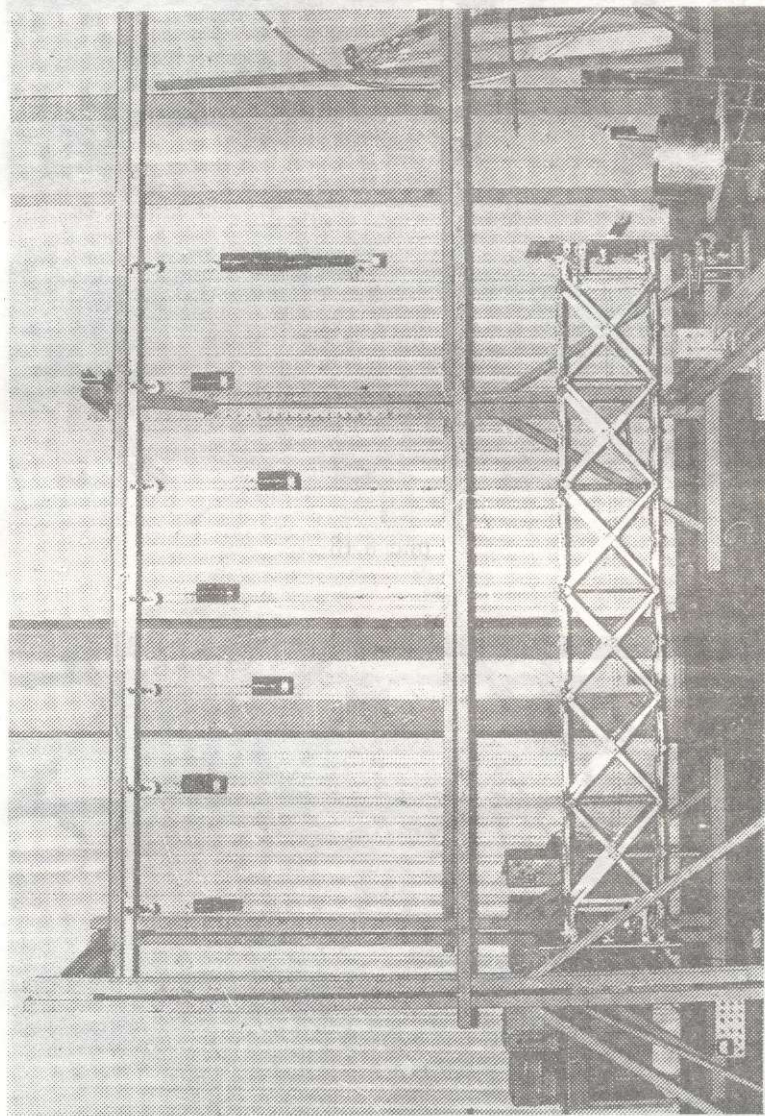


рис. 8.17

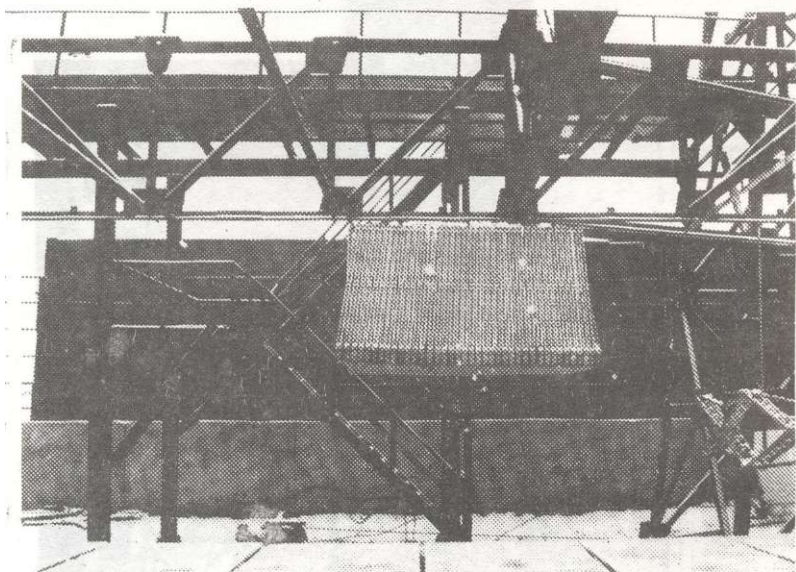


рис. 8.18

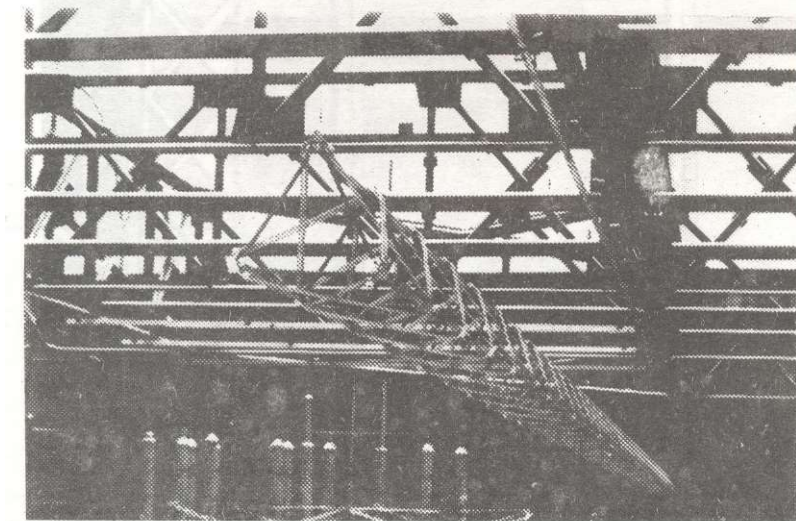


рис. 8.19

Э. В. МЕДЗМАРИАНЦЫ ИЛИ ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

толкателей, демпферов и фиксаторов “ломающихся” поясов и, что примечательно, надежность и устойчивость всего процесса трансформации.

Особое место в построении комплекса на космических орбитах занимает картина формообразования опор облучателя. Опоры в этом случае являются взаимосвязующим и раздвигающим элементом между каркасом зеркала, фокальным контейнером и космическим аппаратом.

Эксперименты процессов трансформации конструкции опор были проведены в гидробассейне.

Подготовка конструкции (рис.8.20) и технологические процессы эксперимента в гидробассейне проводились на уровне требований экспериментов, имитирующих автоматические режимы работы конструкции в невесомости с помощью гидросреды.

Эксперименты в гидробассейне подтвердили стабильность и планомерность этапов формообразования (рис.8.21) и их соответствие разработанным режимам построения космического комплекса на основе трансформируемых систем.

На базе был собран экспериментальный образец конструкции КТРТ.ОРА.3.30, испытания которого были проведены на технологическом прецизионном стенде, а в последующем – на стенде развертывания и поворотном устройстве.

После укрупненной сборки на технологическом прецизионном стенде были проведены серии развертывания зеркала антенны с вантово-стержневым лепестковым центром. Этапы развертывания продемонстрировали кинематику трансформации формы.

Строение изделия показано на фрагментах конструкции (рис.8.22 и 8.23).

На этом этапе испытаний особое место уделялось как изучению процессов развертывания с точки зрения надежности, так и точности и повторяемости поверхности экрана радиотелескопа.

Несмотря на повышение точности геометрических параметров формы зеркала, особенно в лепестковой части центра, по сравнению с КТРТ.ОРА.2.30, не удалось исключить аномальные деформации при закреплении растянутого сетеполотна на каркас.

Сохранение такого отрицательного эффекта объясняется сравнительно меньшей жесткостью вантово-стержневой двухслойной системы по сравнению с другими частями экрана, построенными по ярусной и лепестковой схеме, что и было доказано экспериментом.

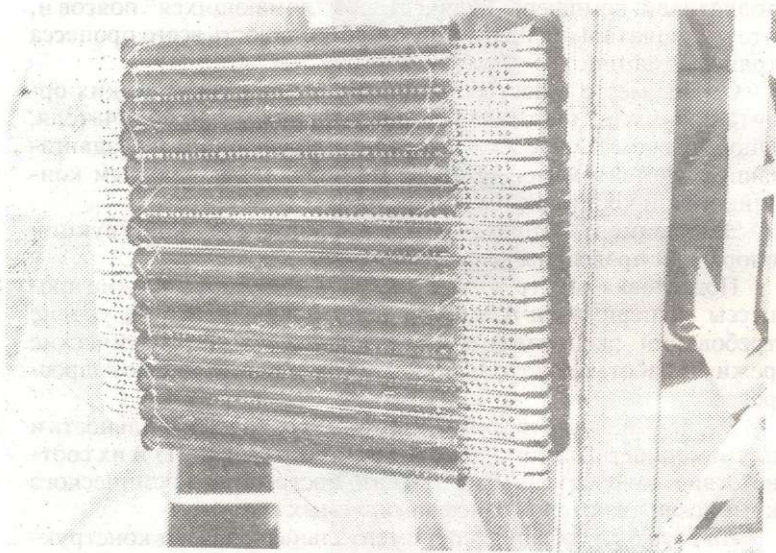


рис. 8.20

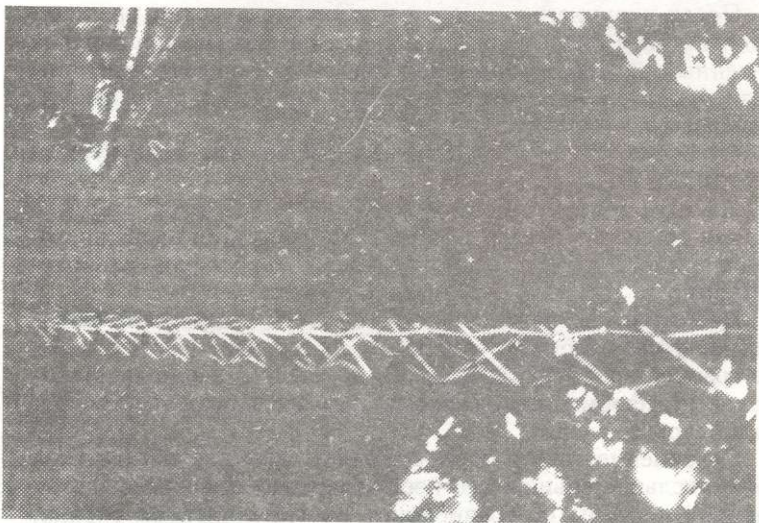


рис. 8.21

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУМ И П. А. АНФОРМОВУЕ МЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДЗМАРЦЬАШВИЛИ ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

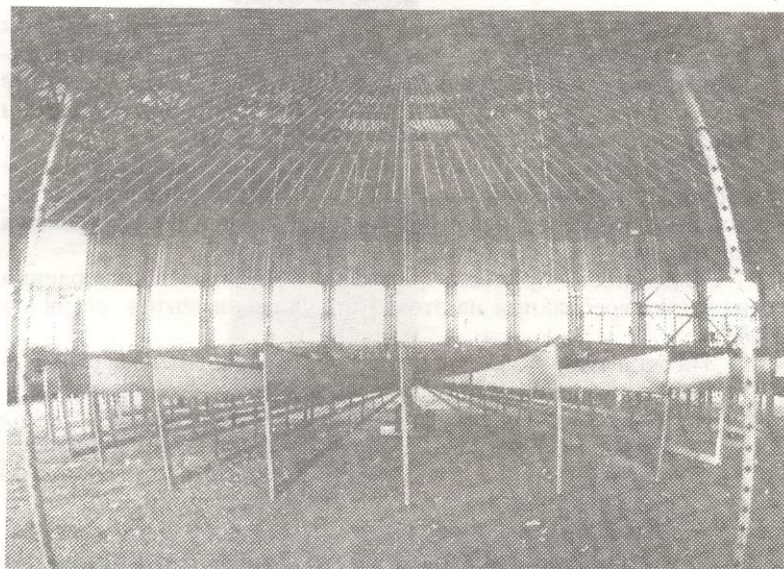


рис. 8.22

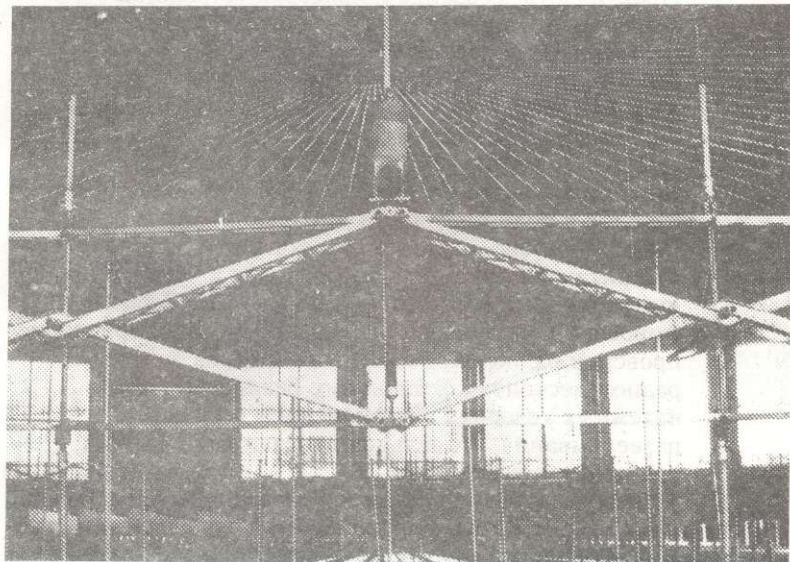


рис. 8.23

Поэтому, в случае исключения вантово-стержневой зоны из КТРТ.ОРА.3.30, ее можно применять не только для дециметровых, но и для радиоволн длиной от 7 до 10 см. К такому заключению привели соответственные измерения геометрии поверхности экрана в отдельных зонах центра.

В целом, эксперименты на прецизионном технологическом стенде на зеркальной части КТРТ.ОРА.3.30 подтвердили основные данные силовых, деформационных и колебательных параметров кольца с центром.

Надежность процесса формообразования без соблюдения штатных требований на этом этапе экспериментов составила 95%.

На открытом стенде развертывания и поворотном устройстве были проведены следующие многоцелевые эксперименты:

- Апробация технологических процессов сборки изделия КТРТ.ОРА.3.30 (рис.8.24) с учетом монтажа центра кольца, сетеполотна, фокального контейнера и опор облучателя в обезвешенном состоянии.
- Исследование конструктивных способов повышения устойчивости кольца из обрамляющих гибких стержней в виде односторонних связей.
- Практическое создание и проверка устройства сворачивания кольца, центра и опор облучателя в сложенный пакет (рис.8.25).
- Возникновение единой системы каркаса радиотелескопа в процессе трансформации в виде кольца опор облучателя и фокального контейнера с реальными геометрическими параметрами.
- Установление степени надежности трансформации изделия в полном сборе.
- Работоспособность системы обезвешивания при габаритах функциональной зоны 36x36x30 м. с имитацией невесомости механическим способом.
- Апробация технических и технологических процессов проверки радиотехнических параметров радиотелескопов космического базирования в наземных условиях с применением стенда развертывания, стапельной передвижной части и поворотного устройства.

Перечисленные задачи практически были решены. Однако некоторые моменты этих широкомасштабных испытаний требуют конкретизации.

Надежность процесса трансформации составила 97%. Но аномалии в большинстве случаев обусловлены не за счет кон-

Э. В. МЕДЗМАРШАВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

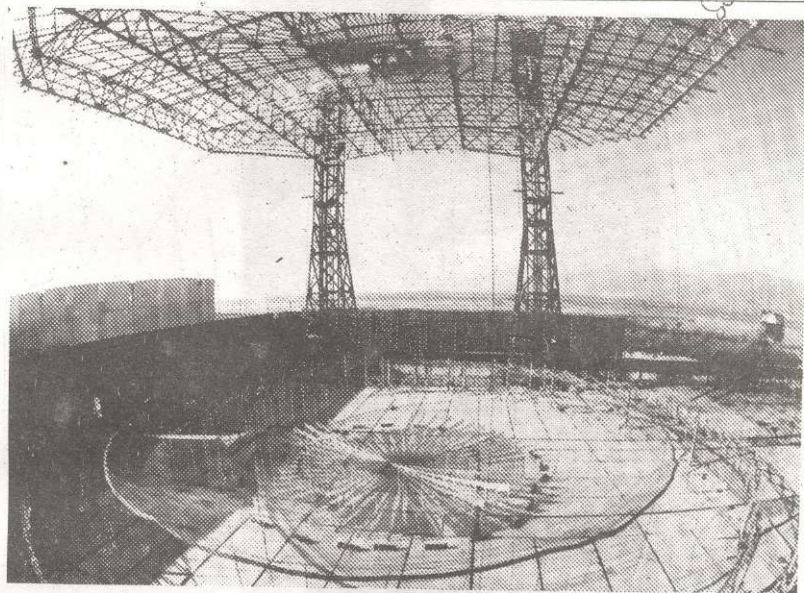


рис. 8.24

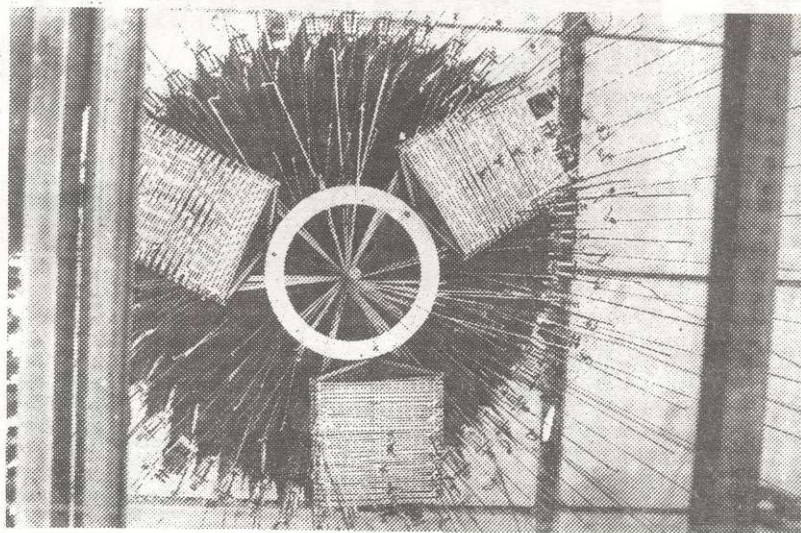


рис. 8.25

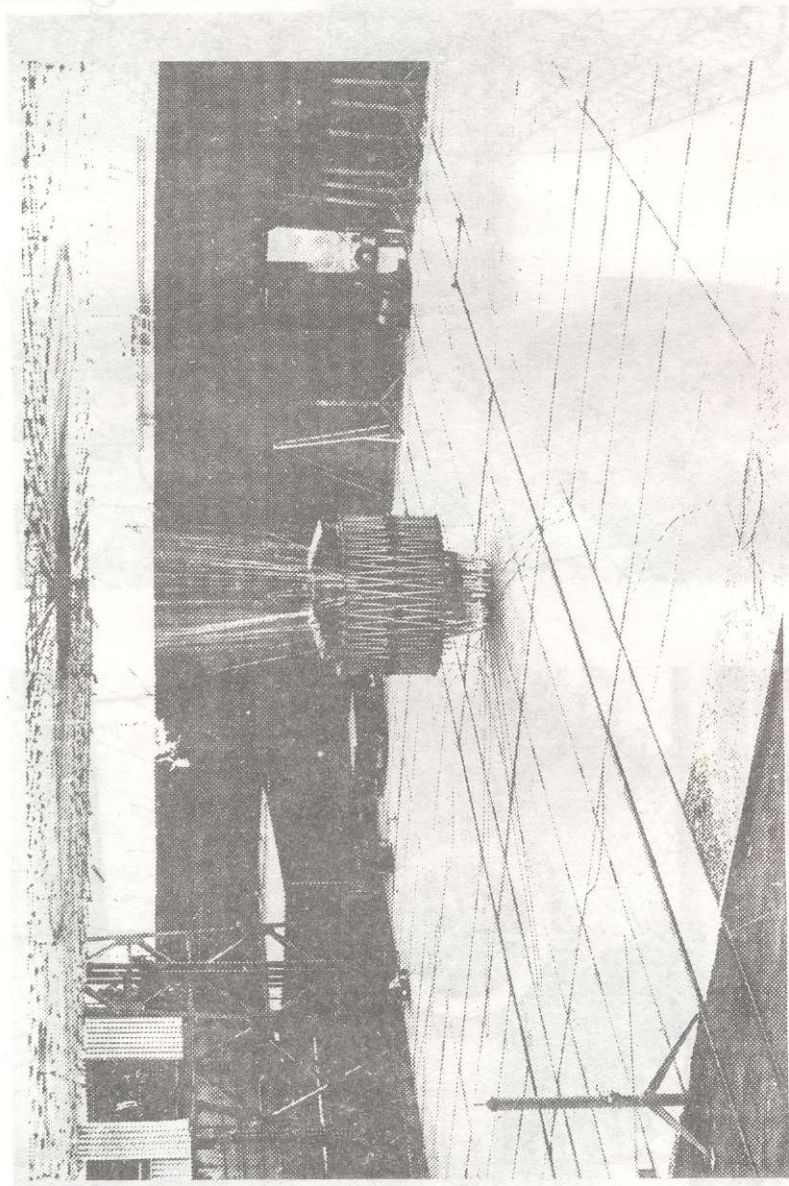


рис. 8.26

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧШИИ ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



Э.В. МЕДВЕДЕВИЧУК ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

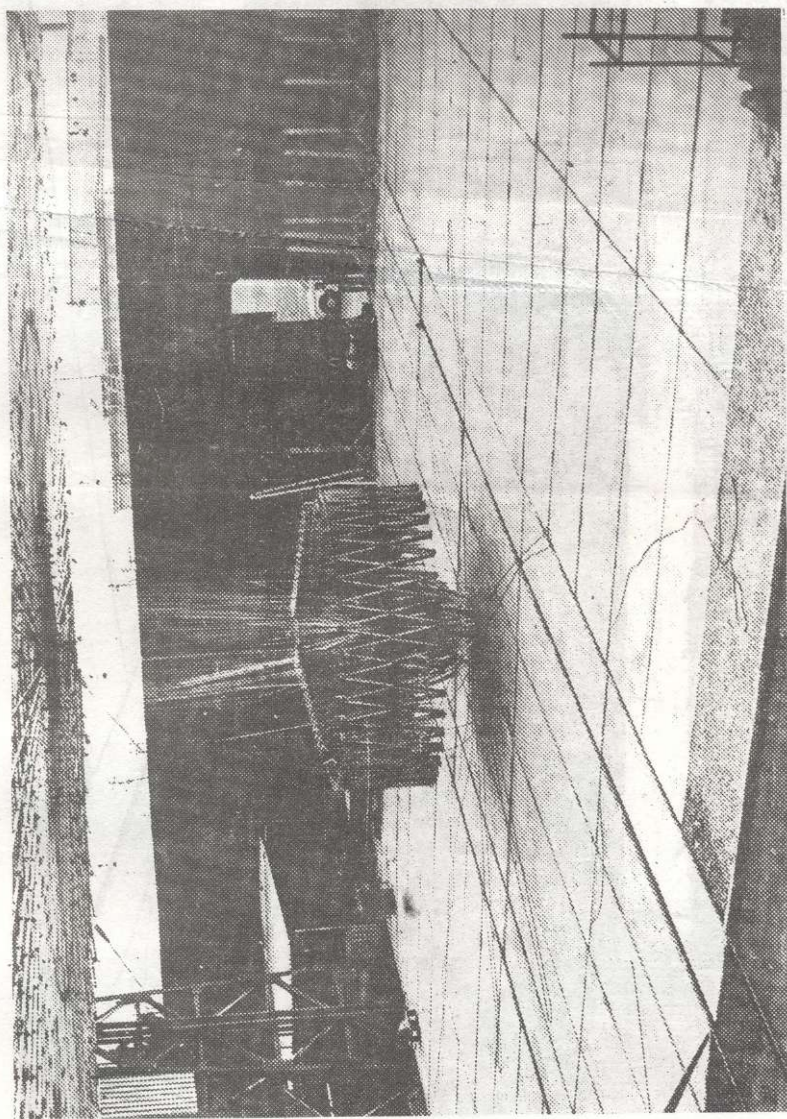


рис. 8.27

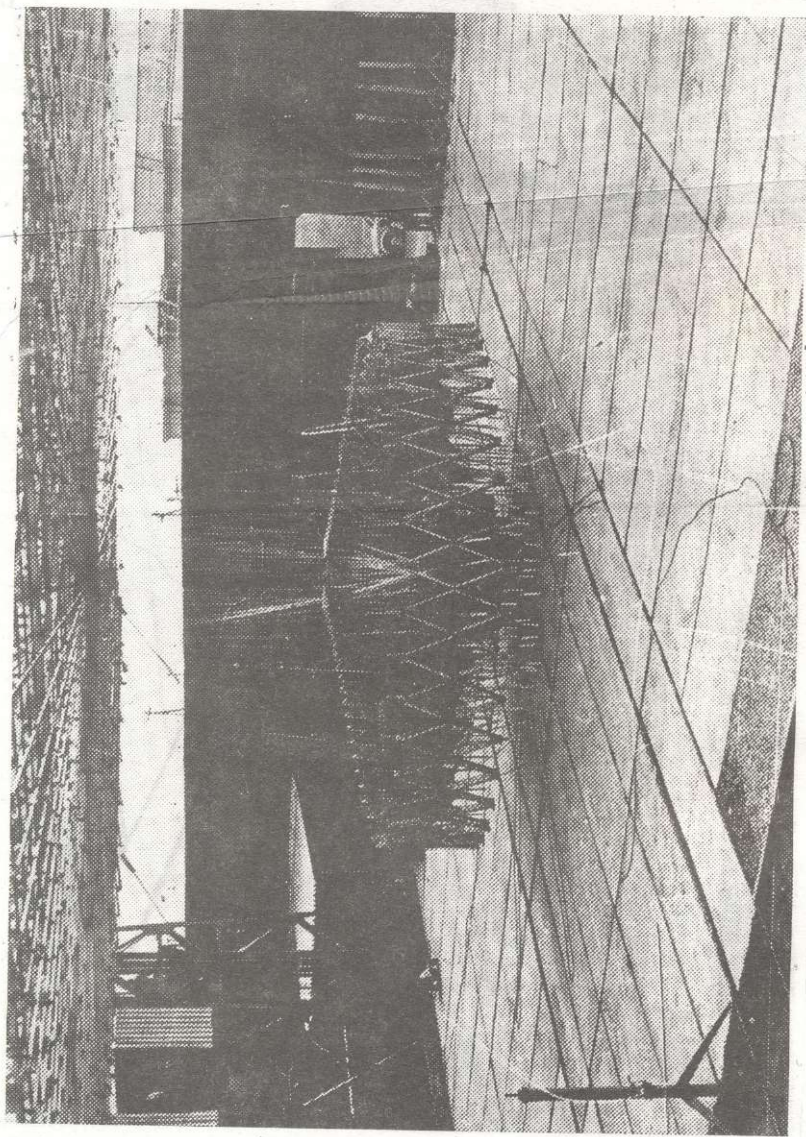


рис. 8.28

Э.В. МЕДВЕДЬ, АРИАНШВИЛИ ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э.В. МЕДВЕДЕВА И В.А. ПЕТРОВИЧЕВЫЕ. ПЕРЕНЕСЕНИЕ НА ПЛОЩАДЬ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ ОБРАЗЦОВ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

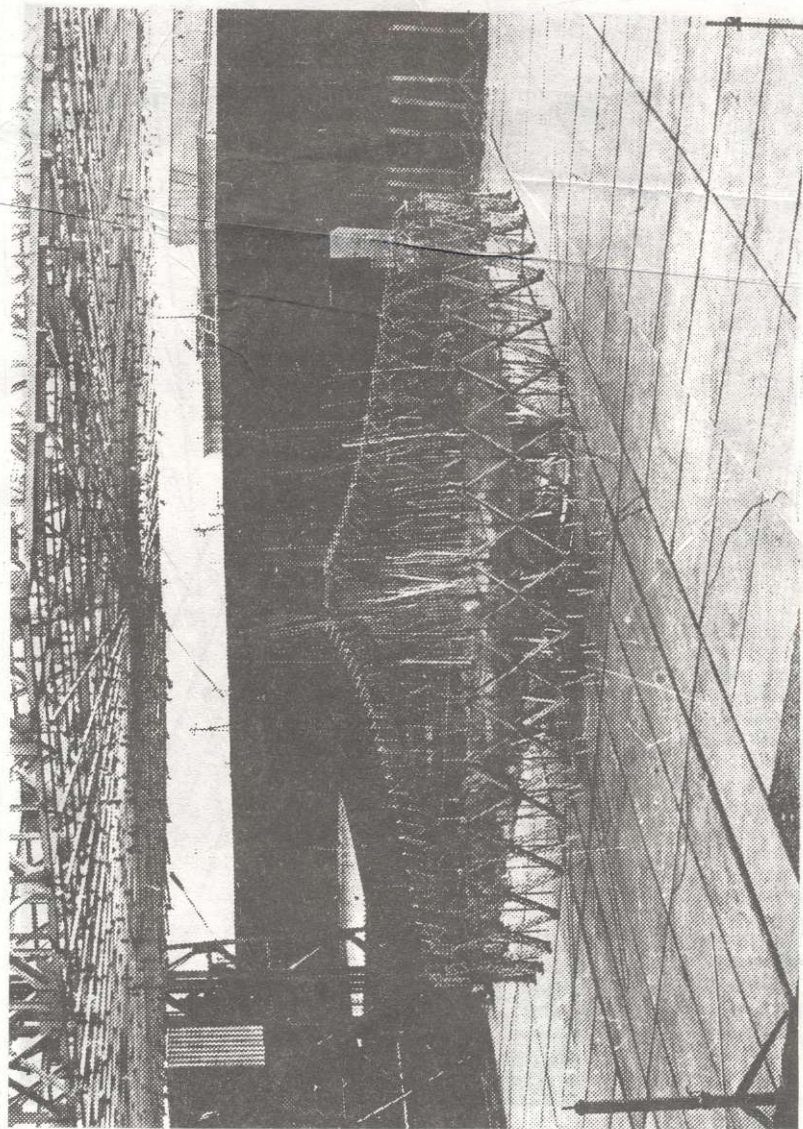


рис. 8.29

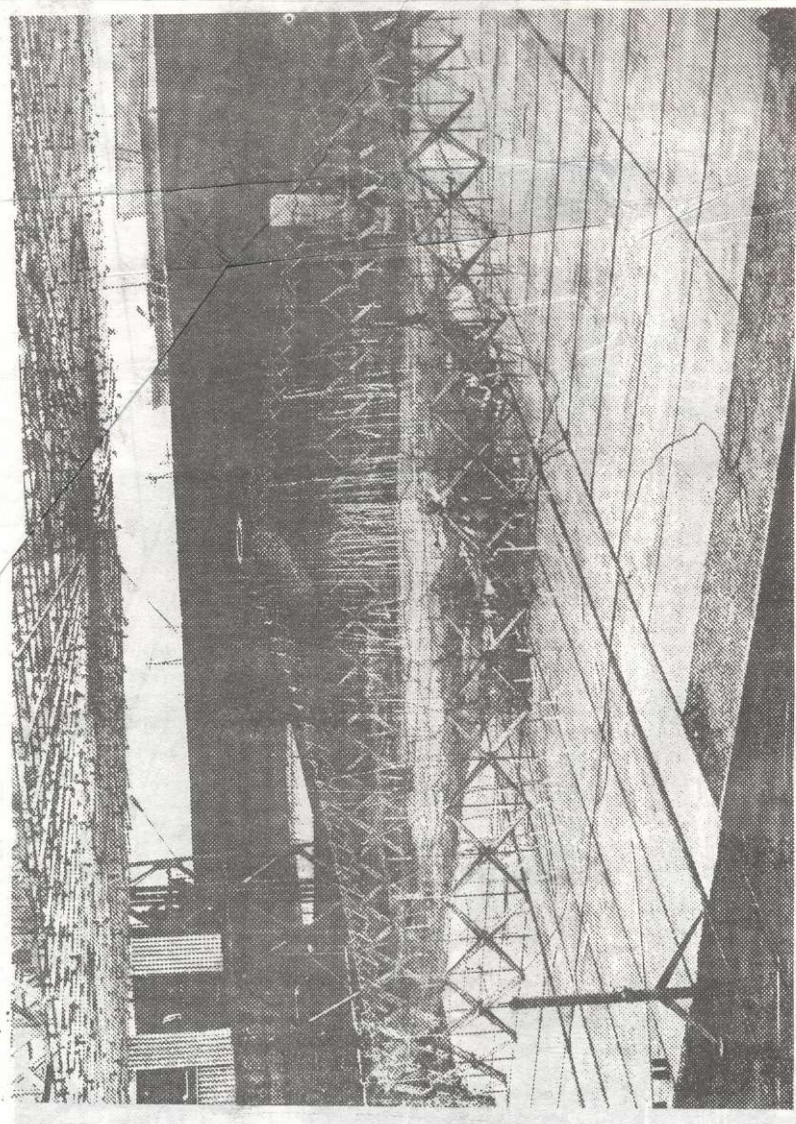


рис. 8.30

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУМ ✧ ПЕРАНФОРМУЮЩЕЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУМ И ПЕРЕНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

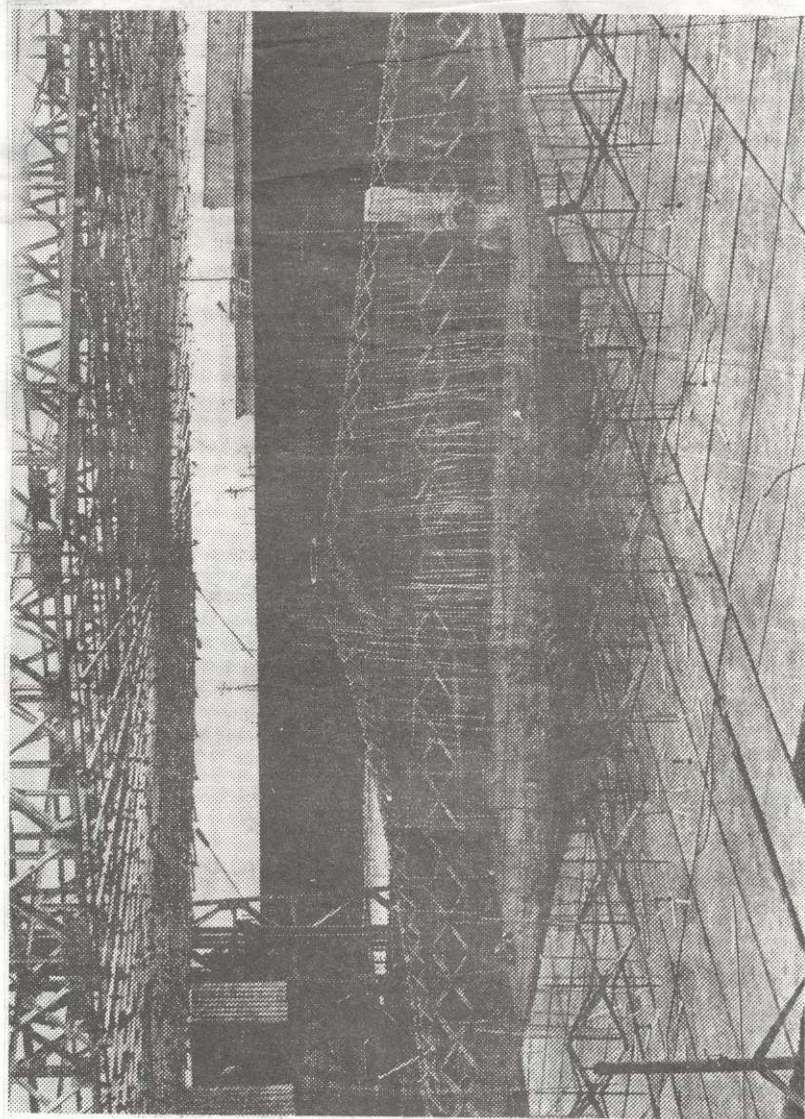


рис. 8.31

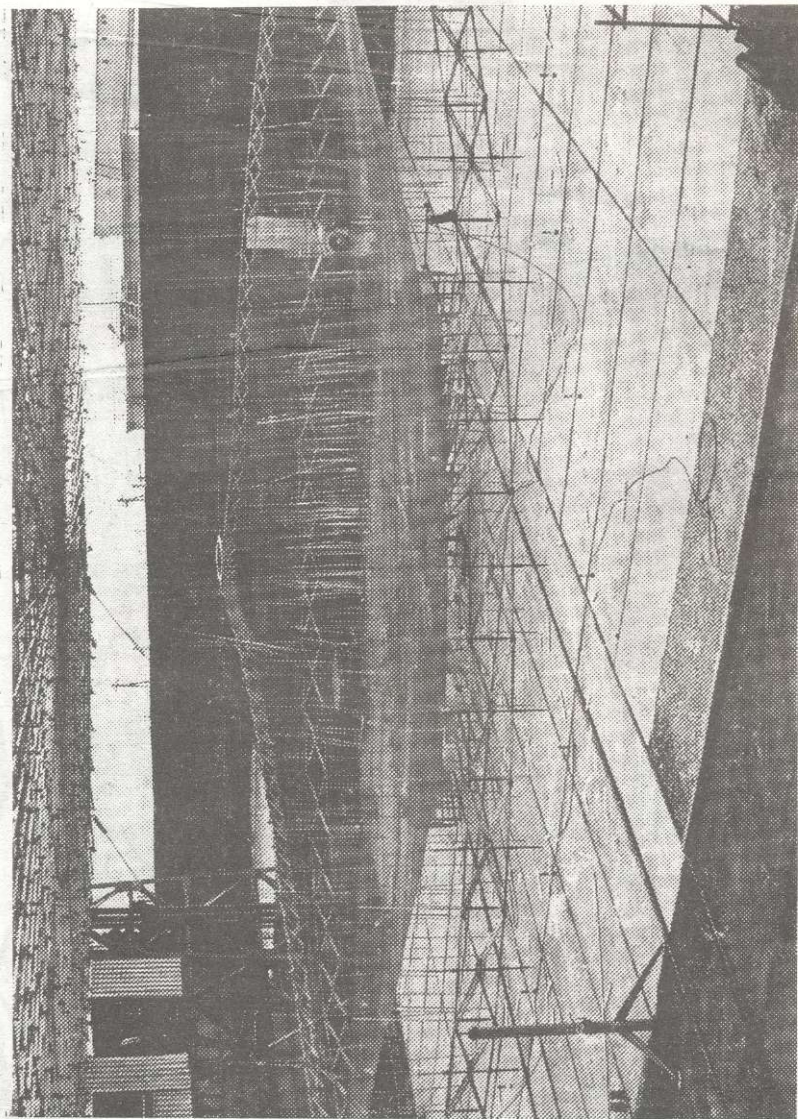


рис. 8.32

Э. В. МЕДЗМАРИШВИЛИ ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э.В. МЕДЗМАРШАВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

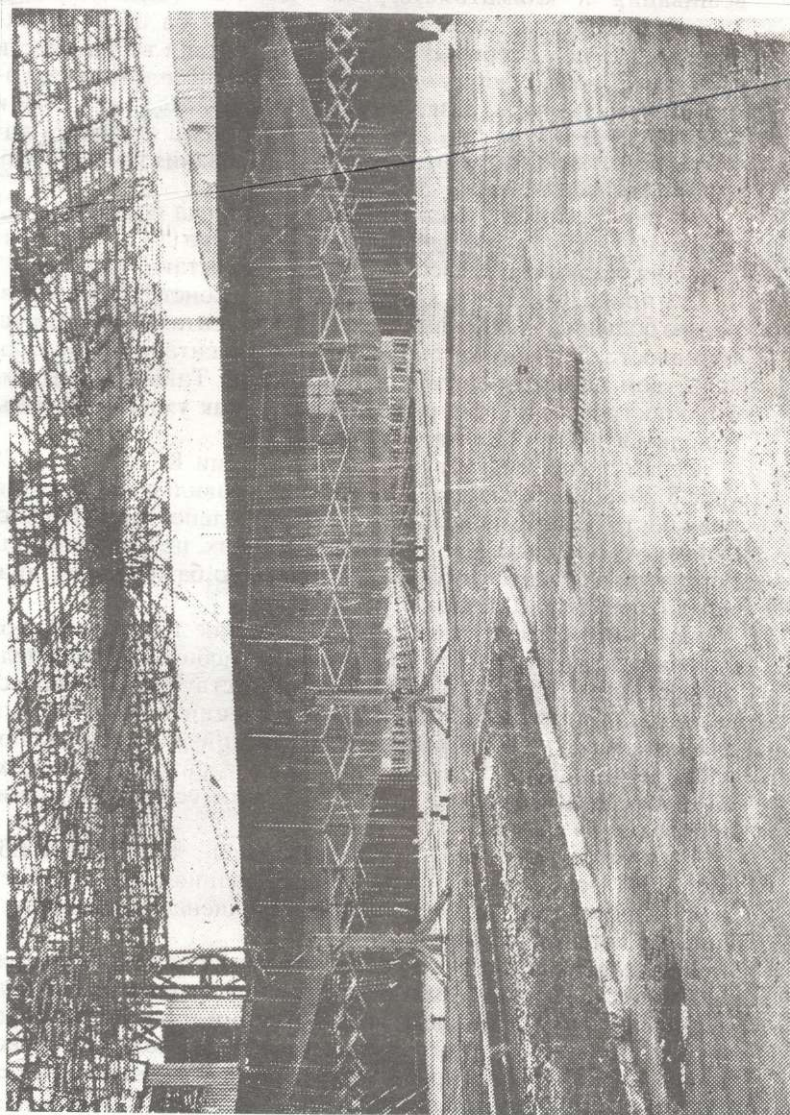


рис. 8.33

структивных особенностей, а неполадками в системе обезвешивания и климатометеорологическими воздействиями, ввиду того, что на этом этапе экспериментов стенд функционировал под открытым небом. Воздействия ветра внесли свои коррективы в форму опор при испытании силового каркаса радиотелескопа на разворачивание в комплексе с кольцом и опорами облучателя. Несмотря на это, система оказалась настолько жесткой, что принцип формообразования практически удачно был реализован.

Касаясь вопроса функционирования стенда под открытым небом, необходимо отметить случай, когда при снежной погоде толщина осадков на развернутой антенне составила 2,5 см.

Это привело к перегрузкам испытываемой конструкции, появлению больших деформаций и потере элементами местной устойчивости. Этот случай оказался экспериментальным доказательством необходимости укрытия стенда. Такое помещение было построено, и стенд разворачивания, как уже отмечалось, находится внутри здания.

Серии экспериментов по трансформации КТРТ.ОРА.3.30 (рис.8.26÷8.33) полностью подтвердили правильность принципов конструирования кольцевых ярусных лепестковых трансформируемых систем и эффективность их применения для построения радиотелескопов космического базирования диаметром зеркала 30 метров.

При экспериментальных исследованиях КТРТ.ОРА.3.30 произведена апробация конструкции мобильного стапеля поворотного стенда и технологий соответствующего процесса эксплуатации стендов. Данные конструкции предназначены для наземных астрономических испытаний радиотелескопов космического базирования в целях определения их радиотехнических параметров на этапе имитации условий функционирования в космосе.

Раскрытая на стенде разворачивания, КТРТ.ОРА.3.30 (рис.8.34) подъемным диском обезвешивания с сохранением "космической формы" была поднята, опущена и закреплена в чаше мобильного стапеля.

После фиксации конструкции антенны в чаше сохранение "космической формы" радиотелескопа от ветровых, гравитационных и других силовых воздействиями на этапе ее передвижения до поворотного стенда (рис.8.35), подъема на колонны и ориентации в пространстве (рис.8.36) обеспечивается жесткостью мобильного стапеля.

Что же касается облучателя, то он в земных экспериментах удерживается другими "наземными" опорами. На первом эта-



Э.В. МЕДВЕДЕВИЧУШИЦА ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

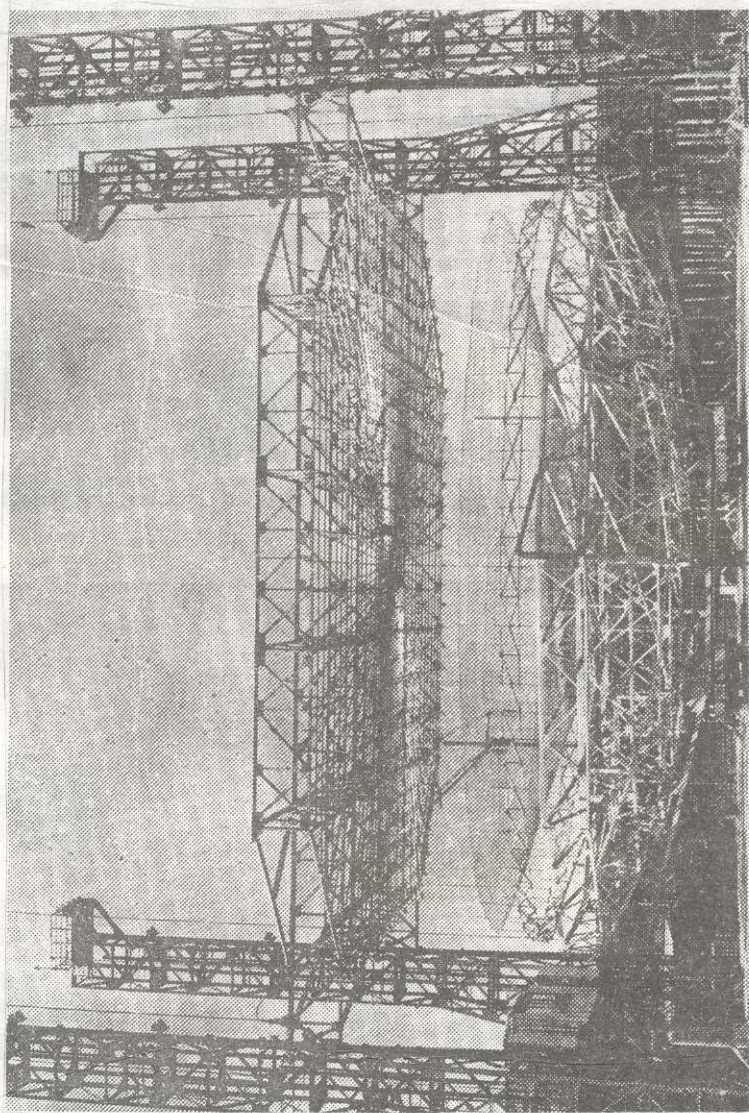


рис. 8.34

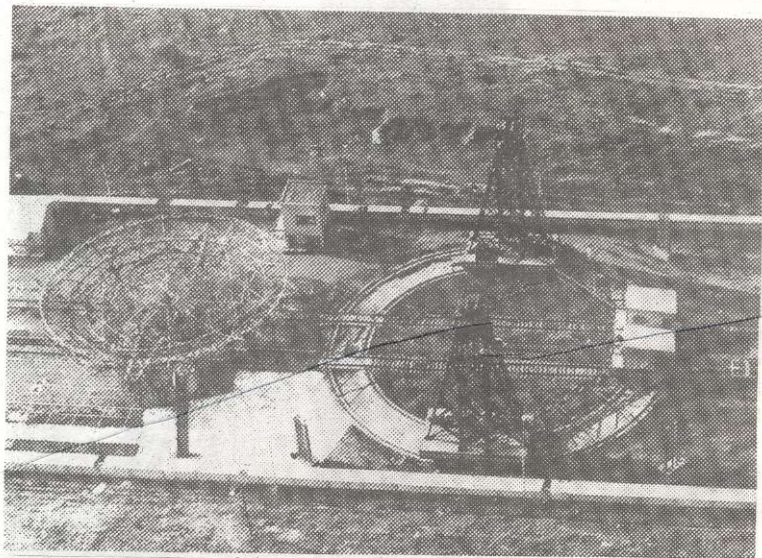


рис. 8.35

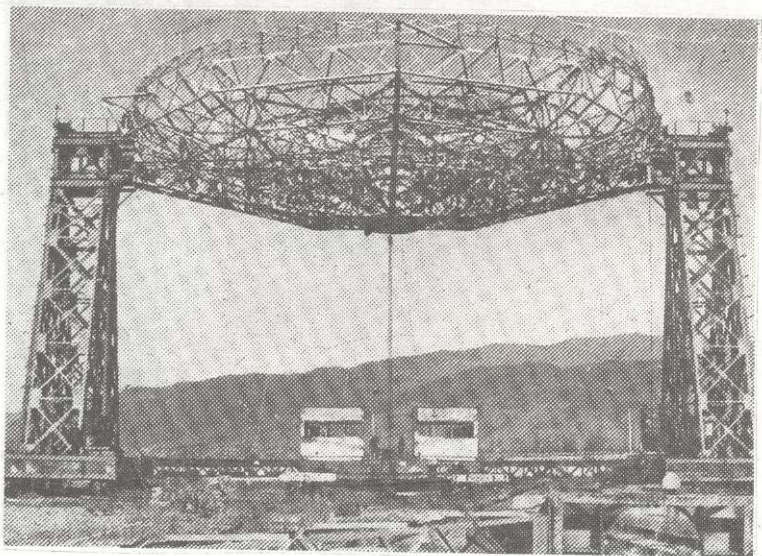
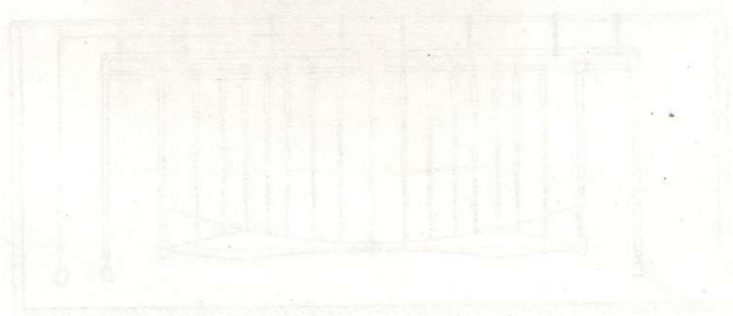


рис. 8.36

Э. В. МЕДЗМАРИШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

пе необходимо было, чтобы структура и строение опор максимально соответствовали бы космическому варианту. Но это вызвало определенные разрушения, после чего были спроектированы и построены универсальные мощные опоры, готовые в полноповоротном режиме работы устройства обслуживать антенны разной конструкции.

Существование налаженной методики, особенности конструкций и апробированная технология процесса испытаний больших космических антенн в наземных условиях резко поднимают степень готовности создания точных космических радиотелескопов с большими размерами.



## 4

### Экспериментальные исследования базового варианта трансформируемого космического кольцевого лепесткового радиотелескопа диаметром зеркала 30 м КТРТ.ОРА.Б.М.30

Программу экспериментальных исследований КТРТ.ОРА.Б.М.30, в целях достижения максимальной надежности построения космической системы, составили:

- Технология изготовления и сборки конструкции;
- Технологическое, аппаратурное и математическое обеспечение монтажа изделия и его испытания;
- Имитация невесомости, температурных и динамических воздействий;
- Определение усилий натяжения лепестков, жесткости силового кольца, усилий натяжения сетеполотна и его распределение;
- Измерение геометрий зеркала антенны и возможность ее регулирования;
- Исследование динамических параметров, распределение усилий в элементах силового кольца и в тяговых тросах при разворачивании системы;
- Этапы формообразования в процессе трансформации.

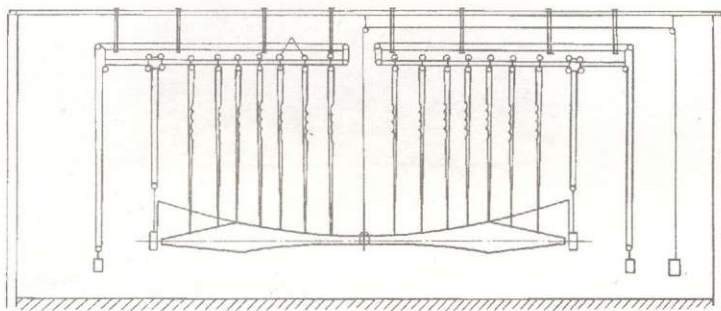


рис. 8.37

Силовое кольцо, как часть антенны, обладающее самой большой массой, было подвешено к малоинерционной блочно-тросовой системе, состоящей из комбинаций подвижных и неподвижных блоков и противовесов (рис.8.37). Центр антенны также обезвешен за счет противовеса, выведенного за пределы габаритов антенны. Обезвешивание лепестков произведено по дифференциальной схеме с помощью упругих калиброванных подвесок, обеспечивающих сохранение напряженно-деформируемой картины лепестков практически без изменения при ее перемещении в ожидаемых пределах от проектных отметок.

Растяжение лепестков является исходным условием работоспособности конструкции, поэтому достижение заданной силы натяжения лепестка из кольца, которое в КТРТ.ОРА.Б.М.30 намечалось в пределах 350 Н является т.н. контрольным параметром мощности кольца.

Для определения натяжения лепестков длина каждой пружины была предварительно измерена в свободном состоянии и откалибрована в отношении изменения длины. После окончательной сборки антенны и ее раскрытия была измерена степень деформации пружины в каждом из 48 узлов и по ней определено усилие натяжения. Средняя величина натяжения равна 337,7 Н. Среднеквадратичное отклонение усилий от средней величины составило 5,5%.

Ввиду того, что раскрытие кольца осуществляется с помощью трособлочной системы, интерес представляет значение величин потерь усилий на трение в блоках. С целью исследования этого вопроса был проделан следующий эксперимент.

В верхнем узле одной из секций был закреплен динамометр. К динамометру прикреплен конец раскрывающего троса, который последовательно проходил через 5 пар блоков, таким образом охватывая 5 секций силового кольца.

По результатам эксперимента построен график зависимости усилий от количества огибаемых блоков (рис.8.38). Из этих результатов видно, что потери усилий в тросах зависят не только от числа огибаемых блоков, но также и от величины действующих сил.

При нагрузке в 100 Н усилие в последней, пятой ветви, уменьшается вдвое.

При нагрузке 50 Н усилие в той же ветви уменьшается только до 0,68 Н.

В процессе раскрытия, когда шкивы вращаются под воздействием наматывающегося троса, потери усилий оказались на 10–15 % меньше.

Как уже отмечалось, для образования заданной геометрии

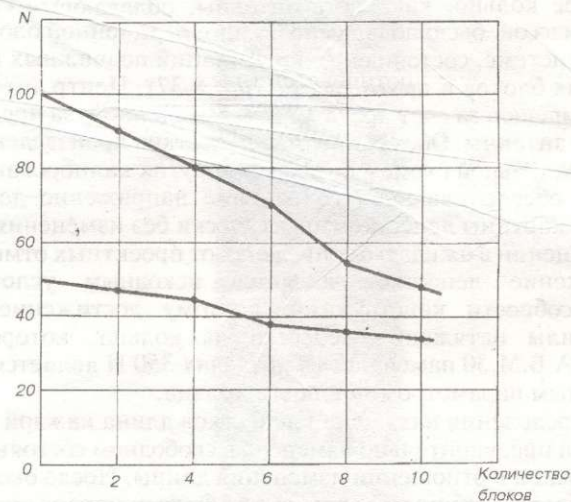


рис. 8.38

поверхности зеркала антенны и ее поддержания решающее значение имеет жесткость конструкции антенны. В конструкции кольцевых систем основным несущим элементом является раскрываемое силовое кольцо, которое поддерживает всю формообразующую лепестковую систему антенны. Поэтому, в процессе экспериментальных исследований отдельных элементов конструкции как КТРТ.ОРА.3.30, так и КТРТ.ОРА.Б.М.30, была изучена жесткость силового кольца в своей плоскости. Для КТРТ.ОРА.3.30 испытания были проведены при трех вариантах: первое – силовое кольцо без вантово-стержневой системы зеркала антенны; второе – силовое кольцо, также без вантово-стержневой системы зеркала, но с тросовыми затяжками по хордам (см. рис.8.4); хорда соединяет каждый четвертый узел; усилие натяжения хорды – 70 Н; и третье – силовое кольцо совместно с вантово-стержневой системой зеркала и отражательным сетеполотном, т.е. антенной в сборе, но без опор облучателя.

Были измерены как перемещения точек силового кольца под непосредственным воздействием силы, так и фактические отклонения ненагруженного кольца от идеального круга. Максимальная прикладываемая сила составила 340 Н.

Эксперименты для исследования жесткости кольца КТРТ.ОРА.Б.М.30 с центром в виде лепестков проводились

Э.В. МЕДВЕДЕВИЧУШИ И ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

для 3-х случаев:

1) Пружины натягивают лепестки. Среднее усилие натяжения составляет 337,7 Н.

2) Натяжные пружины полностью сняты посредством заворачивания гайки на штоке, при этом усилие натяжения лепестков равно нулю.

3) Промежуточные этапы натяжения пружины от нуля до максимальных сил.

По концам диаметральных точек прикладывалось сжимающие или растягивающее кольцо силы ступенями 170 Н и 340 Н.

Наименьшая жесткость и наибольшие перемещения, как и следовало ожидать, наблюдаются в случае, когда усилие натяжения лепестков равно нулю. При действии силы  $P = 340$  Н от центра наружу, максимальные перемещения кольца составили 38,5 мм. Причем отмечается нелинейная зависимость перемещений. Фактически кольцо деформируется почти полностью при первой ступени нагружения. Дальнейший рост силы  $P$  вызывает лишь незначительный рост перемещений.

При действии силы  $P$ , направленной к центру, перемещение кольца вовнутрь в точках приложения силы равно 131 мм, т.е. в 3,5 раза больше, чем при направлении силы наружу.

При испытании кольца с центром из лепестков, натянутых каждый с силой в среднем 33,7 Н, максимальное перемещение в точке приложения силы равно 21,5 мм при сжатии кольца и 15 мм – при растяжении кольца.

При ограничении хода натягивающих пружин, путем заворачивания гаек на штоке на 10 мм, максимальные перемещения составили 7,5 мм при растяжении кольца и 21,5 мм – при сжатии кольца.

Работы по определению координат проводились в процессе сборки и юстировки с целью доведения формы радиотелескопа до теоретической. Условия проведения этих работ определялись стендом прецизионной сборки, на котором находился объект.

Было проведено несколько циклов определения формы объекта. Первый цикл – до натяжения на объект отражающей сетки, второй и третий – после натяжения сетки, четвертый – после многократного раскрытия антенны, пятый и шестой – в процессе юстировки поверхности.

Материал измерений обрабатывался на ЭВМ по специально разработанной программе.

Систематизация большого объема результатов, достижения точности экрана характеризует два основных момента:

1. Проблемы по выкройке частей сетки в целях достижения симметрично растянутой гладкой поверхности экрана, равномерно натягивающей контур и элементы каркаса зеркала.

2. Проблема по исключению воздействия изменения формы кольца на каркас зеркала. Однако надо отметить, что технологический процесс изготовления кольца практически исключает эту проблему.

Трудности возникают после натяжения сетеполотна. Испытания подтвердили правильность конструктивного решения жесткого обрамляющего контура и компенсирующих перемещений узлов взаимосвязи кольца с лепестками, при реализации которых вторая проблема практически снимается, а первая проблема распространяется лишь на центр.

Все остальные моменты технологических процессов сборки и регулирования геометрии, узлы и элементы и сама конструкция при всестороннем испытании соответствовала требованиям достижения и сохранения точной формы как при построении системы, так и после ее многократной трансформации.

Первоначально, при натяжении сетеполотна, изгибающая стойку сосредоточения сила, приложенная на его вершинах по направлению центра, в среднем составила  $40 \div 50$  Н. На этом этапе картина перемещений точек сетеполотна в радиальном направлении была исследована экспериментально. Большие перемещения и силовые факторы, которые для сеток экранов космических радиотелескопов должны быть минимальными, вызвали необходимость изменения технологии изготовления экрана для устранения дефектов. Дефектом является также как несимметричность и неравномерность реакции на каркас, так и наличие ненатянутых и вспоруженных локальных зон среди гладко и сильно перетиснутых участков.

Возникшие трудности по отношению к экрану по всему процессу экспериментальных исследований повысили актуальность теоретических и конструкторских исследований, предназначенных для разработки математических моделей, технологии и оптимальных форм создания единого экрана, гарантирующих при малых усилиях натяжения симметричность напряженно-деформированной картины и гладкость поверхности.

Для достижения более точных поверхностей на втором этапе испытаний сетка заново была перетянута, и сила на вершине направляющих была уменьшена в среднем до 21 Н.

Несмотря на то, что несимметричность сетеполотна оставалась в силе, геометрические параметры при ослаблении натяжения сетки улучшились на порядок.

Э.В. МЕДЗ.ЦАРЯШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



Расценивая эту обстановку, надо отметить, что экран, изготовленный по разработанным принципам потребовал бы максимум его растяжения по обрамляющему кольцу интенсивностью до 7 Н на погонный метр периметра.

Оценивая проблему экрана, экспериментальные исследования подтвердили первостепенное значение сетеполотна в космических конструкциях как одного из факторов силового воздействия и достижения точности зеркала. Поэтому все теоретические предпосылки по созданию на орбитах сверхлегких больших и точных радиотелескопов, опираясь на аргумент отсутствия веса и климатометеорологических воздействий, без учета ощутимого фактора сетеполотна, не имеют практическую основу. К этому надо добавить и то, что значительное натяжение сетеполотна наряду с отрицательными моментами, имеет и положительные стороны – оно является определенным демпфером для погашения колебаний частей конструкции, что для космоса весьма актуально.

Конструкция антенны является системой космического базирования, формообразование которой на орбите достигается разворачиванием транспортного пакета. Несмотря на предварительную регулировку поверхности, принципиальным вопросом является сохранение геометрии, т.е. соответствие форм до сложения пакета и после трансформации конструкции.

Испытания подтвердили способность КТРТ.ОРА.Б.И.30 удовлетворять вышеуказанным весьма жестким требованиям. Максимальное искажение геометрических параметров экрана между двумя разворачиваниями составило 3 мм. Что же касается начальной точности профиля, т.е. на этапе предпоследнего разворачивания, здесь отклонения достигают 1÷1,5 мм.

Экспериментальные наземные исследования динамических параметров конструкции космического базирования носят условный характер. Несмотря на определенные пути, практически, особенно для больших изделий, не удаётся освободить динамику системы от земных воздействий. Поэтому для крупногабаритных конструкций подобные испытания, в отличие от других задач, значительно отличаются от теоретических моделей процессов и служат для получения общих принципиальных картин динамики поведения конструкции.

В состав исследований динамических характеристик антенны входили отдельные деформации, формы, амплитуды, периоды, частоты и затухания как систем центра, кольца, опоры и сетеполотна, так и отдельных элементов.

Испытания проводились до и после закрепления на антенне отражательного сетеполотна с целью установления влияния

сетеполотна на динамические характеристики центра.

Исследование динамических характеристик антенны проводилось на трех стадиях сборки антенны, а именно:

- 1) для антенны с шарнирно-закрепленными на центральном барабане лепестками без сетеполотна;
- 2) то же, после закрепления сетеполотна;
- 3) для антенны с сетеполотном после жесткого закрепления лепестков на центральном барабане.

В процессе измерений при сравнительно высоких величинах начального прогиба центра на осциллограммах достаточно четко прослеживались 2 тона колебаний. Это объясняется, в основном, присутствием двух разных систем в одной экспериментальной установке в виде самой конструкции антенны и структуры обезвешивания. Однако вывод однозначного заключения в этом направлении и четкое разграничение характерных компонентов по видам конструкции без учета их взаимодействий, без продолжения исследований не может быть принят за основу.

Для антенны с сеткой и шарнирным закреплением лепестков на барабане средние частоты колебаний имеют величину порядка 4,0 Гц и 0,33 Гц, а без сетки, соответственно, 2,38 Гц и 0,36 Гц.

При жестком закреплении лепестков наблюдаются частоты порядка 29,0 и 3,5 Гц.

Собственная частота крутильных колебаний центра вокруг оси антенны при усилии натяжения лепестков 330 Н составила 6,5 Гц, а при ненатянутых лепестках (когда  $N = 0$ ) – 0,87 Гц.

Были проведены исследования распределения напряжений и усилий в элементах конструкций, возникающих во время раскрытия антенны и закономерностей их изменения во времени.

В процессе испытаний замерялись напряжения в сечениях конструктивных элементов антенны – рычагов и “ломающихся” стержней. Одновременно с этим измерялись усилия в раскрывающих тросах и усилия натяжения сетеполотна по контуру.

Кроме того, в процессе испытаний антенны измерялись скорость раскрытия кольца, для чего был сконструирован и изготовлен специальный электронный счетчик перемещения.

График изменения параметров кольца при разворачивании по отношению ко времени дается на рис.8.39.

Как видно из рисунка, повторяемость графиков достаточно хорошая. Время полного раскрытия кольца без опор облучателя составляет в среднем около 40 сек. Отсчеты по тензорезисто-

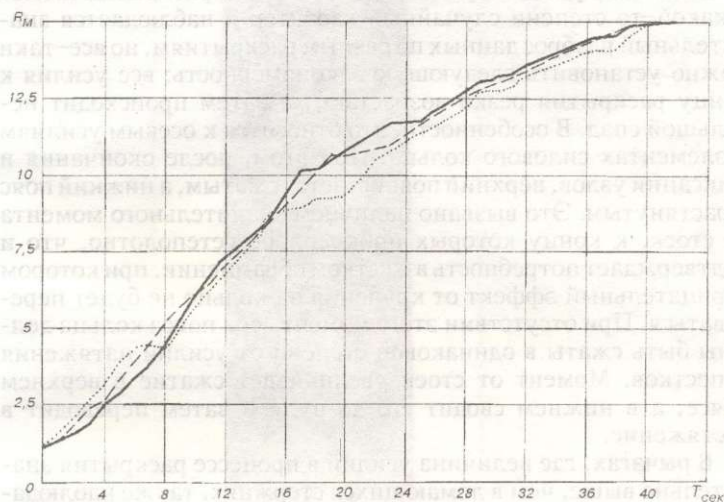


рис. 8.39

рам в процессе раскрытия брались в среднем с интервалом 2,5 сек.

Анализ распределения напряжений в сечениях показывает, что наибольшие величины наблюдаются в процессе раскрытия в рычагах пантографических элементов, где они держатся в среднем на уровне  $2500 \div 5000 \text{ Н/см}^2$ , достигая при отдельных раскрытиях  $10000 \div 12000 \text{ Н/см}^2$ . В ломающихся стержнях напряжения имеют более низкий уровень – порядка  $400 \div 800 \text{ Н/см}^2$ , но в некоторых случаях достигают  $1400 \div 1600 \text{ Н/см}^2$ . На основании замеренных напряжений в измерительных сечениях элементов были вычислены действующие в них продольные усилия  $N$ , изгибающие моменты  $M_x$  и  $M_y$  и крутящий момент  $M_{кр}$ . Усилия определялись путем решения для каждого цикла измерений в каждом сечении системы из 4-х уравнений нормального напряжения при сложном сопротивлении тонкостенных брусьев.

Отклонение экстремальных усилий от теоретических величин объяснено тем, что при изготовлении элементов кольца не были строго выдержаны размеры сечений, и фактическое положение центра тяжести сечения несколько отличалось от расчетного. Появление изгибающего момента при испытании на осевое усилие объясняются эксцентриситетом между центрами

тяжести сечений рычага и линией приложения силы.

Величины усилий при каждом отдельном раскрытии имеют в какой-то степени случайный характер и наблюдается значительный разброс данных по разным раскрытиям, но все-таки можно установить следующую закономерность: все усилия к концу раскрытия резко возрастают, а затем происходит небольшой спад. В особенности, это относится к осевым усилиям в элементах силового кольца. При этом, после окончания и фиксации узлов, верхний пояс остается сжатым, а нижний пояс — растянутым. Это вызвано наличием значительного момента от стоек, к концу которых прикреплено сетеполотно, что и подтверждает потребность в жестком обрамлении, при котором отрицательный эффект от кручения на кольцо не будет передаваться. При отсутствии этого момента оба пояса кольца должны быть сжаты в одинаковой степени от усилий натяжения лепестков. Момент от стоек увеличивает сжатие в верхнем поясе, а в нижнем сводит его до нуля и затем переводит в растяжение.

В рычагах, где величина усилий в процессе раскрытия значительно выше, чем в ломающихся стержнях, также наблюдается к концу раскрытия значительный рост, а затем — спад усилий.

Усилия в натяжных тросах меняются рывками. Причем наблюдается следующая тенденция: в начале раскрытия усилие большое, затем оно снижается и, в конце раскрытия, когда узлы зафиксированы, резко возрастает, достигая в некоторых случаях предела прочности троса, если двигатели не отключаются вовремя.

Начальное усилие раскрывающего троса в изделии КТРТ.ОРА.Б.М.30, где применялось 16 двигателей, достигало 700 Н, в то время как в экспериментальном образце, при весьма двигателях, оно достигало 1500+1600 Н, что в общем-то закономерно. Вместе с этим усилие в тросах по периметру кольца распределяется неравномерно. Некоторые двигатели перегружаются в большей степени, некоторые в меньшей. Разница в усилиях может достигать 200 и 300%.

Отмеченная картина служила основой для разработки, создания, испытания и устройстве на КТРТ.ОРА.Б.М.30 электронной автоматической системы управления двигателями кольца. Такая система практически уравнивает и симметризирует весь процесс разворачивания антенны по системе "полиспаст" и повышает надежность трансформации.

Усилия натяжения сетеполотна в процессе раскрытия также имеют неравномерный характер и протекают рывками, вы-



рис. 8.40

зывая довольно большие моменты в кольце, о чем уже было сказано выше.

Особый интерес в испытаниях занимает степень достижения плотно сложенного жесткого транспортного пакета конструкции, стабильный процесс трансформации и надежная фиксация функциональной формы изделия, являющегося основной чертой строения структуры. В целях определения оптимальных способов монтажа и сборки элементов и узлов были исследованы также технологические процессы.

В отличие от предыдущих вариантов, кольцо собиралось не последовательным наращиванием секций, а способом укрупненной сборки. Каждый укрупненный блок оснащался тросо-лебедочной системой и электродвижками. Был сконструирован новый механизм складывания пакета (рис.8.40), который обеспечил плотность сложенного изделия.

Изготовление центра из лепестков (рис.8.41), наряду со многими преимуществами, поставило вопрос о защите сетеполотна от нарезок кромками плотно намотанных лепестков в транспортном пакете изделия (рис.8.42), который практически удовлетворяет всем требованиям габаритного и весового ограничений.

Для саморегулирования геометрии центра к лепесткам добавлены периферийные стабилизаторы осей ребер в плоскости кольца. Модифицирован и центральный барабан (рис.8.43).

Особое место занял контроль геометрии лепестков (рис.8.44) и их монтаж как единого центра в обезвешенном положении (рис.8.45).

Отмеченные результаты, совместно с теоретическими исследованиями и этапами проектирования, были достигнуты и с учетом отрицательных явлений, имеющих место при испытаниях. Частично о них говорилось выше. К ним следует добавить заклинивание развертывания секции кольца за счет большого трения с направляющими стержнями.

Указанный недостаток, с одной стороны, аннулирован изменением механизма скольжения трения на механизм скольжения качения, а с другой стороны, было принято решение для освобождения стержня от изгибающего момента, то есть при-

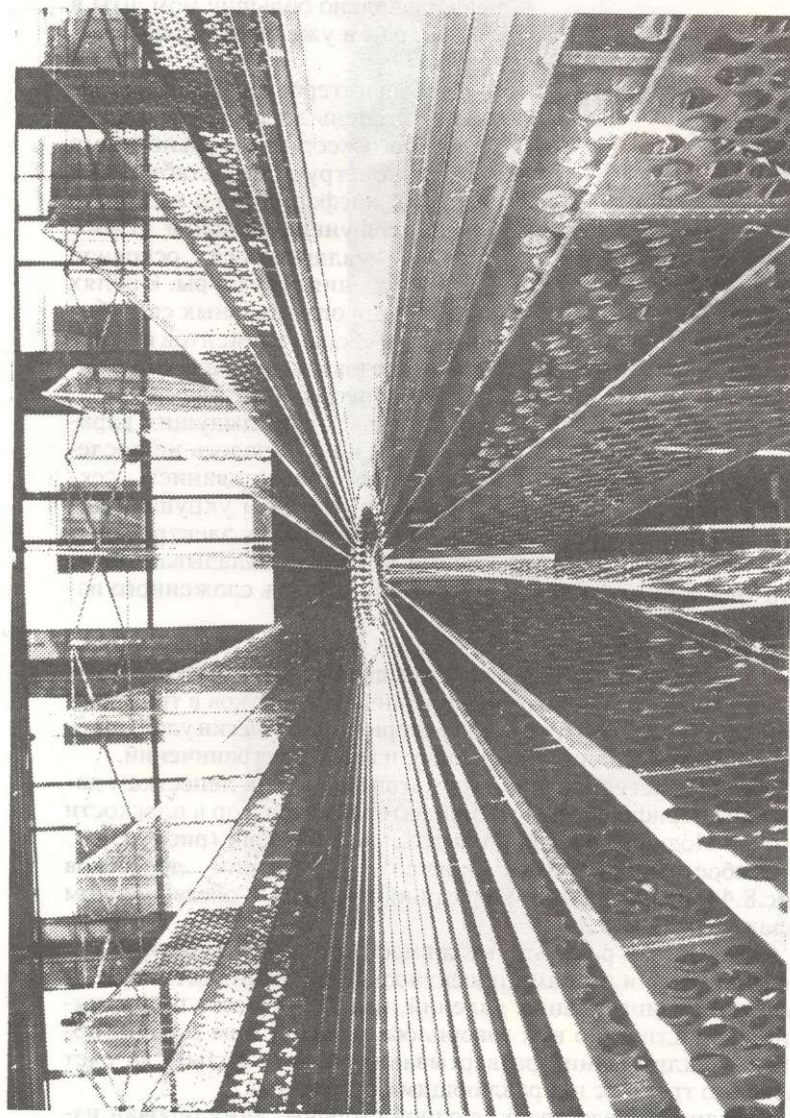


рис. 8.41

Э. В. МЕДЗМАРИАШВИЛИ ✧ ПЕРАНФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э.В. МЕДВЕДЕВА И А.В. ПЕТРОВИЧЕВЫ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

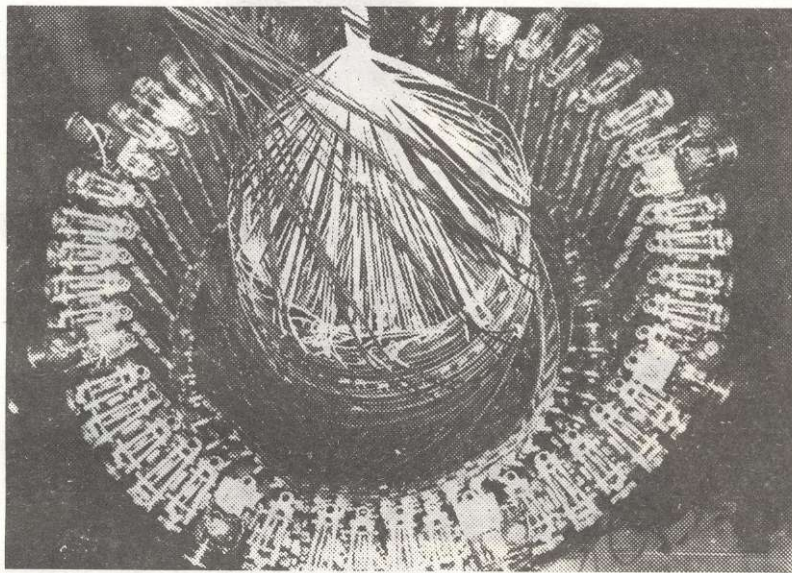


рис. 8.42

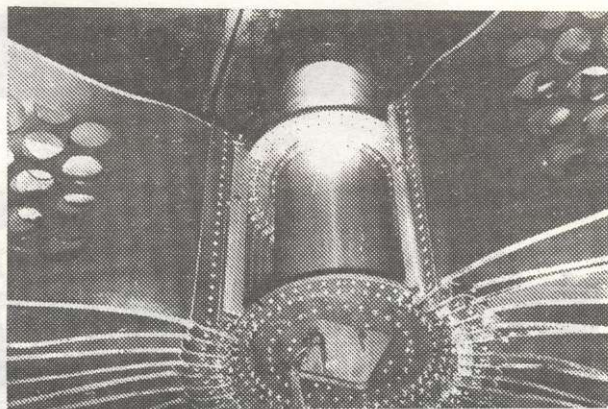


рис. 8.43

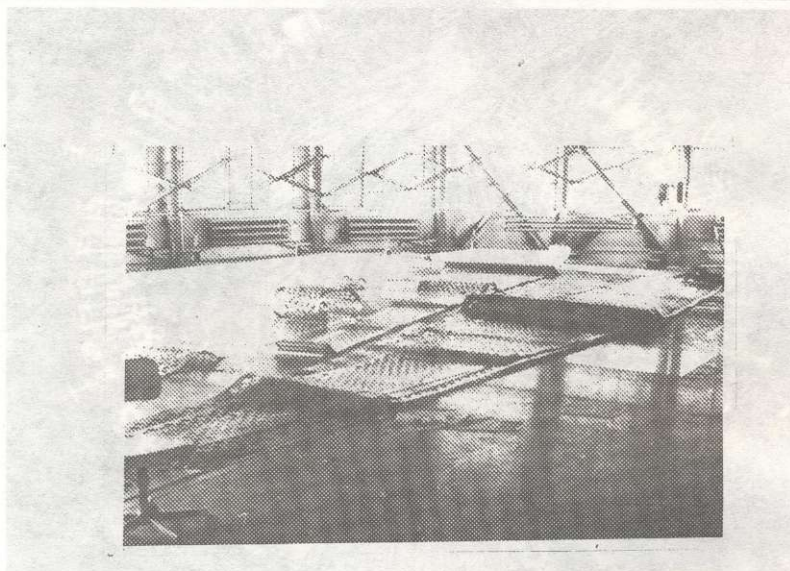


рис. 8.44

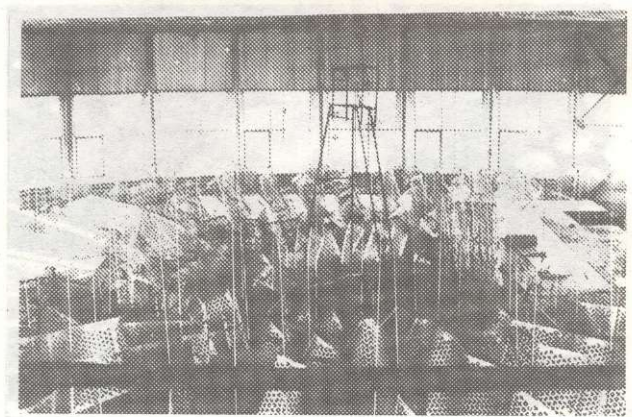


рис. 8.45

Э. В. МЕДЗМАРЦЬЯНИЦАМ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИН ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

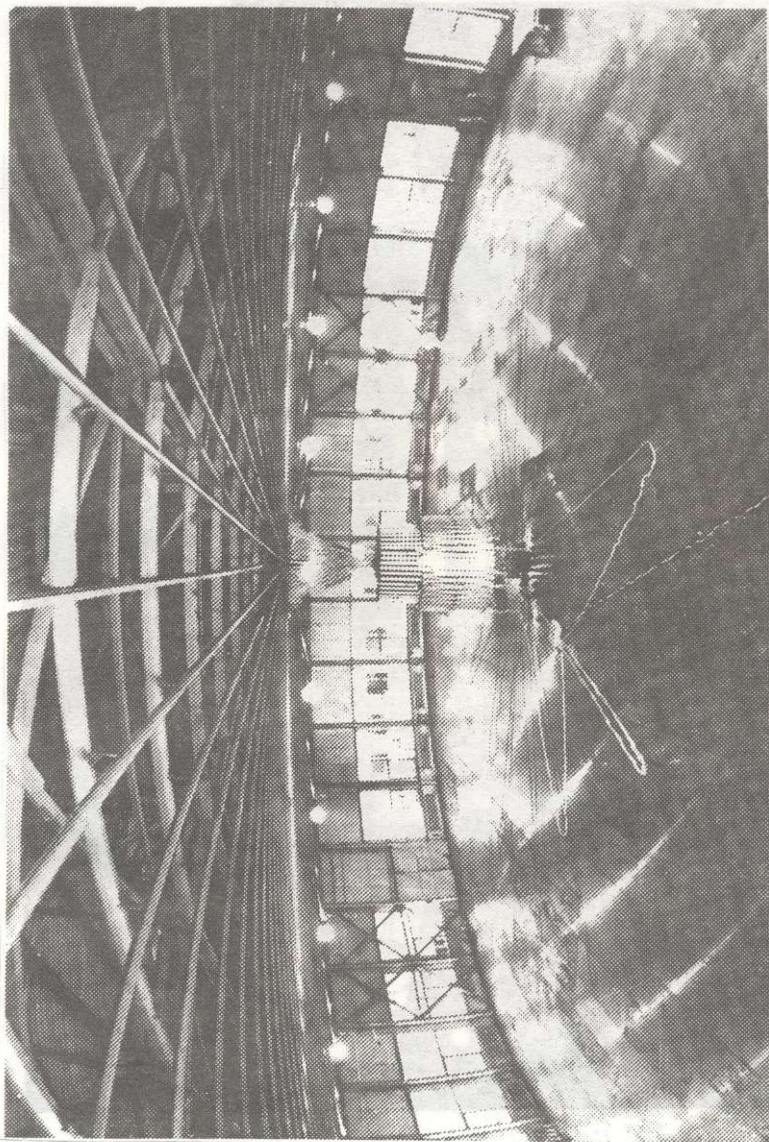


рис. 8.46

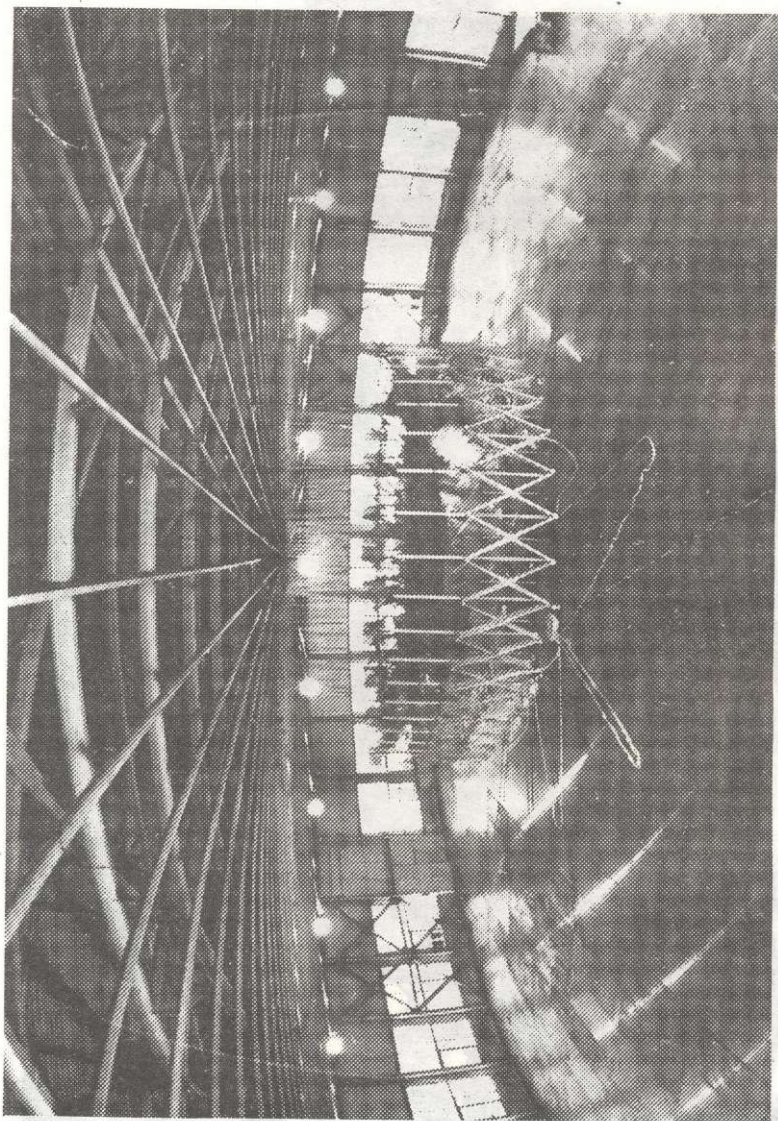


рис. 8.47

Э. В. МЕДЗМАРЬЯНИ *◆* ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

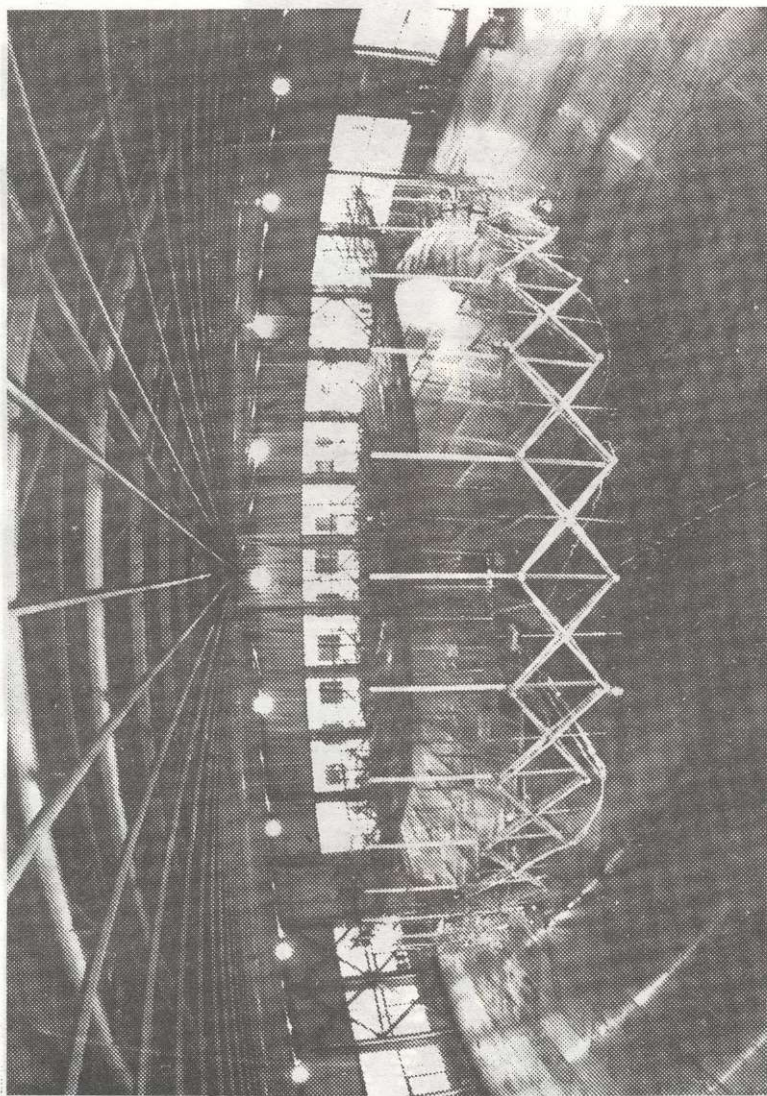


рис. 8.48

рис. 8.48

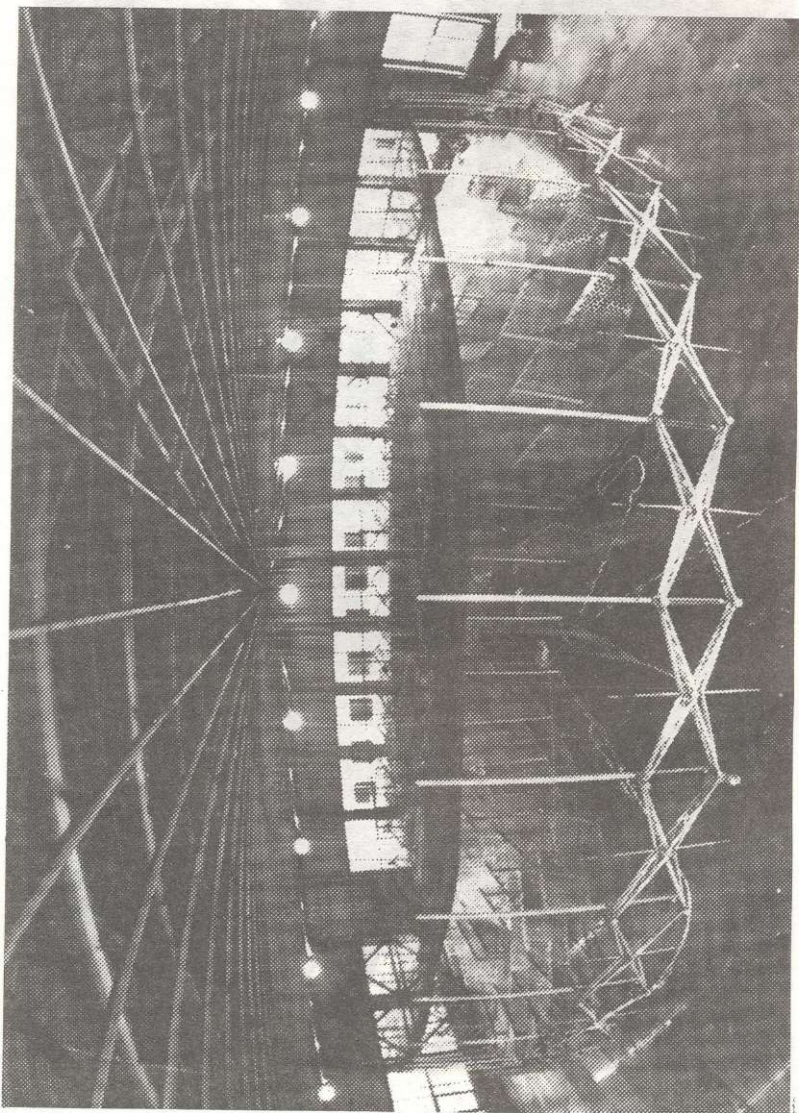


рис. 8.49

Э. В. МЕДЗ. МАРШАВИЦАИ ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИН ✧ ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

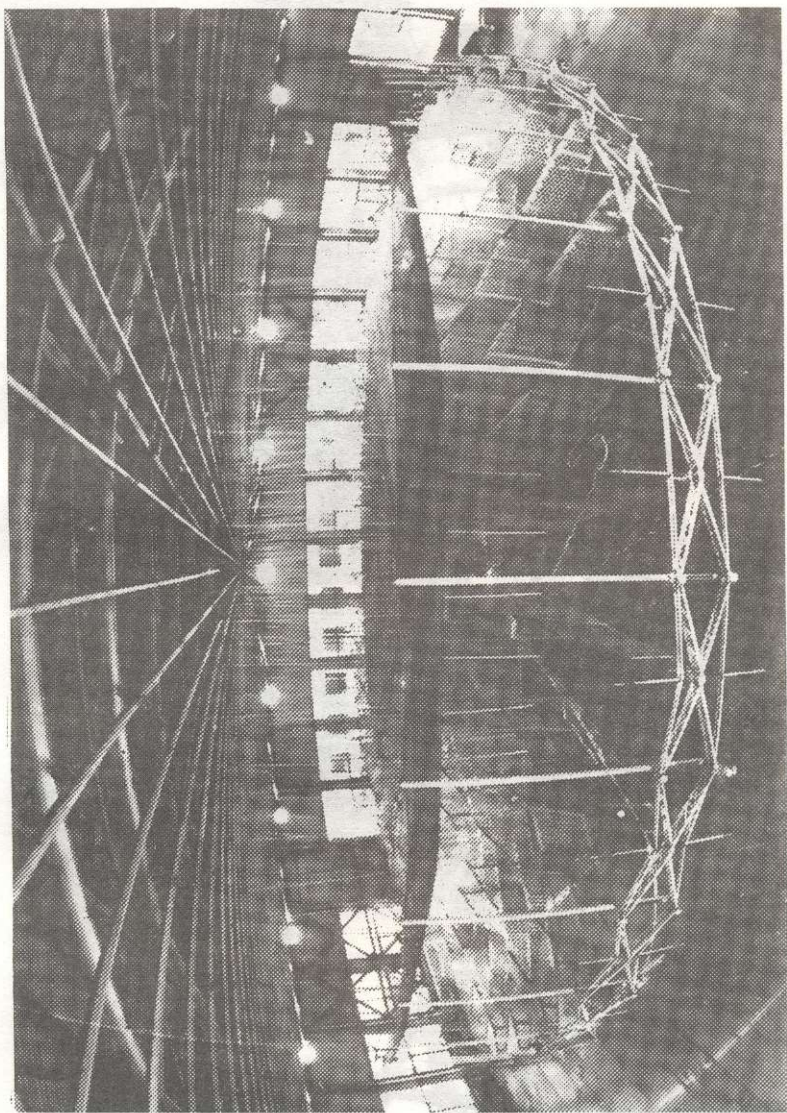


рис. 8.50

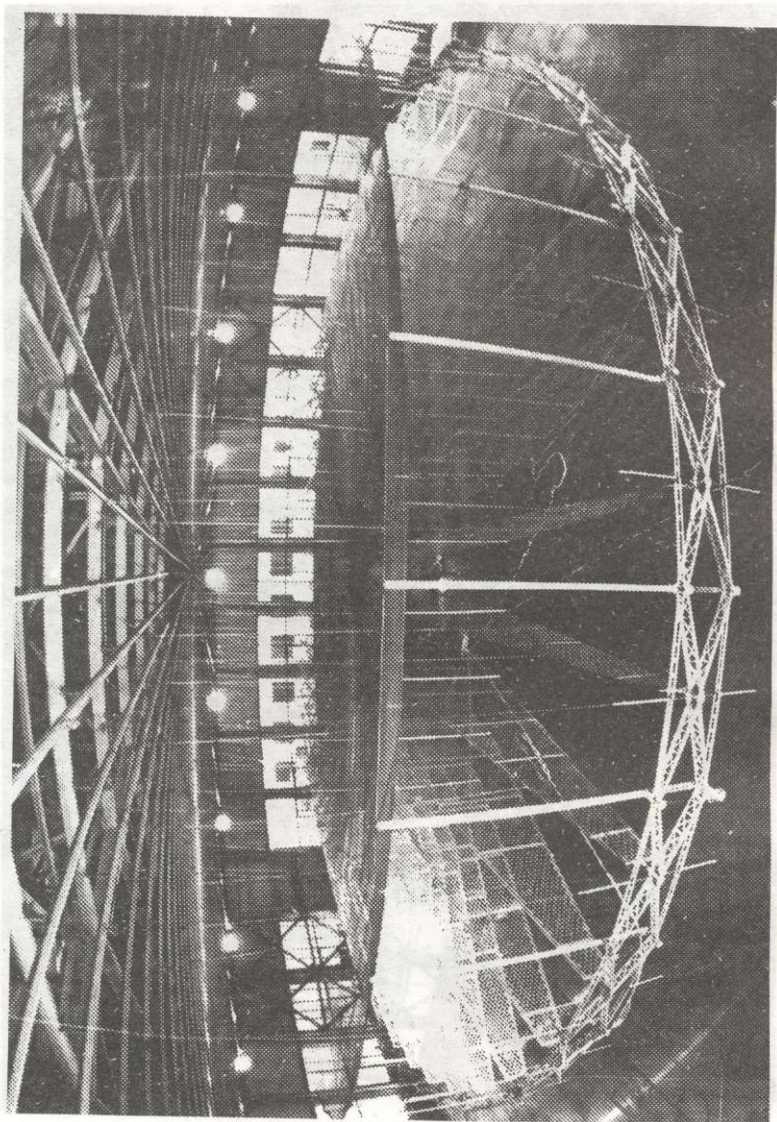


рис. 8.51

Э. В. МЕДЗМАРЦЬАНИШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

менения жесткого обрамляющего контура вместо гибкого.

Широкомасштабные экспериментальные исследования и полный цикл испытаний изделия КТРТ.ОРА.Б.М.30 подтвердили правильность построения конструкции и структуры транспортного пакета, процессов формообразования и развернутой системы в целом.

Надежность и управляемость трансформации и гарантии достижения эксплуатационной формы конструкции характеризовали этапы развертывания базового изделия космического трансформируемого радиотелескопа диаметром зеркала 30 м (рис.8.46+8.51).

С учетом теоретических исследований, проектирования, изготовления и испытания КТРТ.ОРА.Б.М.30, практически обеспечена готовность создания штатного орбитального образца космического комплекса трансформируемого радиотелескопа диаметром зеркала 30 метров.

8/4

изменяя жёсткость облучения, можно было бы исследовать влияние на характеристики антенны различных параметров облучения. В работе [1] описаны результаты исследования влияния на характеристики антенны различных параметров облучения. В работе [2] описаны результаты исследования влияния на характеристики антенны различных параметров облучения. В работе [3] описаны результаты исследования влияния на характеристики антенны различных параметров облучения.

Получены следующие результаты: при облучении антенны с помощью радиотелескопа наблюдается изменение характеристик антенны. Это изменение можно объяснить тем, что при облучении антенны происходит её нагрев, что приводит к изменению её характеристик. В результате этого изменения характеристик антенны происходит изменение её характеристик.

С целью изучения влияния на характеристики антенны различных параметров облучения, в работе [4] описаны результаты исследования влияния на характеристики антенны различных параметров облучения. В результате этого исследования было установлено, что при облучении антенны с помощью радиотелескопа наблюдается изменение характеристик антенны.

Э. В. МЕДЗМАРЦАНЯВИЧ  $\diamond$  ЛД АНФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



## 9 Перспективные космические и наземные трансформируемые системы

На разных этапах истории определенное направление науки занимает т.н. “престижное” положение.

Среди других направлений таковым является космическая техника, которая объединяет множество отраслей науки и техники самыми передовыми идеями, техническими решениями и технологическими процессами. Такая взаимность не является односторонней, так как прогресс обеспечивается во всех направлениях. Аналогичная картина соблюдается и в конкретном случае – при создании космических инженерных конструкций.

На основе проведенных работ и сформулированных принципов построения трансформируемых систем стали возможны разработки по созданию новых образцов техники космического [48], [91], [92], [98], [99], [101], [102], [103], [104], [106], [107], и наземного базирования в виде транспортабельных антенн [98], [99], раздвигаемых мостов [40], [42], [87], [88], трансформируемых строительных конструкций [49], [50], [51], [52], [53], [89], [94], [95], [109], и сельскохозяйственных систем [108].

### 1 Космические инженерные сооружения

С применением кольцевых трансформируемых систем предлагается построить каркасы как орбитальных радиотелескопов, так и других типов космических конструкций с разным функциональным назначением.

Продолжая тему космических радиотелескопов, необходимо отметить усилия специалистов в наращивании размеров зеркала и повышении его точности, поэтому независимо от применения новых эффективных конструкционных материалов, технологических процессов и вариантов конструкций,

обязательным становится регулирование поверхности.

В антеннах, диаметрами больше 25–30 метров в сантиметровом диапазоне радиоволн без регулирования геометрии экрана и ориентация облучателя, особенно с учетом трансформативности системы и ее космического базирования, достижения положительных результатов, в принципе, на базе реального уровня техники, практически невозможно.

Кольцевые трансформируемые системы по своей структуре логически соответствуют “полярно” регулируемым конструкциям, являющимся пока самыми сравнительно несложными и реализуемыми решениями. Именно с таким подходом была разработана кольцевая, лучевая–вантовая регулируемая конструкция космического радиотелескопа.

Конструктивное строение системы (рис.9.1) обуславливает большую пространственную жесткость как общей формы, так и отдельных ее частей, а в особенности вантовой и стержневой системы контура крепления экрана.

Расположение длинномерных элементов по контурам ребер воображаемых четырехугольных пирамид с обеих сторон кольца, в целях фиксации фокального контейнера и “контр-контейнера”, способствует повышению устойчивости трансформируемого силового кольца, к которому крепятся контуры “центра”, т.е. контурная сетка экрана. В параболоиде выпуклость сетки, кроме кольца, достигается стрингерами, расположенными лучеобразно и полярно с защемлениями концов в контейнере “исполнительных механизмов”, обеспечивающих управление формой экрана. Основной силовой эффект возникновения первичной параболоидной формы обеспечивается притяжением контейнера посредством “исполнительных механизмов” к “контр-контейнеру”, что сокращает энергоемкость кольца для достижения проектной формы и упрощает средства достижения мощных усилий в контурной сетке экрана.

Как показали исследования, эффективность таких решений более четко может проявиться в радиотелескопах диаметром зеркала от 50 до 80 метров. В этих размерах весовые и габаритные параметры транспортного пакета соответствуют возможностям существующих средств по доставке изделий на космические орбиты.

Разработанная конструкция по структуре соответствует требованиям регулируемых систем, хотя проблема оперативного контроля поверхности экрана в экстремальных условиях космоса и принятия оптимального решения, а также, что главное, реализации исполнительными механизмами процедуры

Э. В. МЕДЗМАРЬАНЬВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



рис. 9.1

корректировки поверхности, остается сложной метрологической, информатической и механической задачей. Готовность системы к регулированию заключается в том, что, во-первых, в пространстве схема стрингеров и контуров экрана состоит из треугольных элементов, обеспечивающих большую жесткость конструкции; во-вторых, изменение длины определенного стрингера в целях изменения координат соответствующего узла экрана практически не вызывает деформации и изменения усилий в других зонах и, в третьих, в стрингере объединены функции исполнительного механизма, несущего гибкого стержня, структуры и метрологического элемента.

В целях повышения жесткости конструкции, в соответствии с требованиями радиотелескопа и космического комплекса в целом, кольцо можно изготовить в пространственном варианте.

Регулируемые поверхности можно построить как на базе однокольцевых, так и на базе многокольцевых систем. При этом можно реализовать не только "полярную систему" управления формой, но и распределенную. Примером такого решения служит двухкольцевая вантовая, лепестковая регулируемая трансформируемая конструкция (рис.9.2).

В таких системах одно кольцо с радиально растянутыми лепестками представляет собой жесткий стапель для надстроенного кольца с вантовым или вантово-стержневым центром, являющимся каркасом контуров крепления функционального сетеполотна экрана.

На жестком стапеле под каждой связью каркаса экрана устроен исполнительный механизм регулирования длины связей, т.е. координатор контура экрана. Между кольцами устроенные связи обеспечивают эффект би-кольца, повышающего его устойчивость.

Разработанная конструкция с точки зрения автоматического, периодического регулирования поверхности в стадии эксплуатации создает большие трудности, чем первая конструкция, но для монтажных регулировок — более приемлема.

Теоретические и экспериментальные исследования подтвердили практическую реальность создания кольцевых регулируемых систем.

Что касается новых разработок на основе двухпоясных систем как регулируемых, так и нерегулируемых, особенно надо отметить большие возможности построения серии вариантов оригинальных решений. Комбинации размеров колец, структур центра на основе применения стержневых, вантовых и лепестковых элементов и разнообразие геометрии системы

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУШИ И ПЕРЕНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

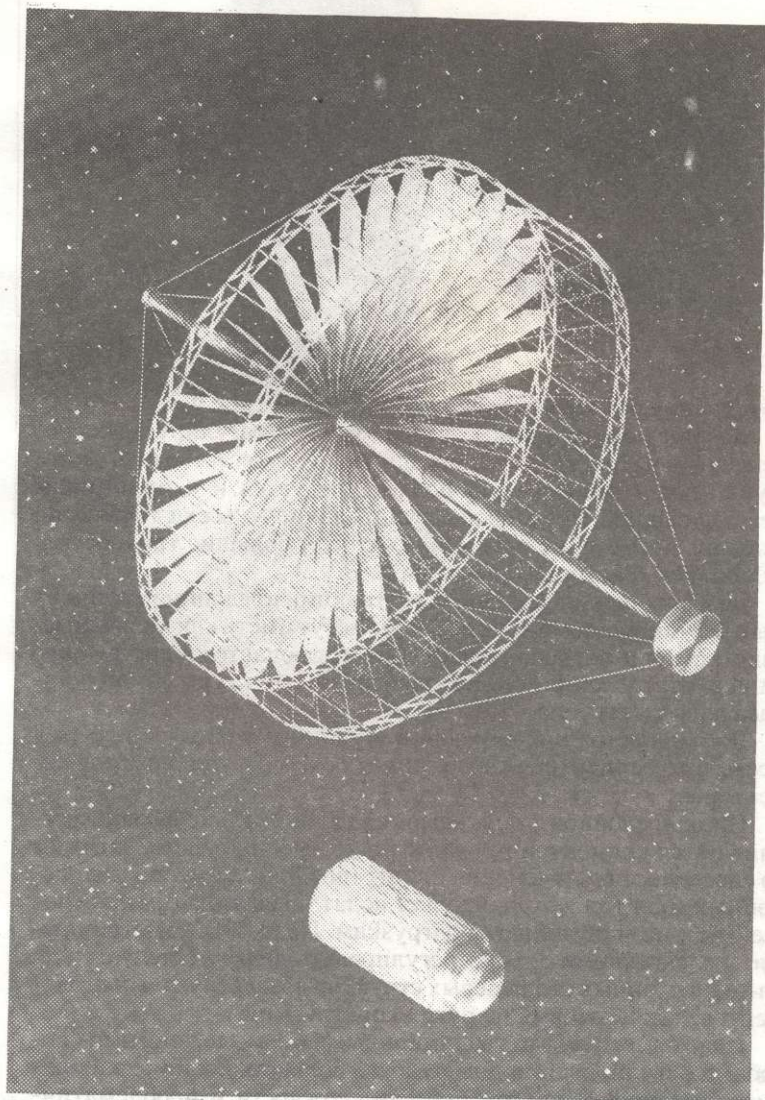


рис. 9.2

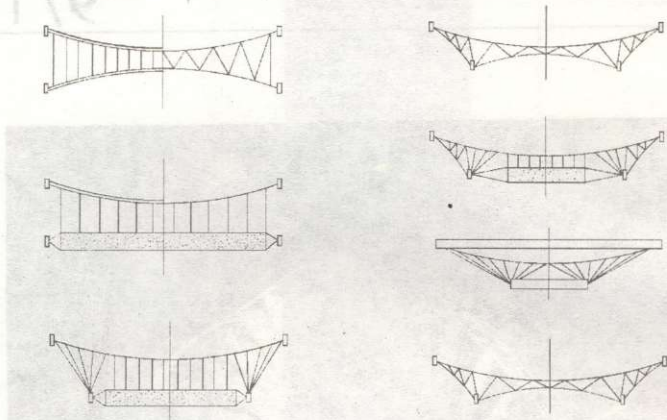


рис. 9.3

обуславливают возникновение новых схем (рис.9.3).

Вообще конструкции, создаваемые для регулируемых систем, должны по структуре органически соответствовать своим функциям. Своеобразный подход требуется и к принципам регулирования. Пузловое регулирование во всех случаях, не только в космосе, но и на земле, создает большие трудности и осложняет конструкцию изделия.

Для упрощения решения конструкции предлагаются системы с регулируемыми зонами. Зоны могут иметь как кольцевые, так и секторные расположения. Не исключается и другая картина распределения зон. Все зависит от структуры самого каркаса радиотелескопа.

Для иллюстрации отмеченных принципов рассматривается несколько вариантов разработанных схем регулируемых рефлекторов.

На однослойной стержневой оболочке кольцеобразно устраиваются концентрично расположенные контурные затяжки со способностью изменения длины (рис.9.4). Упругость однослойных оболочек обуславливает податливость формы по отношению к незначительным нагрузкам. Поэтому симметричными воздействиями можно регулировать форму оболочек как для однослойных стержневых структур из шестиугольных элементов, так и сотовых и других конструкций.

Надо отметить, что традиционными и предложенными способами регулирования поверхности больших космических радиотелескопов, с учетом степени сложности и проблематич-

Э. В. МЕДВЕДЕВА И В. И. МАРИШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

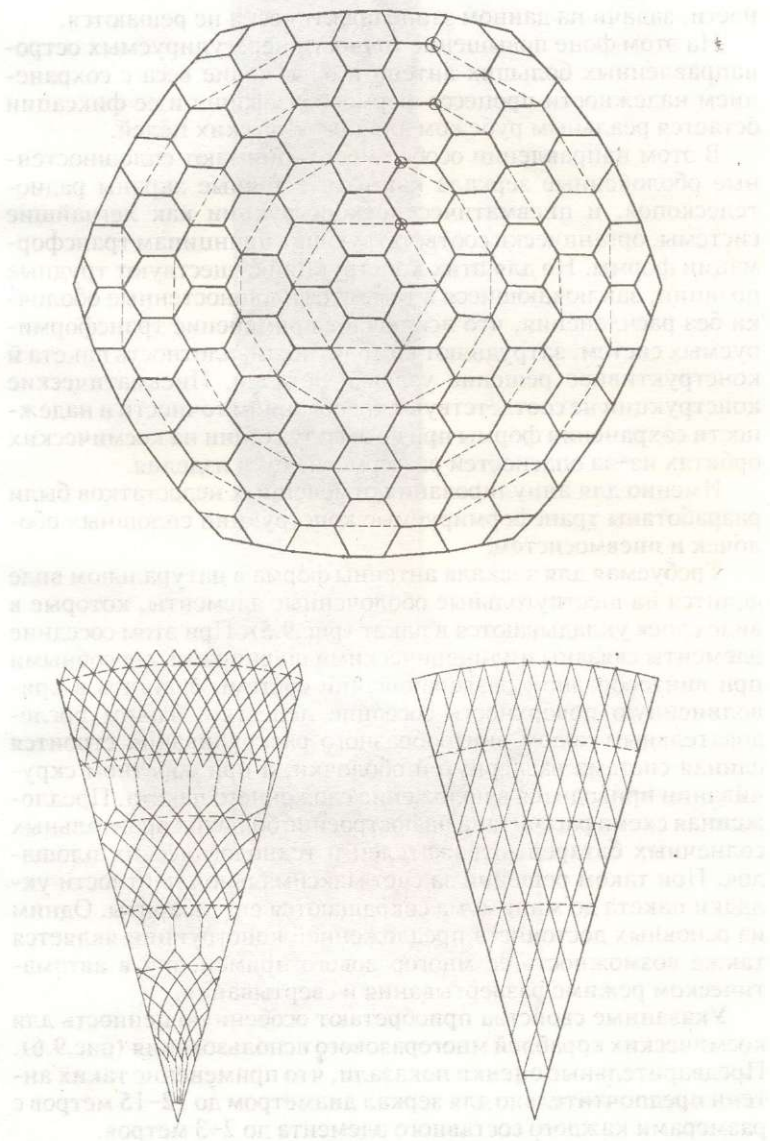


рис. 9.4

ности, задачи на данном этапе практически не решаются.

На этом фоне повышение точности нерегулируемых остро-направленных больших антенн и облегчение веса с сохранением надежности процесса формообразования и ее фиксации остается реальным рубежом для практических целей.

В этом направлении особое место занимают сплошностенные оболоченные зеркала как самые точные экраны радиотелескопов, и пневматические конструкции как легчайшие системы, органически соответствующие принципам трансформации формы. Но для этих конструкций существуют трудные позиции, заключающиеся в том, что сплошностенные оболочки без расчленения, что исключает применение трансформируемых систем, затрудняют компактность, плотность пакета и конструктивное решение узлов и деталей. Пневматические конструкции не соответствуют требованиям точности и надежности сохранения формы при ее эксплуатации на космических орбитах из-за опасностей разгерметизации изделия.

Именно для аннулирования отмеченных недостатков были разработаны трансформируемые конструкции сплошных оболочек и пневмосистем.

Требуемая для зеркала антенны форма в натуральном виде делится на шестиугольные оболоченные элементы, которые в виде слоев укладываются в пакет (рис.9.5). При этом соседние элементы связаны цилиндрическими шарнирами, способными при винтообразном разворачивании системы сдвигать в криволинейную поверхность соседние лепестки. Таким последовательным ходом винтообразного раскручивания строится единая система развернутой оболочки, а при обратном скручивании приводится в положение сложенного пакета. Предложенная схема рассчитана на построение больших орбитальных солнечных батарей, отражателей и технологических площадок. При таком решении за счет максимальной плотности укладки пакета до минимума сокращаются его габариты. Одним из основных достоинств предложенной конструкции является также возможность ее многократного применения в автоматическом режиме разворачивания и свертывания.

Указанные свойства приобретают особенную ценность для космических кораблей многообразного использования (рис.9.6). Предварительные оценки показали, что применение таких антенн предпочтительно для зеркал диаметром до 12–15 метров с размерами каждого составного элемента до 2–3 метров.

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана пневможесткая трансформируемая комбинированная циклическая купольная конструкция (рис.9.7).



Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУК ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

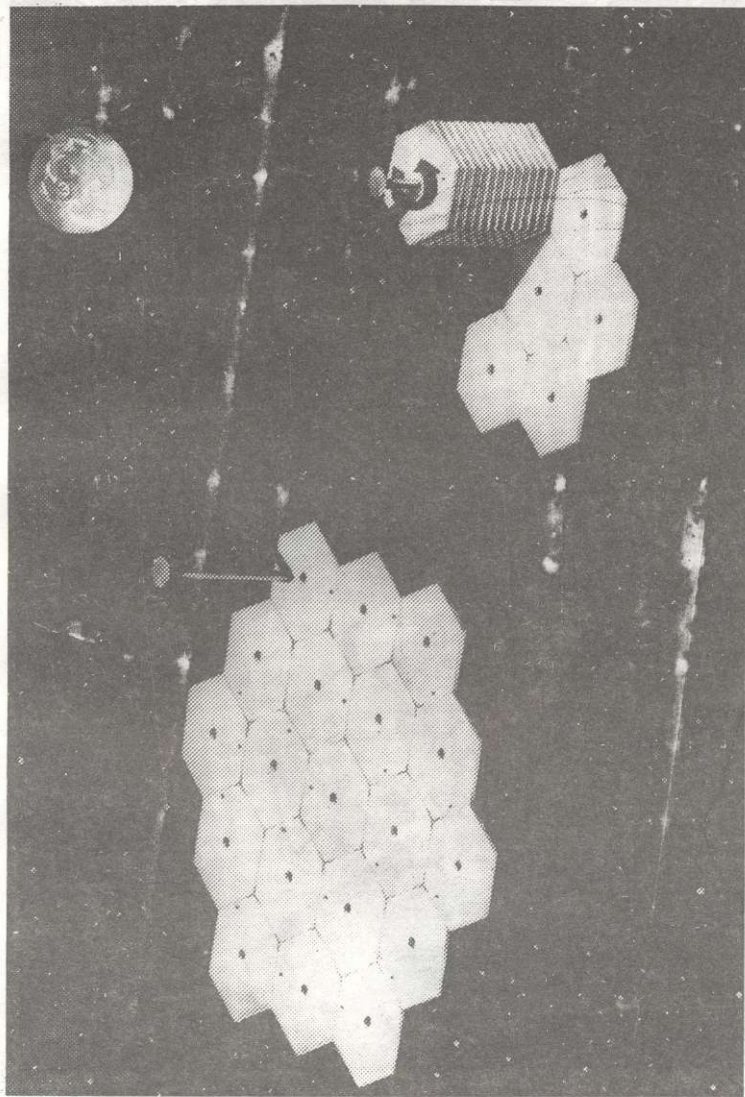


рис. 9.5

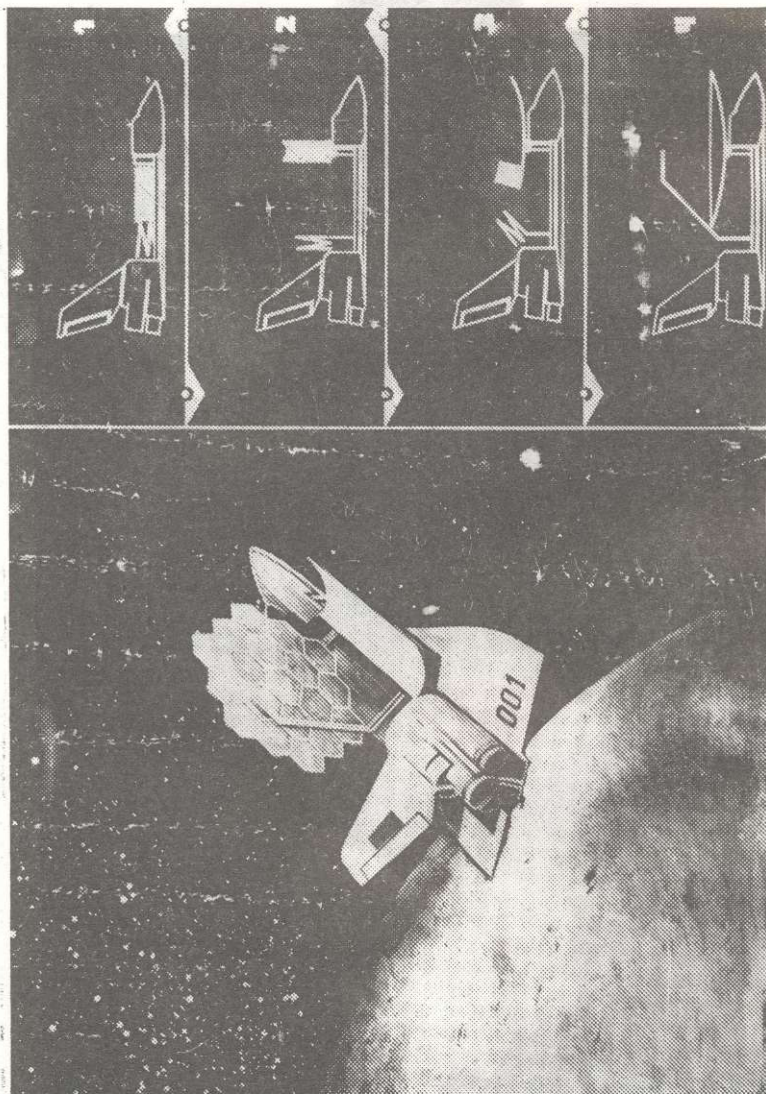


рис. 9.6

Э. В. МЕДЗМАРЬЯНИЦКИМ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

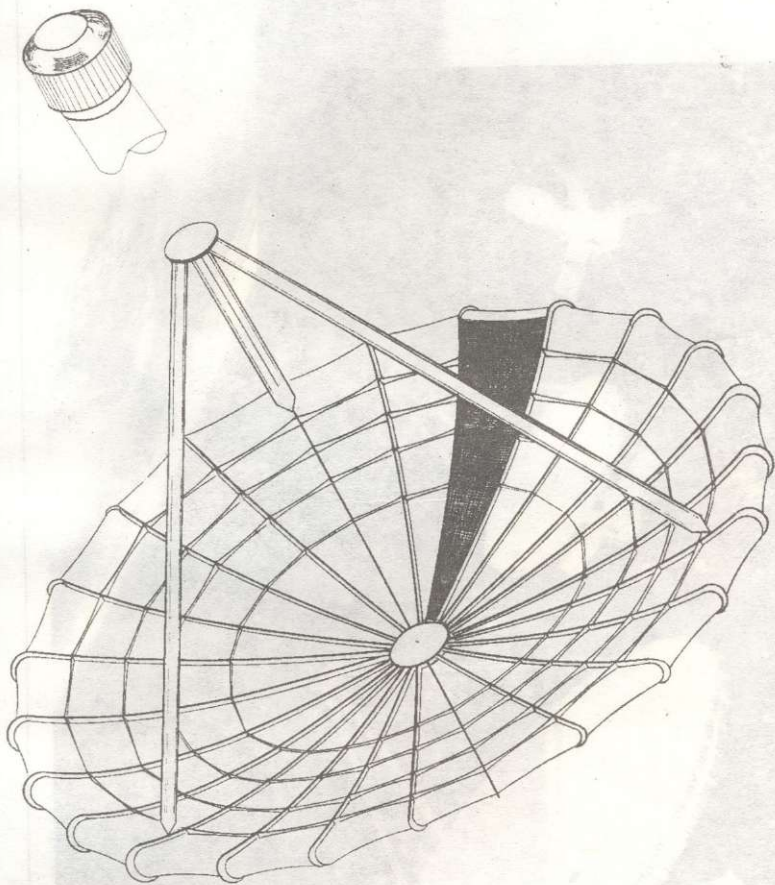


рис. 9.7

Созданная система при модификациях как купольной конструкции, так и плоско-дисковой формы, дает возможность ее применения в решениях покрытий зданий и сооружений, наземных перебазируемых остронаправленных антенн, космических технологических площадок, солнечных батарей и концентраторов. Максимальная эффективность при этом обеспечивается в больших радиотелескопах космического бази-

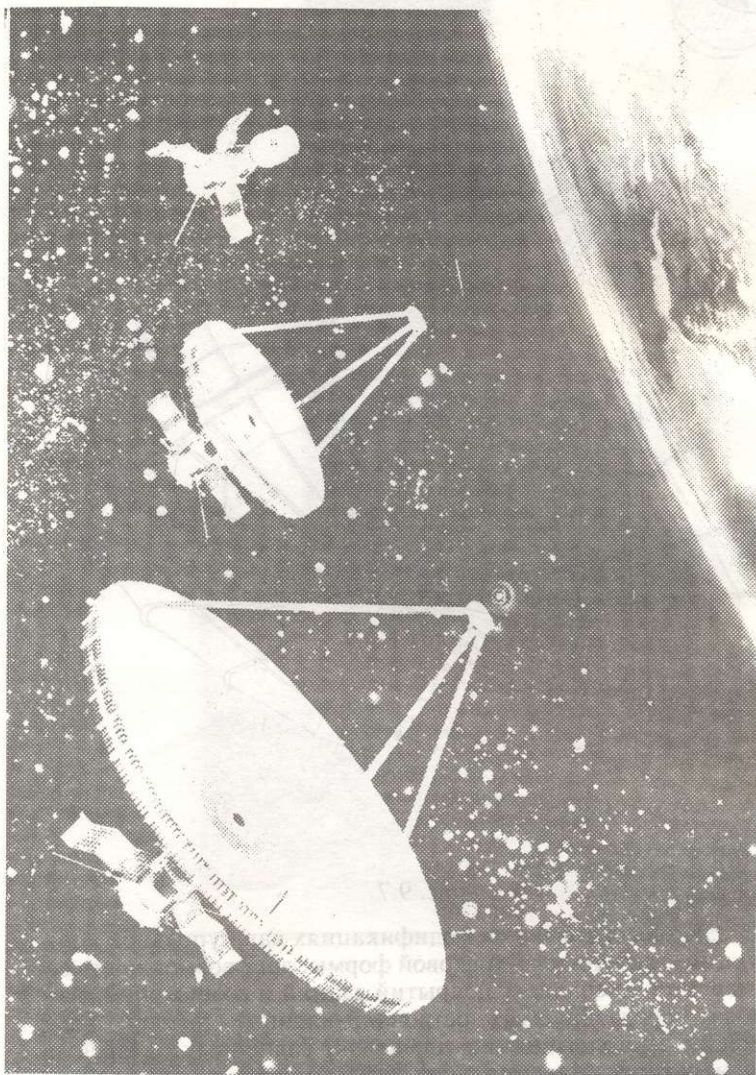


рис. 9.8

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ *◆* ПЕРАНФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

рования (рис. 9.8).

Такая постановка вопроса объясняется структурной особенностью системы, обеспечивающей большую точность и жесткость поверхности купола, служащего каркасом закрепления экрана остронаправленных антенн.

При создании конструкции были поставлены структурные, технологические и функциональные задачи и разработаны соответствующие решения, заключающиеся в следующих позициях:

- максимальное сокращение механических узлов и обеспечение процессов трансформации на основе свойств элементов и конструкционных материалов;
- типизация составных частей;
- упрощение технологических процессов обработки конструктивных элементов;
- повышение уровня надежности формообразования и его сохранения;
- учет и использование особенностей космоса при построении системы;
- упрощение силовых процессов развертывания системы и повышения степени ее безотказности;
- структурное обеспечение сохранения общей геометрии при выходе их строя отдельных зон конструкций;
- последовательное нарастание несущеспособности и жесткости от периферии к центру концентрации в целях создания на полюсе купола силовой зоны крепления космического аппарата;
- получение точных контуров параболы с их перенасыщением в направлении центра для крепления на них сетеполотна отражателя;
- уплотнение пакета сложенной конструкции и уменьшение ее габаритов, а также упрощения процесса свертывания системы;
- максимальное повышение жесткости конструкции в целом и, особенно, каркасов контура крепления экрана радиотелескопа;

Принятые решения учитывают опыт разработки кольцевых лепестковых систем и, несмотря на то что предложенная циклическая пневможесткая конструкция по облику отличается от них, по существу является логическим продолжением усовершенствования кольцевых лепестковых систем в определенном пневматическом варианте. Что же касается ее принадлеж-

ности к каркасно-опорным трансформируемым системам, то здесь отрицательных мотивов нет.

Контуры лепестков имеют кривизну с одинаковыми знаками. Растягивание лепестков для их преднапряжения в целях восприятия знакопеременных нагрузок обеспечивается не кольцом, что при криволинейной оси практически невозможно, а радиальными секторообразными пневмобаллонами, которые, чередуясь с лепестками, образуют циклически пневможесткий купол. Пневматический характер повышенной жесткости требует разъяснения. Лепестки, устраиваемые между баллонами, при надувании последних растягиваются и практически превращаются в "балки-стенки".

При этом, за счет преднапряжения и давления баллонов с обеих сторон, стенка не теряет устойчивости.

Таким образом, циклические тонкостенные лепестки с помощью преднапряжения и пневмоподкрепления с обеих сторон превращаются в жесткие ребра купола. При толщине стенки  $0,2 \pm 0,5$  мм, диаметре антенны до 30 метров и давлении в баллонах 0,02 атм. они могут воспринимать не только "космические" нагрузки, но и практически сохранять форму в наземных условиях с минимальной степенью обезвешивания.

Точность и жесткость системы, наряду с теоретическими расчетами, были подтверждены экспериментально на 15-метровой модели, которая была создана в основном для апробации методов и способов изготовления и отработки конструктивных решений в целях достижения больших точностей.

Изготовление и испытание экспериментального образца диаметром зеркала 12 м (рис.9.9) подтвердило теоретические предпосылки эффективности применения конструкции в космических радиотелескопах диаметром зеркал от  $15 \pm 25$  до  $50 \pm 80$  м с учетом того, что антенна до 30 метров соответствует требованиям сантиметровых радиоволн. Однако с применением лепестков из тонкостенных листовых углепластиков, выпускаемых промышленностью, сантиметровый диапазон радиоволн может быть распространен на радиотелескопы диаметром зеркала по 50 метров.

Применяя способ фиксированной ориентации фокального контейнера по отношению к экрану с тонкостенными стрингерными струнами, опоры могут изготавливаться также из пневматических цилиндров с продольными листовыми диафрагмами.

Реальное воплощение пневматической конструкции на космических орбитах предусматривает изготовление ее баллонов из материалов, затвердеваемых в космосе. Разрабатываются

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУЛИ ▣ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

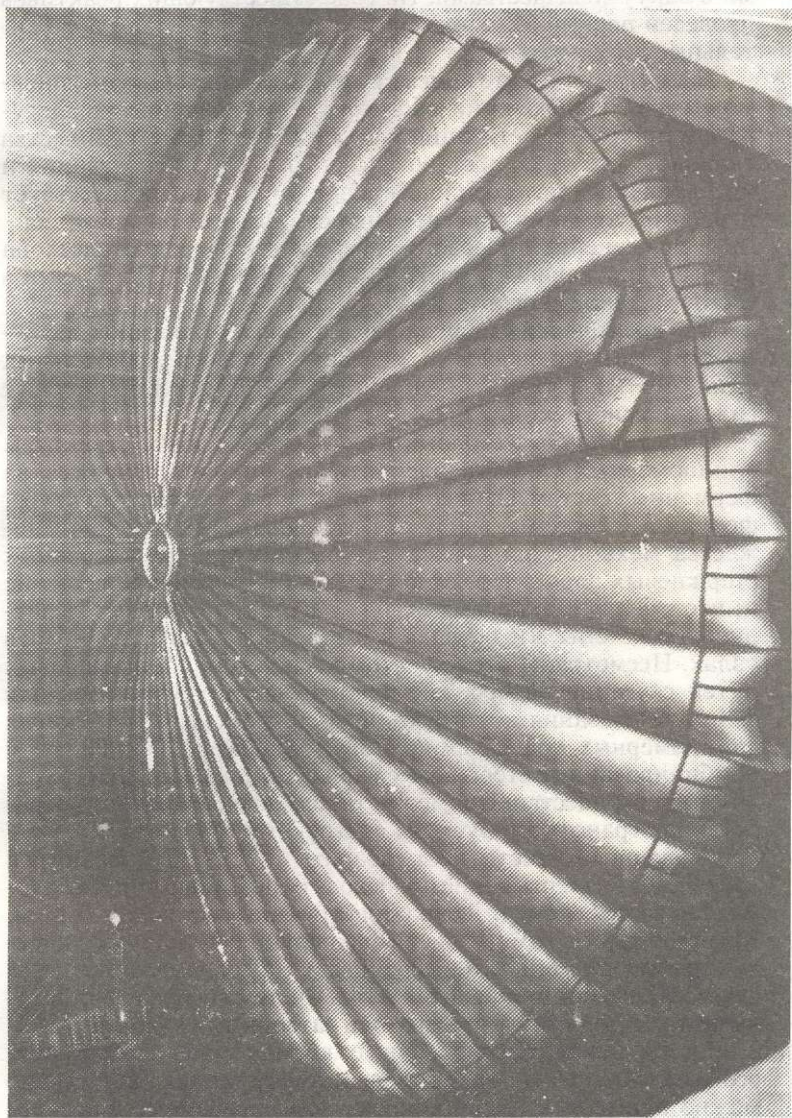


рис. 9.9

варианты смазывания поверхности баллонов затвердевающими в вакууме веществами. На базе существующих реактивов проведен первый этап экспериментов, которые дали положительные результаты.

Несмотря на то, что кинематический характер формы пневможесткой конструкции обеспечивает сохранение конфигурации при разгерметизации на орбитах большого количества баллонов, все-таки постановка вопроса его затвердевания и превращения пневмобаллона в скорлупу больше соответствует идеологии создания конструкции космического базирования.

С применением базового пневможесткого радиотелескопа разработаны варианты построения космического комплекса в составе серийных орбитальных аппаратов.

Для космических сооружений – от радиотелескопов до технологических площадок и несущих каркасов орбитальных станций – характерными элементами являются длиномерные силовые конструкции.

В традиционных сборных вариантах на орбите структуры длиномерных силовых элементов удачно воплощаются из ферменных систем. Однако при трансформируемой структуре, ферменные системы, ввиду обязательности применения множества механических узлов для взаимосвязи расчлененных стержневых элементов, осложняют конструктивное решение и, что главное, на первых этапах нагрузки повышают податливость системы, что обуславливается допусками и люфтами в узлах. Несмотря на это, с учетом продолжения поиска новых путей создания на орбитах технологических установок для формообразования конструкции, в силовых разворачиваемых длиномерных трансформируемых элементах ферменные и комбинированные стержневые варианты пока все-таки сохраняют преимущество. Примером такого подхода служит разработанная трансформируемая конструкция “Колхида”.

Сложенный пакет имеет габариты 0,72x0,40x0,63 метров (рис.9.10). Разворачивание происходит с помощью упругих элементов за 6,9 секунд. Длина конструкции составляет 9,51 м. Крестообразные рамные диски фиксируют ось “направленности” трансформации, что обеспечивает управляемость процесса формообразования (рис.9,11÷9.14). Система снабжена стартовыми толкателями, демпферами и затворными узлами.

Рассматривая перспективные космические сооружения, особо надо отметить, что в силовых конструкциях эффективно можно применять традиционные, апробированные инженерные способы создания таких сооружений, как большепролетные покрытия, мосты, башни, мачты и другие.



Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ *◆* ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

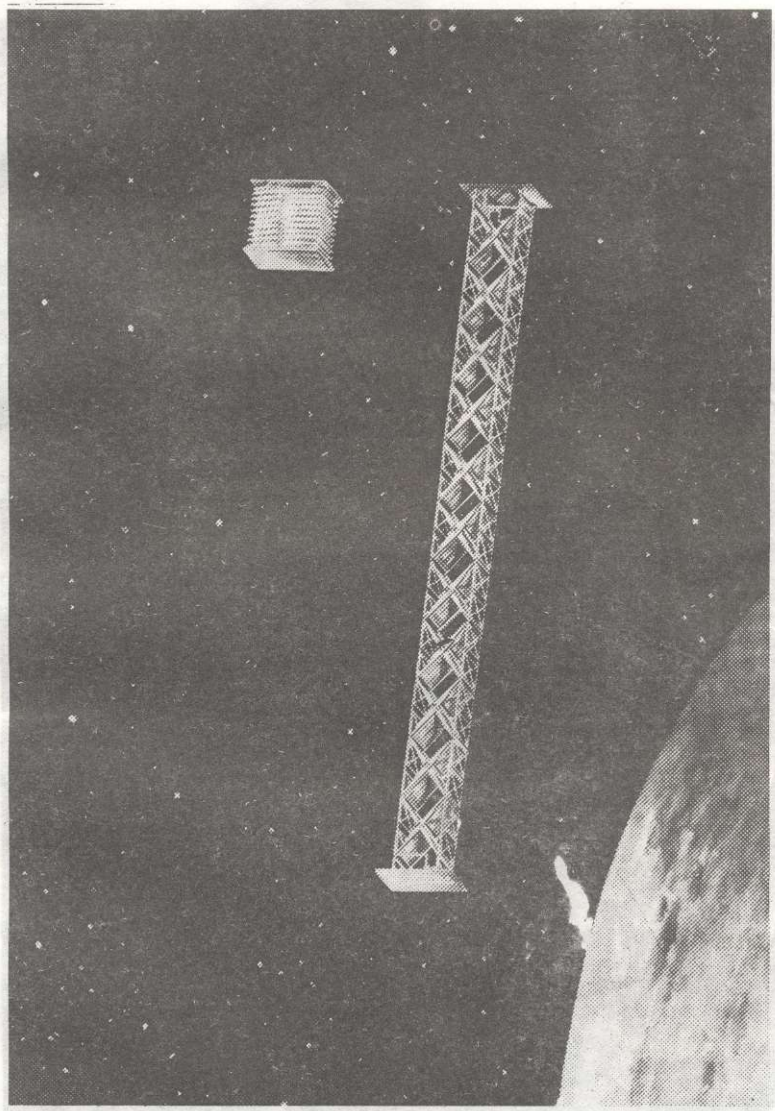


рис. 9.10

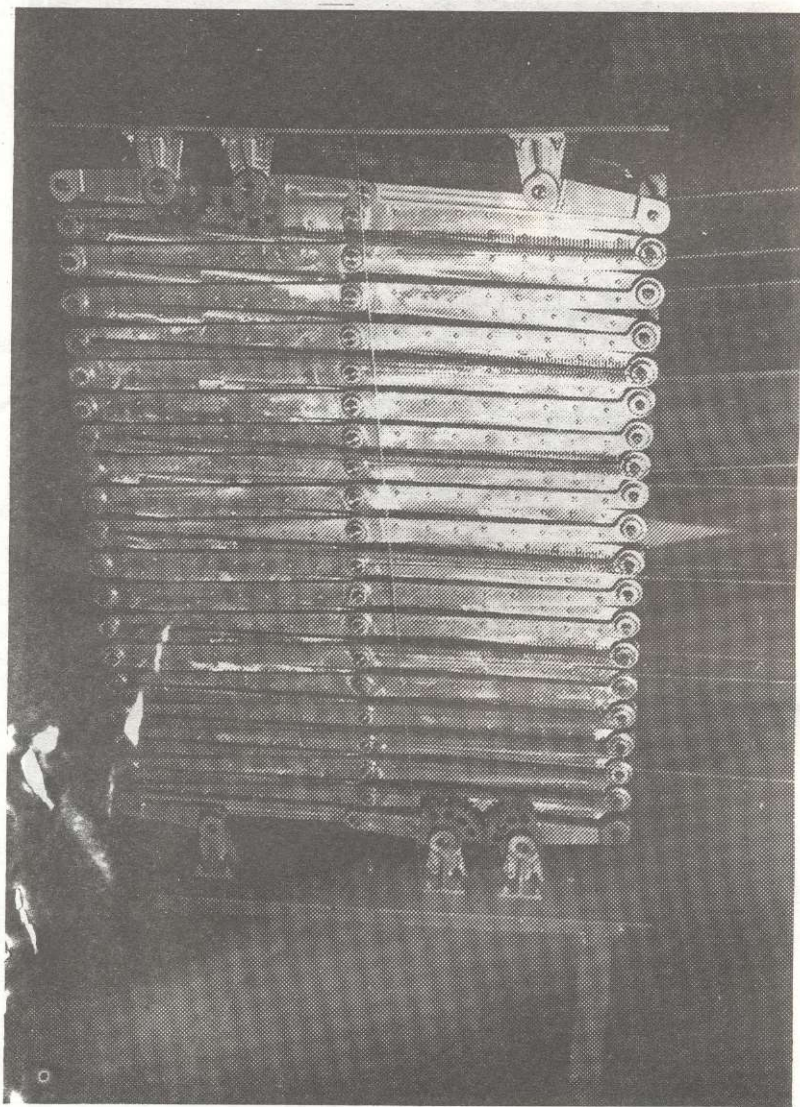


рис. 9.11

Э.В. МЕДВЕДЕВИЧ *◆* ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДВЕДЕВА И ДРУГИЕ  
♦ ПЕРЕНЕСЛИ НА ЗЕМЛЮ  
♦ ПЕРЕНЕСЛИ НА ЗЕМЛЮ  
♦ ПЕРЕНЕСЛИ НА ЗЕМЛЮ



рис. 9.12

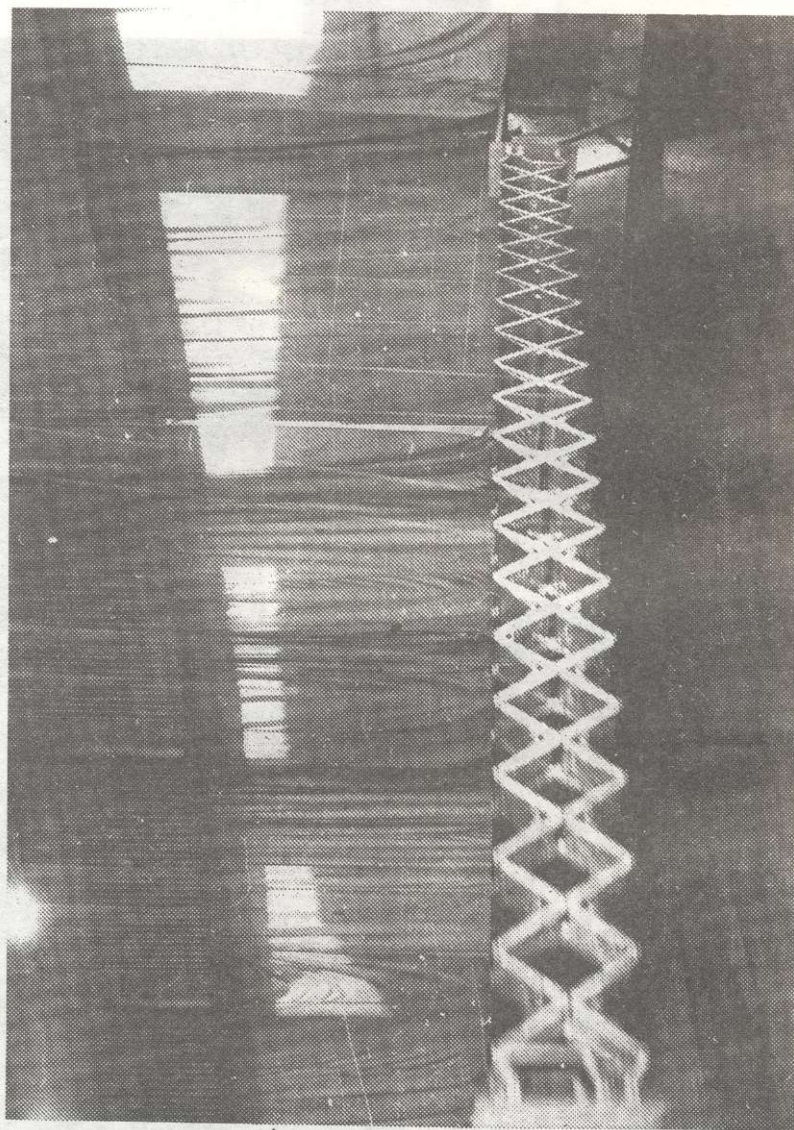


рис. 9.13

Э. В. МЕДЗМАРШАВИЦАИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДЗМАРЬЯНИЦАМИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

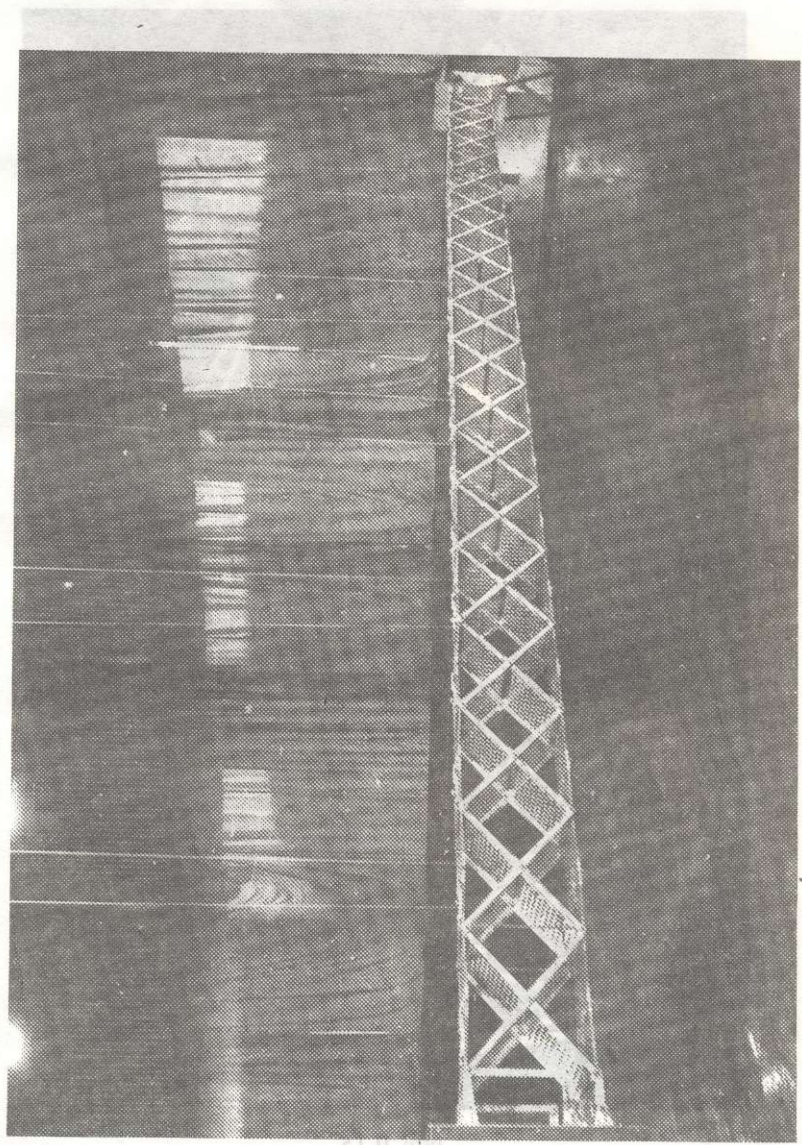


рис. 9.14

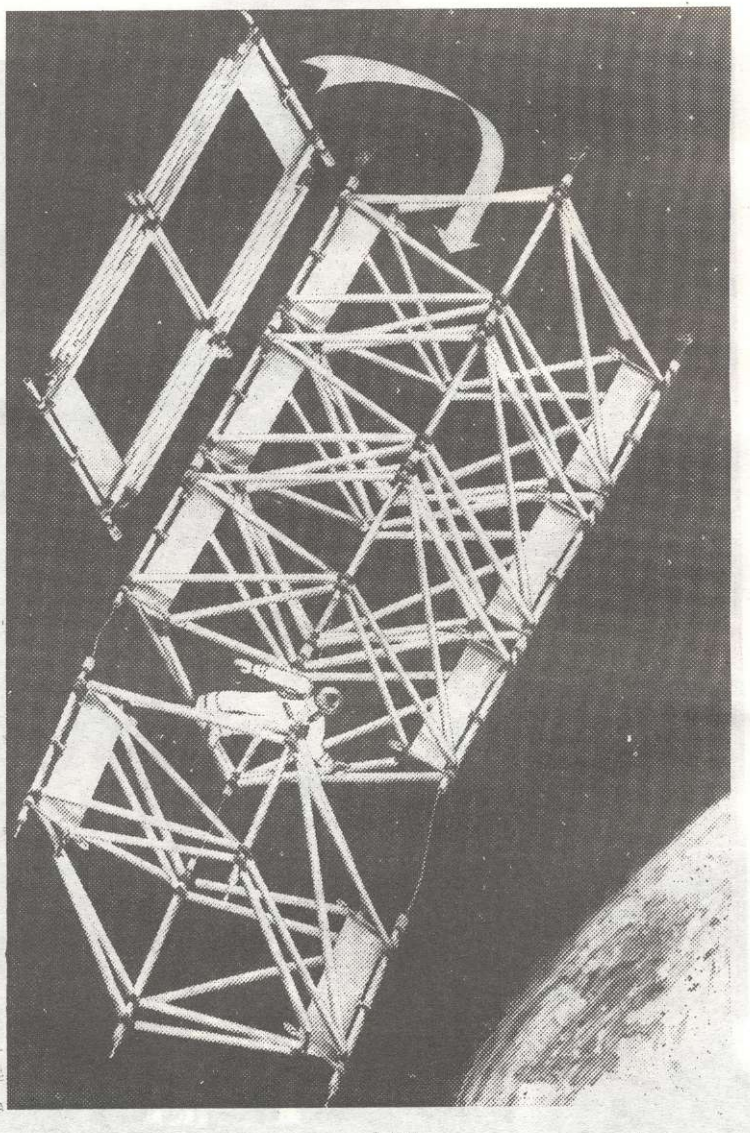


рис. 9.15

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ ИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Такая постановка вопроса была реализована в разработках трансформируемо-сборной системы для космических станций.

Трансформируемые рамы и совмещаемые технологические, монтажные и рабочие функции, система преднатяжения тяговых тросов, с учетом условий космоса, обусловили разработку способа создания больших сооружений на космических орбитах (рис.9.15).

Надо отметить, что совместные применения сборных и трансформируемых систем, при возможности проведения работ на орбитах космонавтами и роботами, обуславливают сравнительно большой эффект технологического решения разных задач.

При этом унификация, типизация составляющих элементов и узлов и достижение максимальной плотности упаковки в пакет является положительной стороной, наряду с упрощением технологических процессов сборки конструкции на орбите.

Такие условия были поставлены при разработке и создании

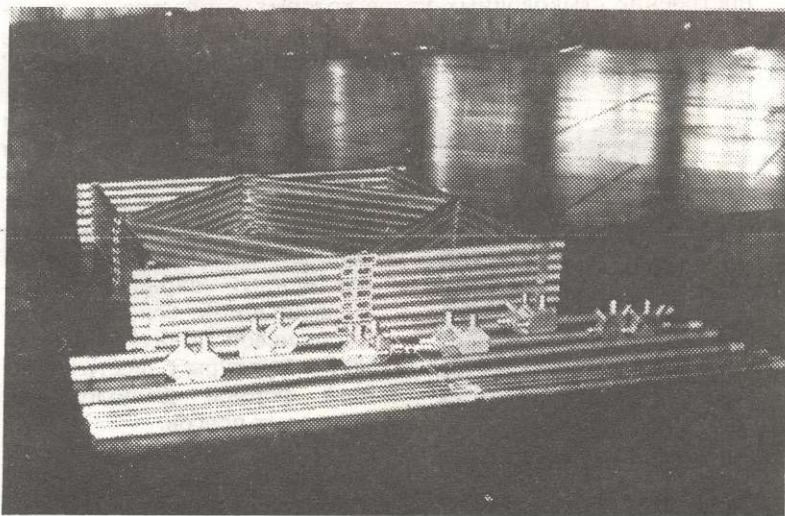


рис. 9.16

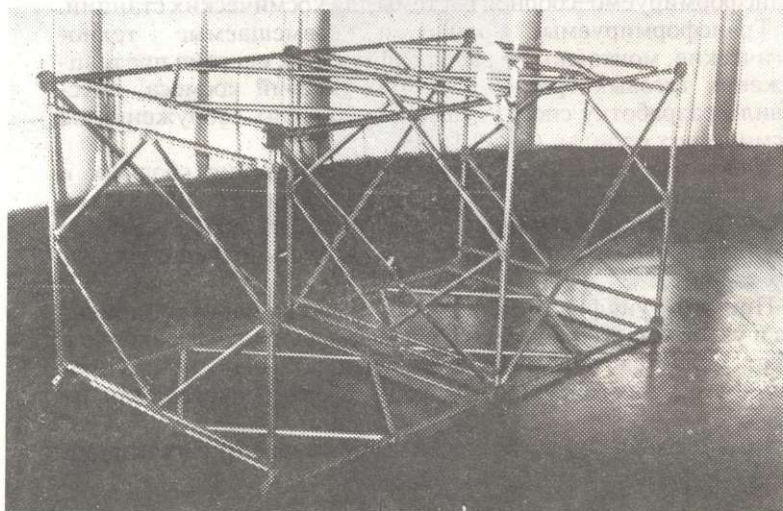


рис. 9.17

сборного каркаса орбитальных сооружений (рис.9.16 и 9.17), построение стыковочных узлов которых опирается на принципы применения элементов и материалов с "памятью" формы.

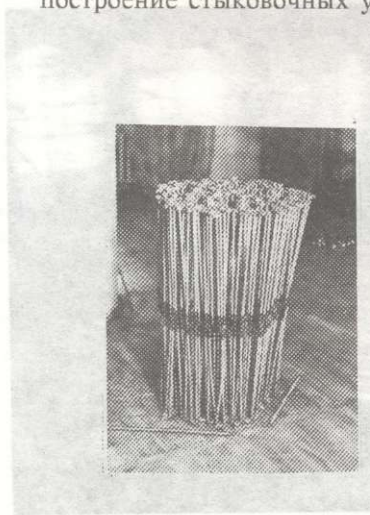


рис. 9.18

Однако, ставя на первый план практические задачи создания конструкций орбитальных радиотелескопов, был разработан и изготовлен также и комбинированный ферменный вариант трансформируемой системы из стержневой пантографической структуры с шестиугольной формой расположения вантовых поясов.

Были решены вопросы конструирования и технологии изготовления узлов и элементов, построения транспортного пакета сложной кон-

Э.В. МЕДВЕДЕВА И В.И. ШИШОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



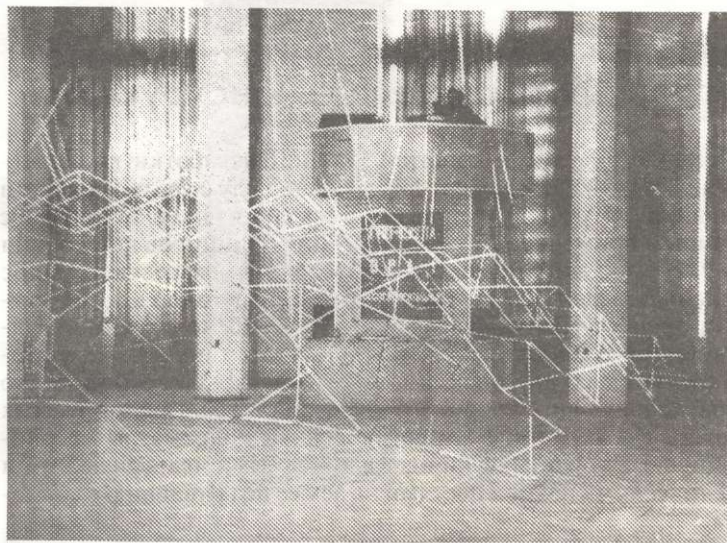


рис. 9.19

струкции (рис.9.18) и формообразования трансформируемой системы (рис.9.19).

В итоге можно заключить, что разработку перспективных конструкций космического базирования можно проводить в разных направлениях и на разных принципах построения. Но, несмотря на это, без учета требований конкретных космических программ, создания завершенной и универсальной системы не является полноценным процессом. Поэтому существование конкретных задач, перспектив и программ по освоению и использованию космоса, наряду с научно-техническим и экономическим потенциалом, являются решающим моментом на пути к созданию завершенных космических конструкций.

## 2

## Наземные быстроперебазированные и трансформируемые конструкции

Технологические и конструкторские разработки космических сооружений в обратной связи, наряду с традиционными решениями, создали предпосылки создания наземных систем с удачным применением “космических” принципов построения структуры. Такой подход находится в прямом соответствии с решением задач компактности транспортного пакета, к быстрому процессу формообразования и легкости конструкции. Однако особого учета требует наличие гравитационных, ветровых, снеговых нагрузок и экстремальных ситуаций, часто характеризующих нужды использования трансформируемых систем. Но, в итоге, эти противоречивые параметры уравниваются практически неограниченными человеческими и техническими возможностями на земле по сравнению с космосом.

В целях всесторонних экспериментальных исследований конструкции, в условиях сложных климатометеорологических воздействий, труднодоступности на месте применения транспортного пакета и экстремальности среды трансформации, в горах Боржомского района Грузии спроектирован (рис.9.20) и создан специальный испытательный полигон Института космических сооружений (рис.9.21).

Как отмечалось, применение наземных трансформируемых систем и их конструктивное решение, назначение и условия использования весьма разнообразны. Одной из сфер их применения являются инженерные сооружения больших радиотехнических комплексов.

Разработаны конструкции крупногабаритных наземных радиотелескопов для применения в специальных и научных задачах, а также в телекоммуникационных системах. При этом учитывались варианты радиотелескопов пассивных и активных, полноповоротных и неподвижных, транспортабельных и трансформируемых одноразового и многократного использования, а также с укрытием и без укрытия. Одновременно с этим проведены соответствующие теоретические и экспериментальные исследования на натуральных образцах изделия.

Для неподвижных больших зеркал были применены опорно-каркасные трансформируемые лепестковые системы и ис-

Э. В. МЕДЗ. ШАРЦАНВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

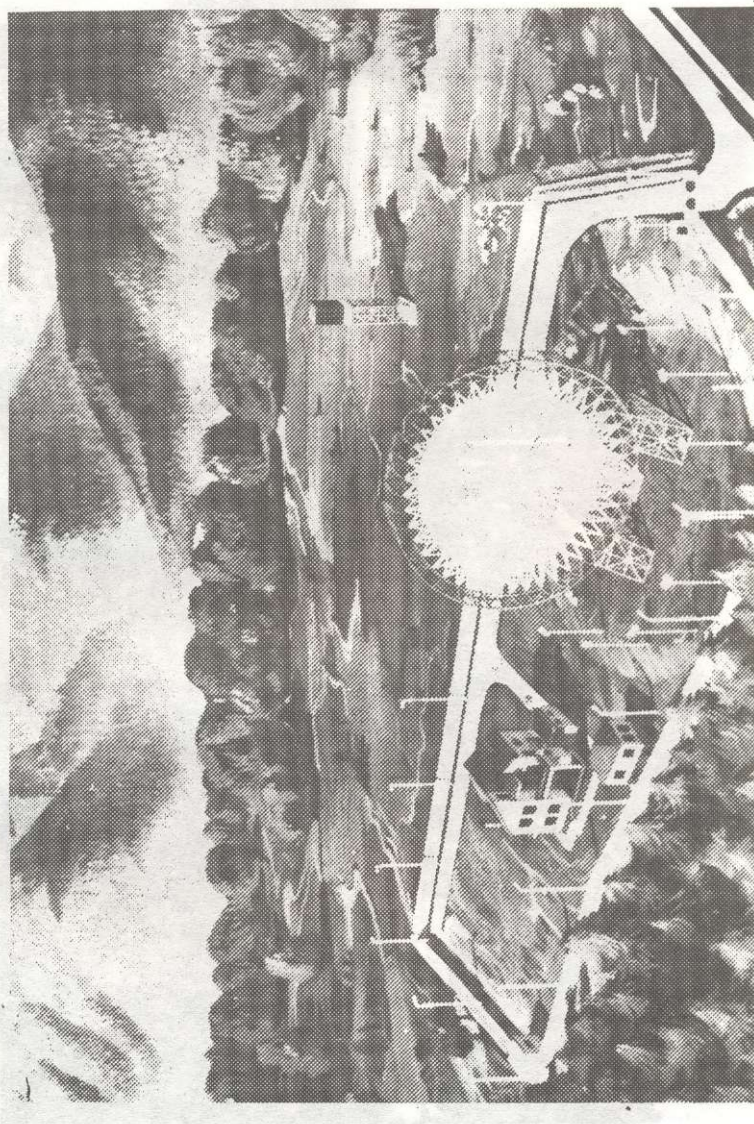


рис. 9.20

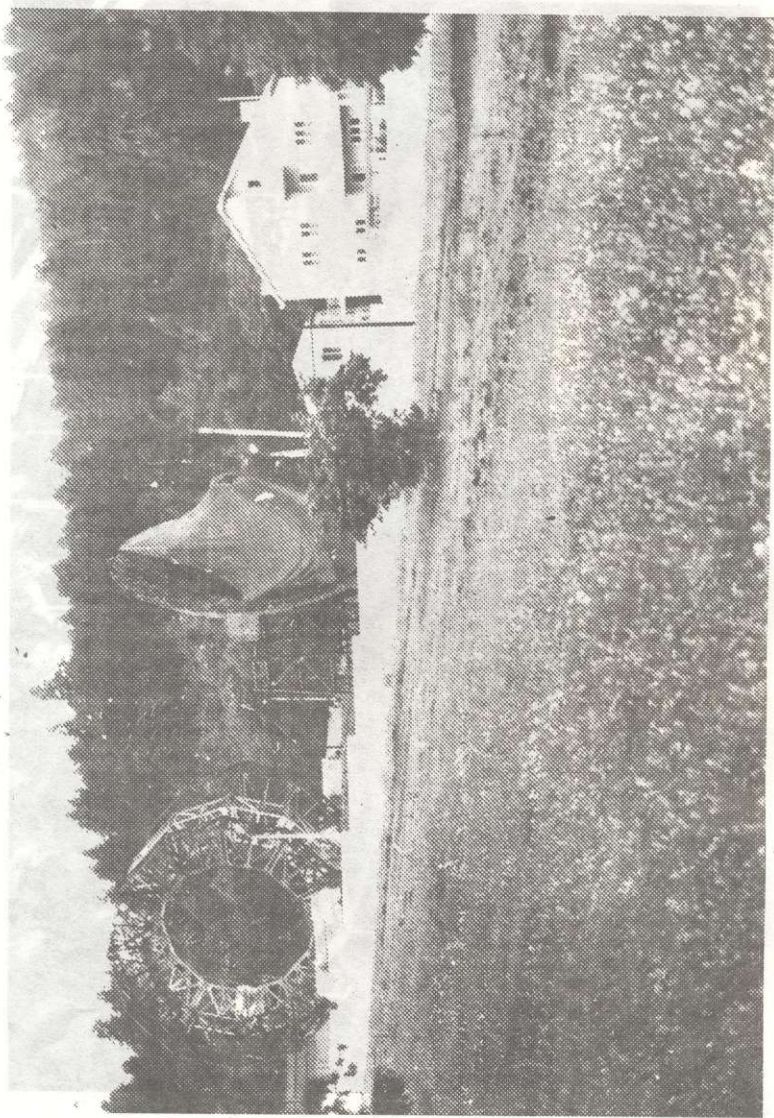


рис. 9.21

Э. В. МЕДЗМАРЬАШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

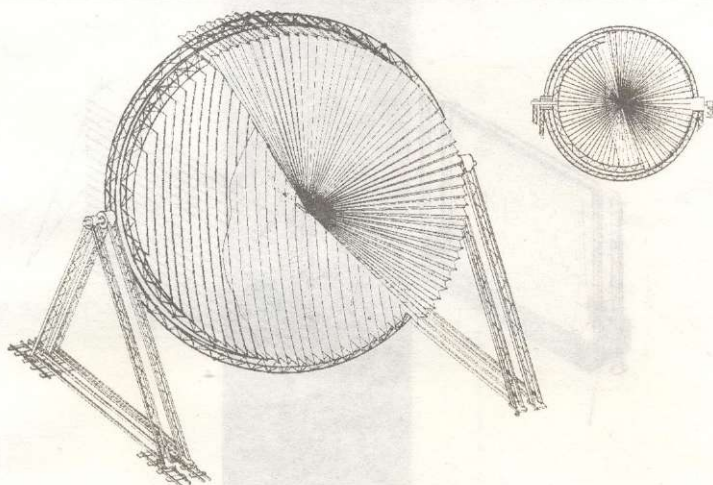


рис. 9.22

пользованием сборно-трансформируемых процессов.

Опорные каркасы предусматривались как кольцевыми, так и прямоугольными с параллельным расположением лепестков со своими автономными укрытиями (рис.9.22, 9.23 и 9.24).

Для проведения экспериментальных исследований аналогичных систем диаметром до 15 метров спроектирован (рис.9.25) и построен уникальный стенд (рис.9.26), состоящий из трех силовых ступеней колец, передвигаемых по железнодорожным путям на расстоянии до 50 метров.

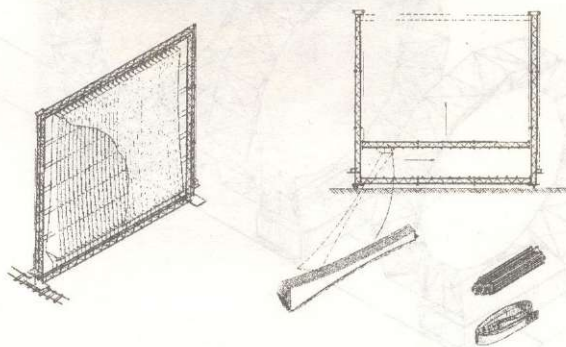


рис. 9.23

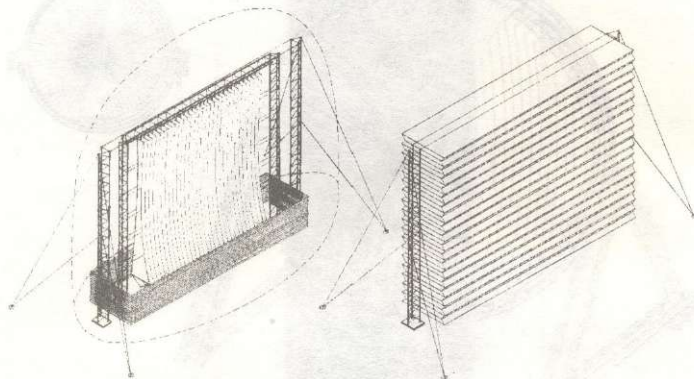


рис. 9.24

В широком аспекте изучались возможности создания новых транспортабельных, крупногабаритных полноповоротных трансформируемых радиотелескопов с максимальным размером до 15 метров для радиоволн сантиметровых длин с приме-

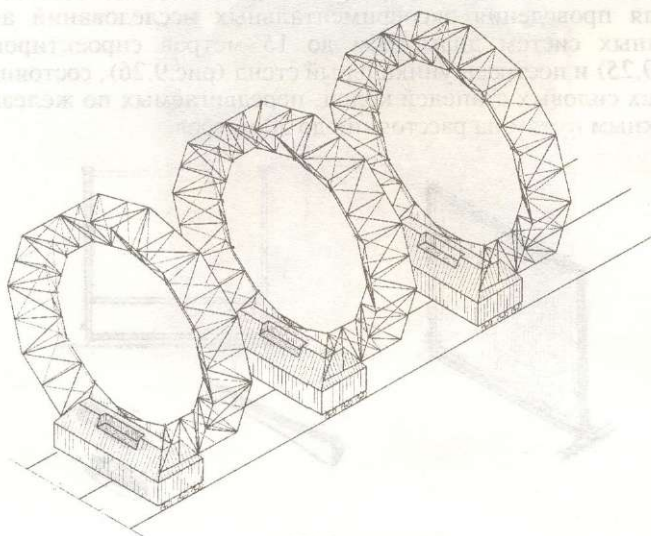


рис. 9.25

Э. В. МЕДВЕДЕВА И В. И. МЕДВЕДЕВ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДЗМАТЧИШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

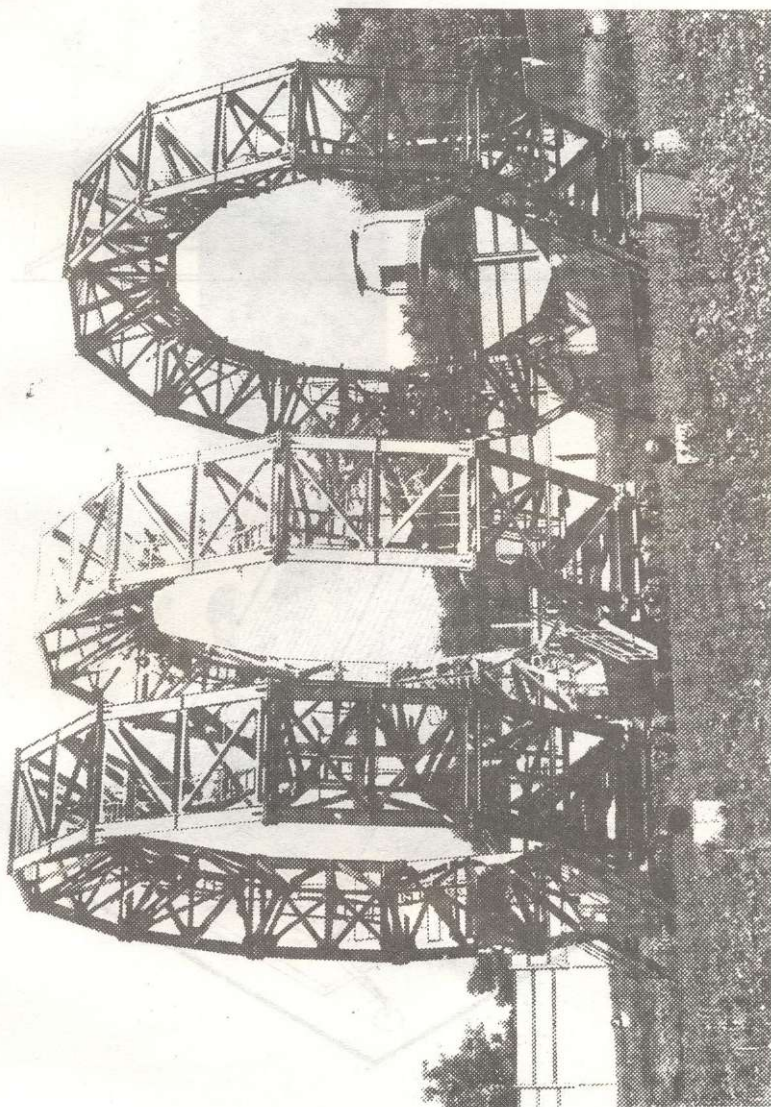


рис. 9.26

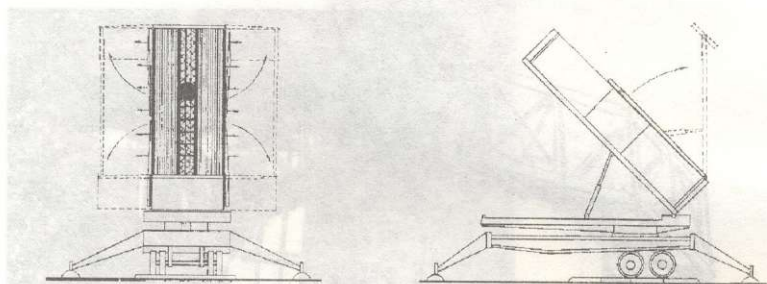


рис. 9.27

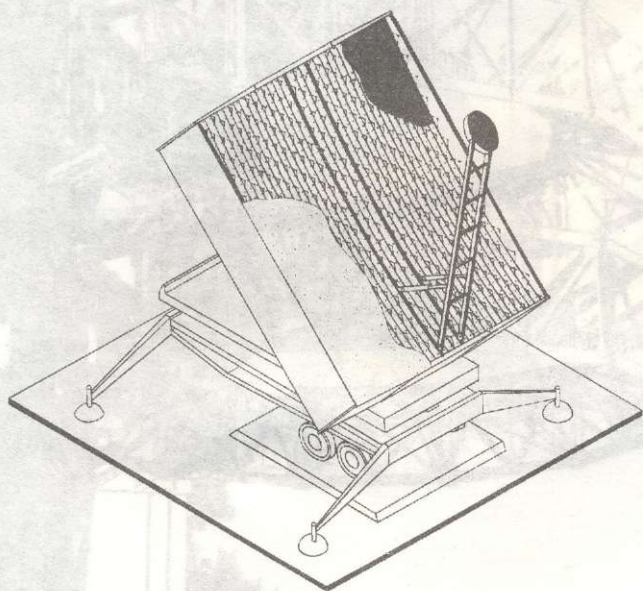


рис. 9.28

Э. В. МЕДЗ. МАРШАВИШВИ ✧ ПЕР. АНСРОР. МПРЧ. У. М. Е. КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ *★* ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ



• НАЗЕМНЫЙ БЫСТРОПЕРЕБАЗИРУЕМЫЙ  
ПОЛНОВОРОТНЫЙ РАДИОТЕЛЕСКОП  
(ДИАМЕТР ЗЕРКАЛА 18 М)

рис. 9.29

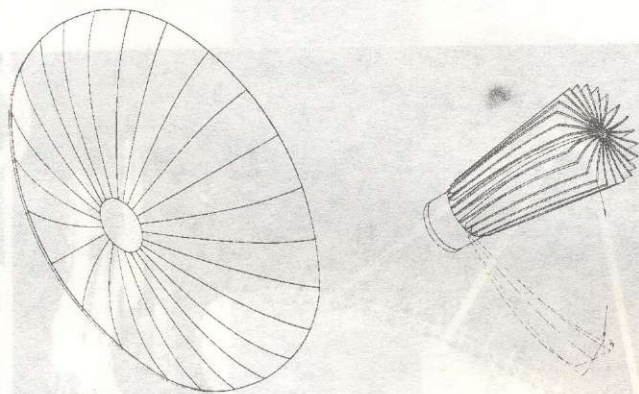


рис. 9.30

нением экранового сетеполотна и укрытия.

Был рассмотрен четырехугольный вариант зеркала из параллельно раздвигающихся контурных ребер (рис.9.27и 9.28) и из круглых радиально-ребристых систем (рис.9.29).

Особое место уделено конструированию радиотелескопов из сплошных лепестков без укрытия, на принципах формообразования оболочек (рис.9.30).

По предложенным принципам на масштабных моделях реализованы основные схемы трансформации. Они показали реальность построения точных наземных и космических радиотелескопов и солнечных концентраторов с диаметром зеркал до 12 метров (рис.9.31).

Для создания штатных образцов быстроперебазируемых полноповоротных трансформируемых радиотелескопов решался ряд технических и технологических вопросов. В результате была создана циклическая ребристая ферменная конструкция остронаправленной антенны НР.12 диаметром зеркала 12 м, где опорно-поворотные функции совмещены с транспортным полуприцепом.

Созданию базового образца предшествовали теоретические исследования, стадии проектирования, испытания статистического и экспериментального образца с укрытием диаметром зеркала 15 метров и выпуск комплекта техдокументации для базового образца.

На экспериментальном образце были изучены картины напряженно-деформированного состояния каркаса основных частей антенны; технологические последовательности и способы

Э.В. МЕДВЕДЕВА И А.В. ШИШОВИЦА ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

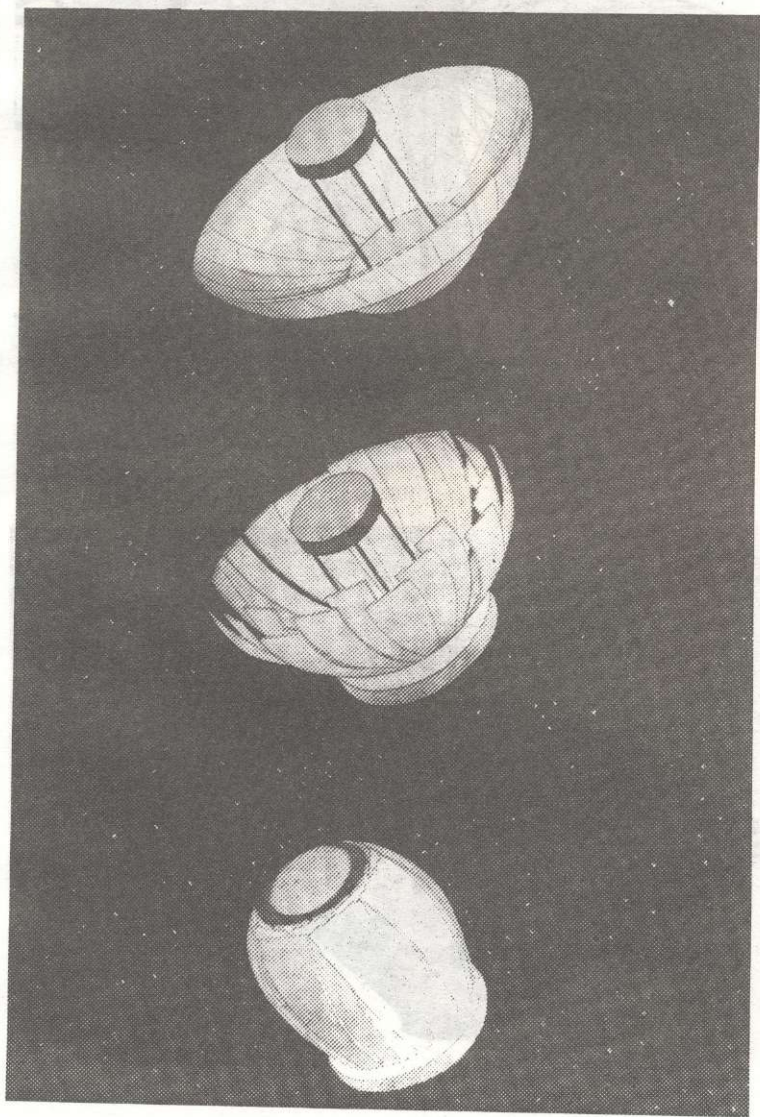


рис. 9.31

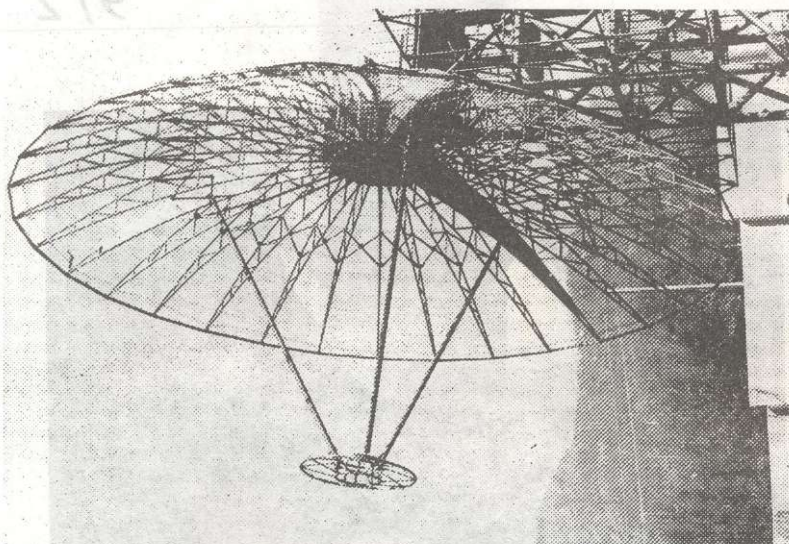


рис. 9.32

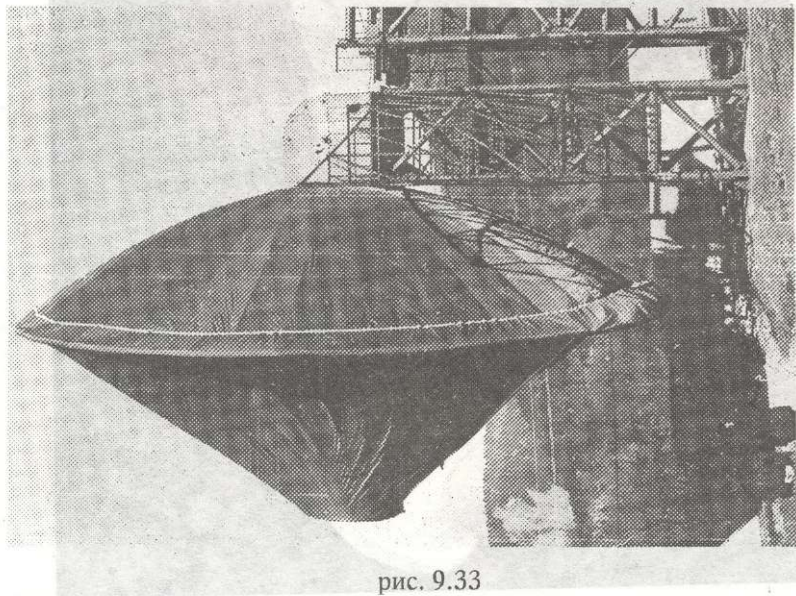


рис. 9.33

Э. В. МЕДЗМАРЦЯНИЦАИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

изготовления элементов и сборки; нанесение на зеркало сетеполотна; фиксация фокального контейнера; устройство шатра укрытия; работа и восприятие климатометеорологических нагрузок каркасом сооружения и укрытием.

С этой целью на специальный полигон были доставлены элементы конструкции, и произведен монтаж каркаса экспериментального образца (рис.9.32 и 9.33).

В целях проведения измерений для расположения приборов во взаимосвязи с изделием рядом с опорной частью построена технологическая башня.

На циклически расположенные ребра, часть которых была усилена для закрепления опор облучателя, нанесено экрановое сетеполотно. После построения каркаса произведен процесс устройства автономного конусообразного укрытия. Механические испытания показали большую жесткость конструкции. Укрытие практически обеспечило сохранение работоспособности сетеполотна экрана при любых метеоклиматических условиях. Удачной оказалась и картина работы укрытия. Однако как теоретически, так и по результатам экспериментальных исследований, предпочтительным оказался вариант не конусного укрытия, а гиперболического параболоида, форма которого достигается с корректурой выкройки составных частей конусного шатра. После определенного времени длительное воздействие радиации солнца и ветра нарушило целостность укрытия.

Для выбора подходящего материала на специальной миниатюрной установке были продолжены эксперименты. Испытания показали также, что технология изготовления ферменных ребер и способ их монтажа не обеспечивают точность параболических контуров для работы зеркала на сантиметровых радиоволнах. Поэтому на базовом варианте было намечено применение добавочных параболических контурных “сабель” для откорректировки точности поверхности и использование при их установке контролирующего приспособления “флажок” (рис.9.34).

На основе отмеченных работ разработан базовый вариант НР-12 (рис.9.35).

Ферменные ребра взаимосвязаны с жесткими “ломающимися” кольцеобразно расположенными распорками, которые в местах “перелома” – шарнирных узлах – радиально крепятся тяговыми стержневыми штангами. Предложенная схема каркаса зеркала со сдвинутой осью штанги от симметричной оси, проходящей между двумя ребрами, и степень свободы хода осей цилиндрических шарниров крепления “ломающихся рас-

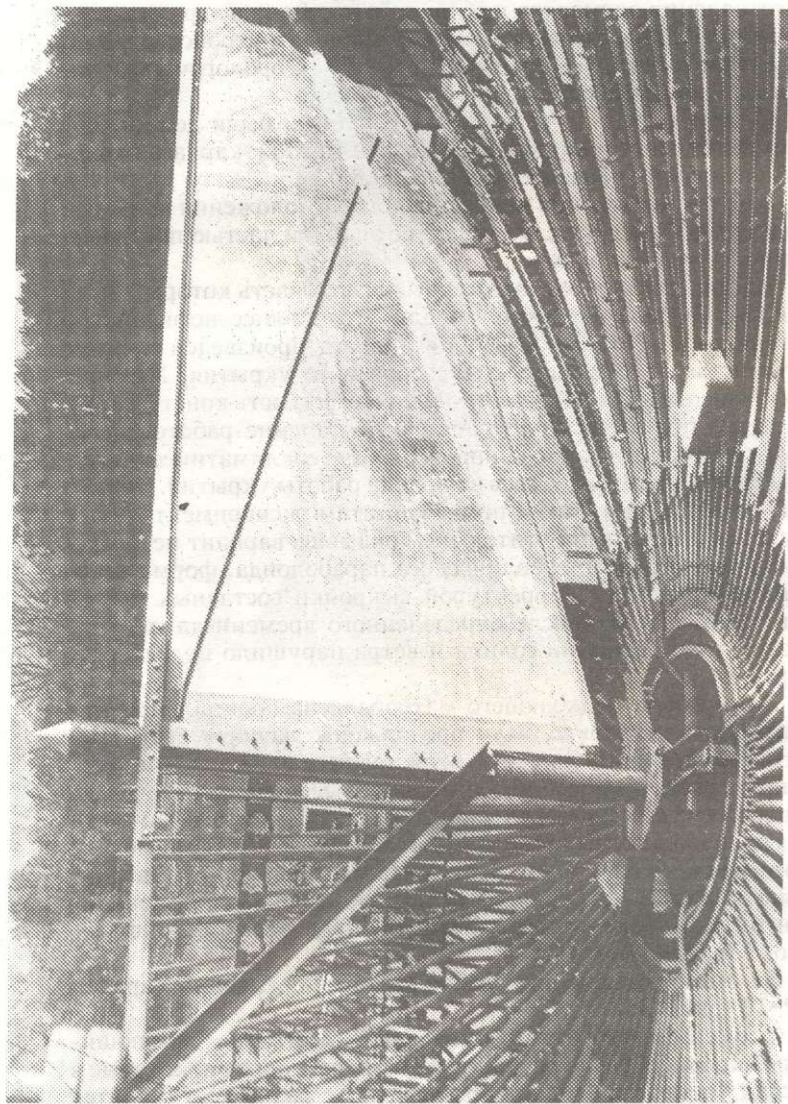


рис. 9.34

Э. В. МЕДЗМАРИАНИВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧУЛИ И ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

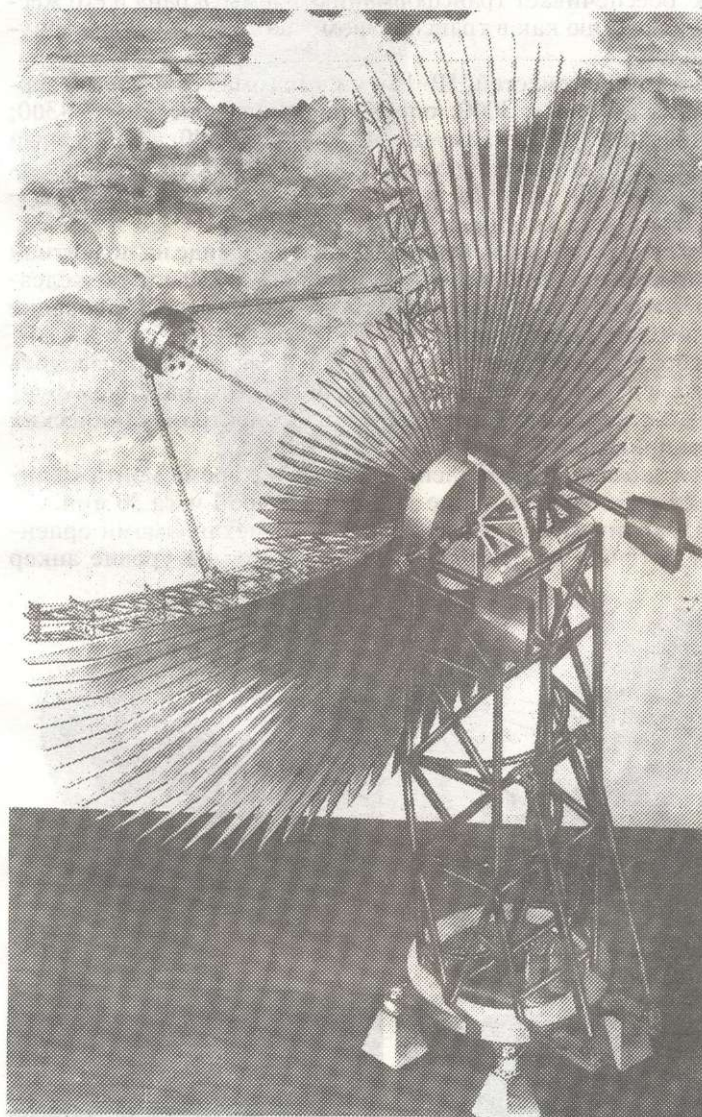


рис. 9.35

порок, обеспечивает трансформацию формы экрана и его жесткую фиксацию как в транспортном пакете, так и в развернутом виде.

Вес основных частей НР-12 в килограммах составляет: зеркальная система – 3000; опорно-багетная система – 4360; опорная рама – 2500; азимутальный привод – 640; угломестный привод – 640; опорно-поворотный круг – 1450; система электропривода – 60; система гидропривода – 650; противовесы – 2300; общий вес антенны – 17604.

Антенну можно перевозить в сложенном виде на подкатной пневмооси в принципе и автомобилю КРАЗ-250 или по железной дороге на платформе. Возможно также перебазирование антенны авиатранспортом.

Выбранная силовая схема антенны позволяет производить монтаж и демонтаж антенны на заранее подготовленном фундаменте с помощью собственных гидроэлектромеханических систем приводов.

При заранее подготовленной площадке время монтажа антенны в рабочее положение займет не более 1 часа 30 мин.

Гидравлическими и электрическими механизмами ориентация антенны по азимуту осуществляется на уровне анкер

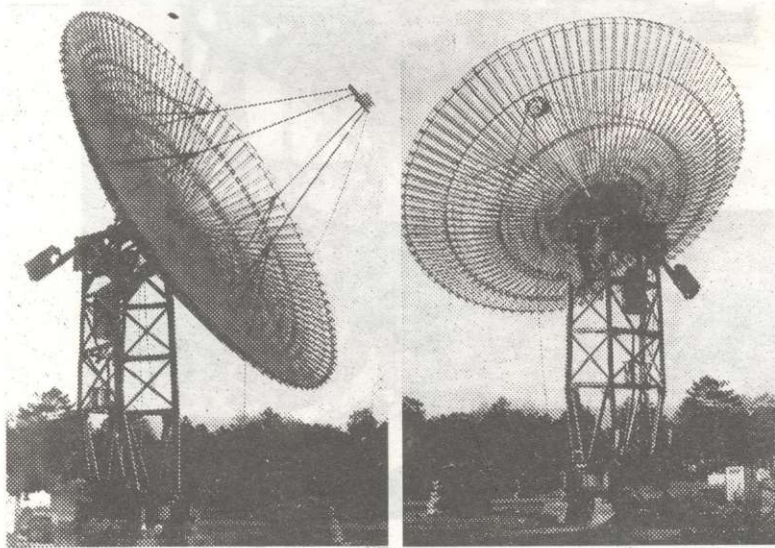


рис. 9.36



Э. В. МЕДЗМАРЦЬАНИШВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

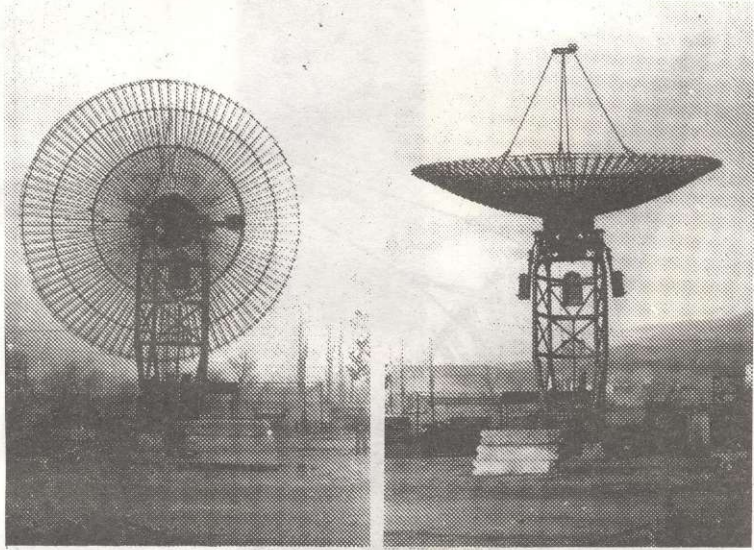


рис. 9.37

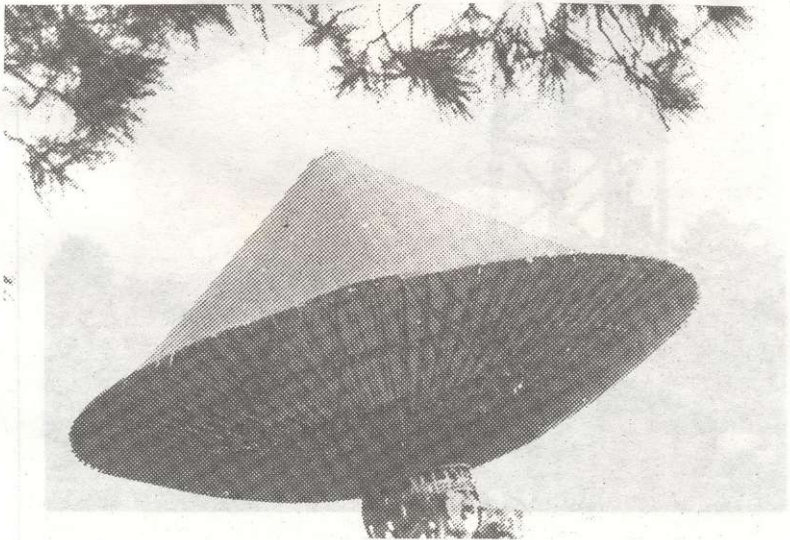


рис. 9.38

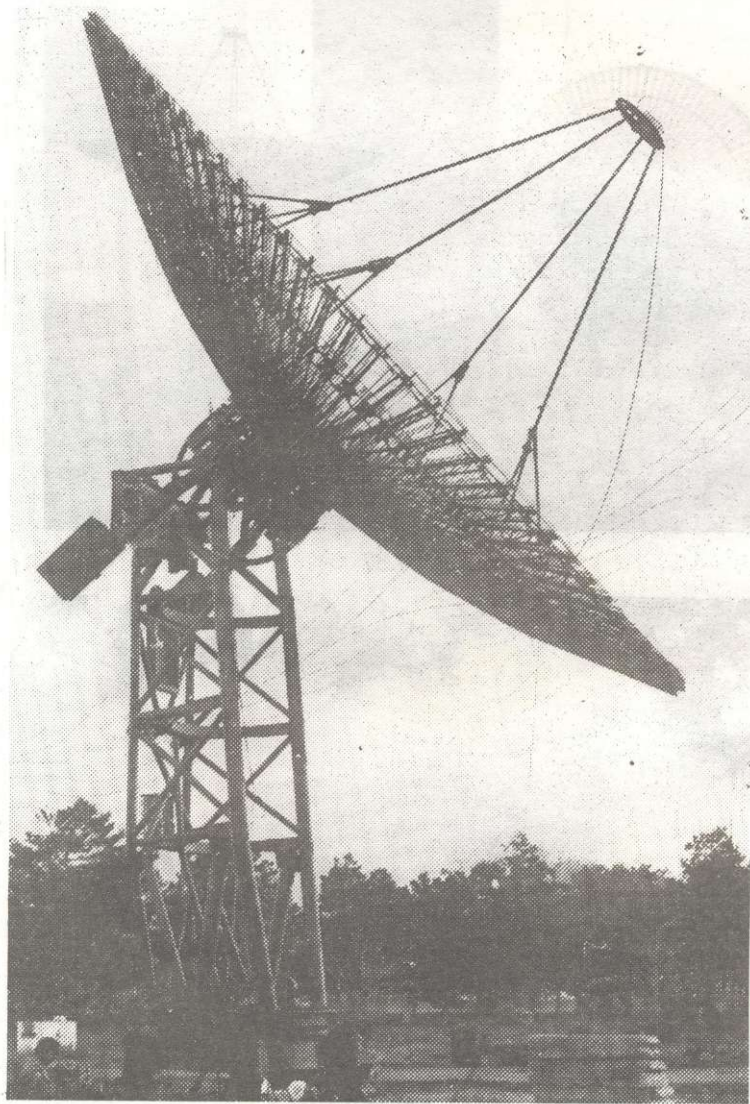


рис. 9.39

Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ *◆* ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

фундаментов, а по углу местности, и местах закрепления зеркала – в опорно-поворотной части.

Экспериментальные исследования базового образца конструкции проведены как на этапах трансформации, транспортировки, ориентации и функционирования, так и на этапах изготовления и технологических процессах сборки и монтажа изделия.

Для уменьшения силовых перегрузок механизмов ориентации в зоне размещения механизмов трансформации и перемещения зеркала по углу местности могут быть смонтированы противовесы.

Точность параболических контуров экрана практически обеспечивается посредством накладных контурных “сабель”.

Электромеханические и гидравлические системы ориентации обеспечивают быстроту, устойчивость и плавный разворот зеркала радиотелескопа как по углу местности, так и по азимуту (рис.9.36 и 9.37).

В условиях наземной эксплуатации укрытие экрана (рис.9.38) гарантирует сохранение функциональных свойств металлического сетеполотна по точности отражения и концентрации радиоволн в сантиметровом диапазоне.

Однако до окончательного подбора материала шатра пришлось испытать много ее вариантов, так как первичные варианты не выдерживали нагрузки ураганных ветров. Но при этом, при полном выходе из строя укрытия, каркас зеркала антенны практически оставался без изменения характерных геометрических параметров (рис.9.39).

Механизмы складывания зеркала и его укладки в части опорно-поворотной конструкции, являющейся также транспортным полуприцепом, обеспечивают максимальную надежность процесса трансформации и транспортировки инженерной конструкции радиотелескопа (рис.9.40 и 9.41).

Отдельный класс теоретических и экспериментальных работ был проведен по разработке наземных трансформируемых конструкций – мостов для инженерных войск, инвентарных покрытий, оранжерей, теплиц, лимонариев и противогородных укрытий виноградников, а также по раздвигаемым покрытиям общественных зданий. Отмеченное направление представляет интерес как для оборонных, так и для гражданских, промышленных и сельскохозяйственных задач.

Как уже отмечалось, трансформируемые системы по характеру своего построения становятся актуальными в экстремальных условиях, к которым относятся ситуации возведения мостов, переправ, укрытий в зонах катастроф, в труднодоступных

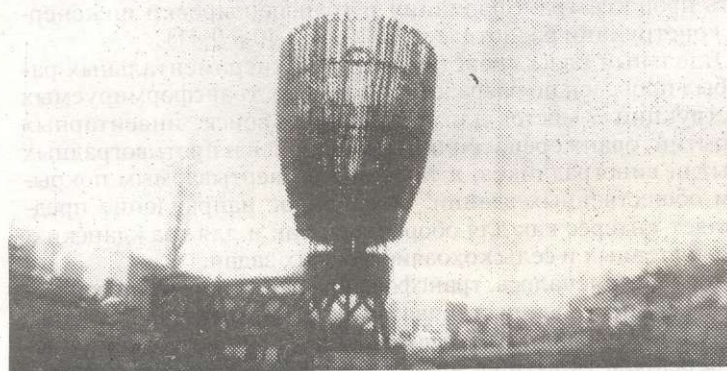
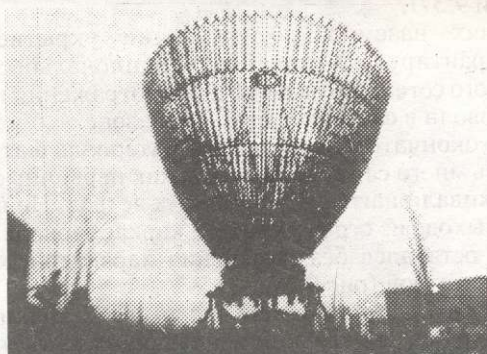
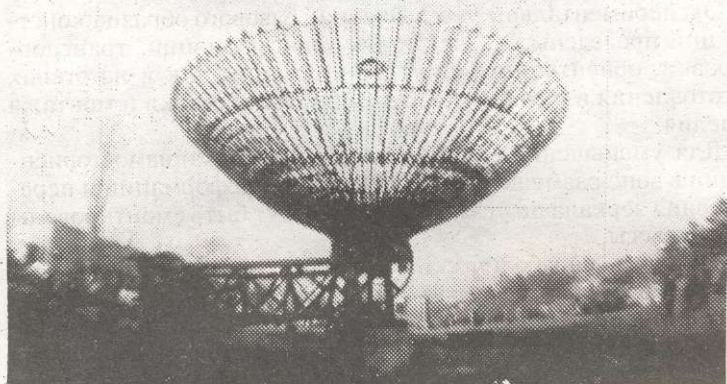


рис. 9.40

Э. В. МЕДЗМАРЦЬАНЬЦЫ И ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Э. В. МЕДЗМАРИШВИЛИ ✦ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

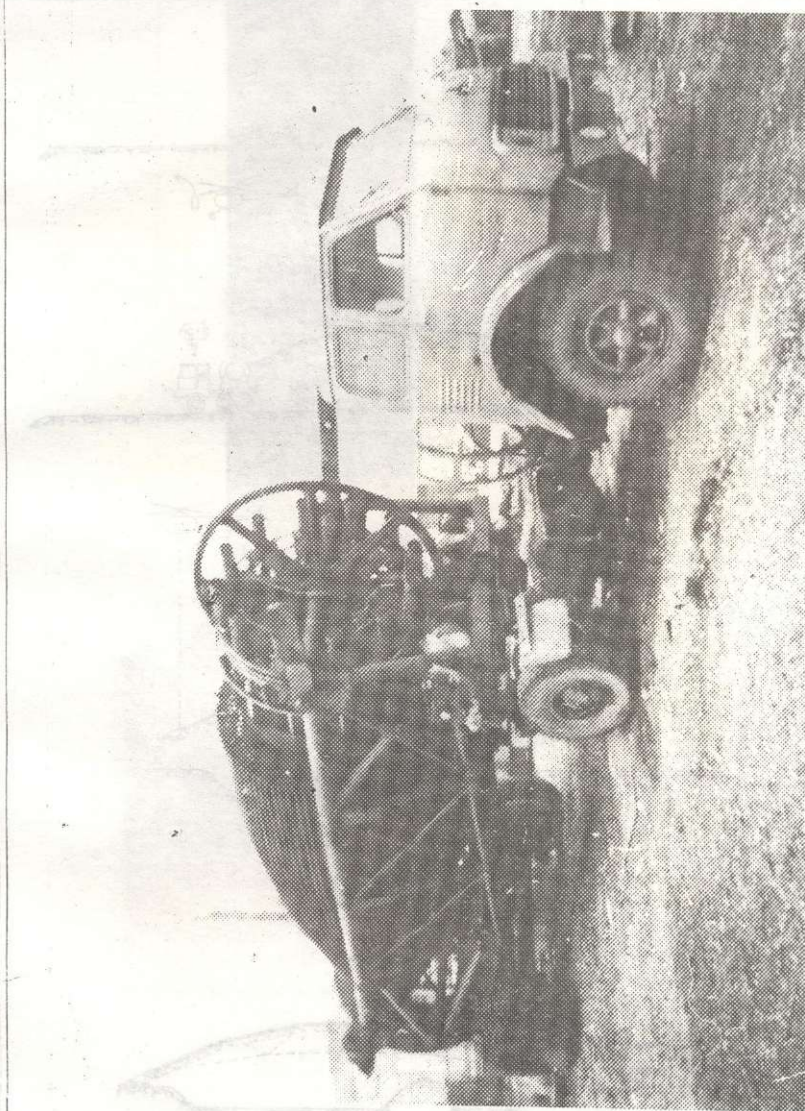


рис. 9.41

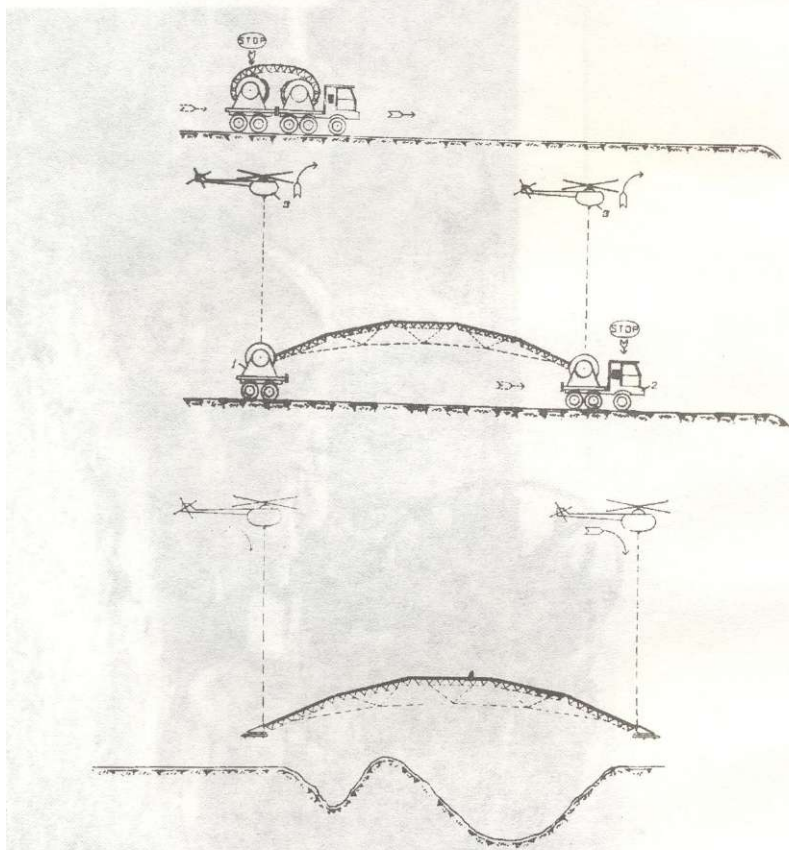


рис. 9.42

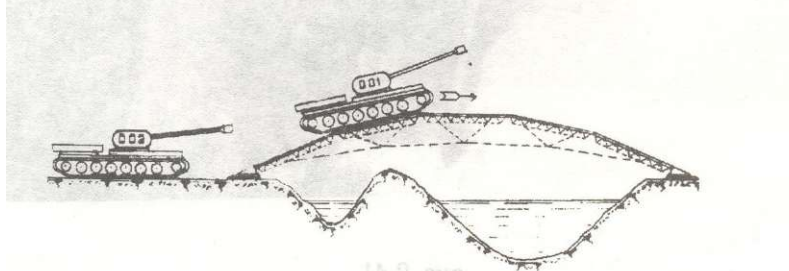


рис. 9.43

Э. В. МЕДЗМАРЯНИЦАМ ✧ ПЕРАНФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

местах, а также в театре военных действий.

В этом направлении предлагается т.н. "штурмовой" развертываемый мост для обеспечения инженерных задач в зоне военных действий.

В отличие от традиционных решений, транспортный пакет моста наматывается на две катушки, закрепленных на самоходном устройстве (рис.9.42). На подходе к преграде с разъединенными частями самоходного устройства, с учетом конструктивной структуры, мост развертывается. Это обеспечивается геометрической схемой системы и комбинированного применения жестких и гибких стержней. С помощью вертолетов мост устанавливается на месте функционирования (рис.9.43). Сложенный пакет при пролете моста до 36 метров удовлетворяет транспортным, весовым и габаритным требованиям.

Трансформируемые конструкции в обыкновенном строительстве, в традиционном смысле их понимания, приобретают и другие качества по сравнению с рассмотренными специальными космическими и наземными системами, где экстремальность условий отдает приоритет возможному способу достижения проектной формы изделия.

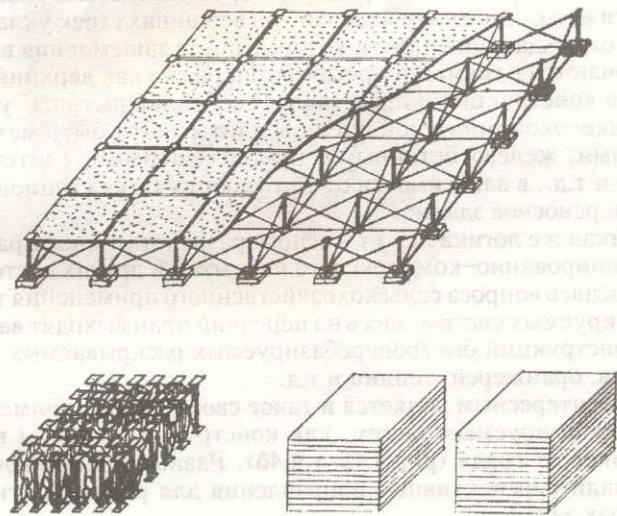


рис. 9.44

Трансформативность становится архитектурным параметром, расширяющим возможности планировочных, функциональных, эстетических и комфортабельных решений, к чему часто добавляется и достижение универсальности зданий и сооружений.

Применение трансформируемых систем в традиционном строительстве не только желательны, но и необходимы.

Именно поэтому, на основе проведенных исследований, были проведены работы по разработке новых конструкций для гражданского, промышленного и сельскохозяйственного строительства, на примере которых дается оценка их общих принципов и функциональных разнообразий.

Комплексно-структурные комбинированные покрытия представляют собой трансформируемую конструкцию, состоящую из плит, стержневых стоек, гибких раскосов и нижних поясов (рис.9.44).

Система эта складывается в пакет, транспортабельна, многократно в использовании и в кратчайшие сроки обеспечивается построение конструкции на разных объектах.

Заранее изготовленная система, за счет наличия односторонних связей – гибких стержней, которые представляют собой тросы, легко складывается в пакет и доставляется на место применения совместно с пакетом отдельно уложенных плит.

С помощью техники трансформируемая система разворачивается и как “добавочные связи” на вершинах стоек укладываются ограждающие плиты, которые после защемления в узлах включаются в совместную работу покрытия как верхний пояс. Такая конструкция и представляет собой покрытие. С учетом технико-экономической оценки, плиты могут быть металлическими, железобетонными, армоцементными, синтетическими и т.д., в зависимости от того, сооружается стационарное или переносное здание.

Такая же логика лежит в основе разработки многогранного комбинированно-комплексного покрытия и других систем.

Касаясь вопроса сельскохозяйственного применения трансформируемых систем, здесь на передний план выходят варианты конструкций быстроперебазируемых раскрываемых лимонариев, оранжерей, теплиц и т.д.

Но интересным является и такое своеобразное применение трансформируемых систем, как конструкции защиты виноградников от града (рис.9.45 и 9.46). Разные новые варианты показали перспективные направления для решения этих непростых задач.

Рассмотрение новых строительных трансформируемых



Э. В. МЕДВЕДЕВИЧ *◆* ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

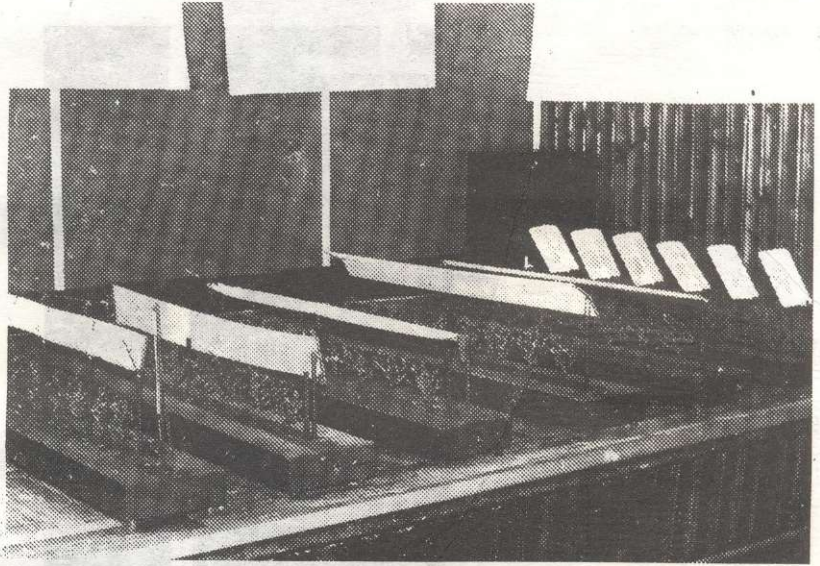


рис. 9.45

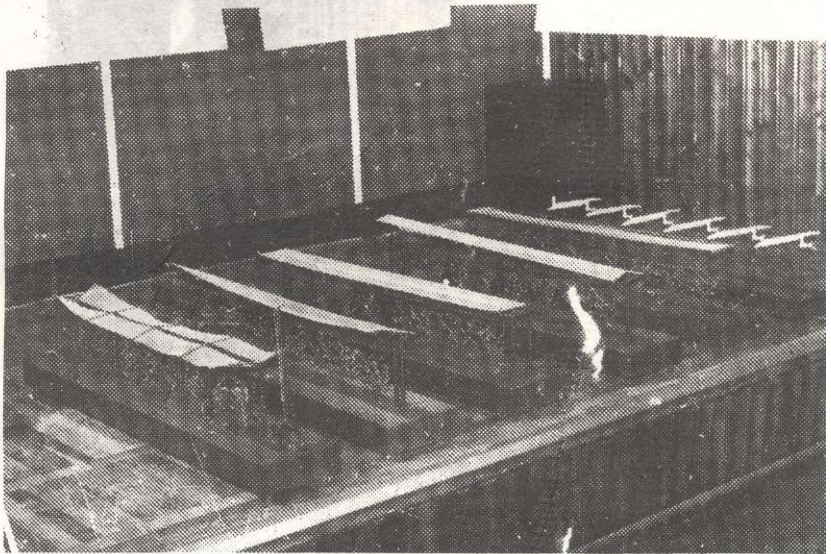


рис. 9.46

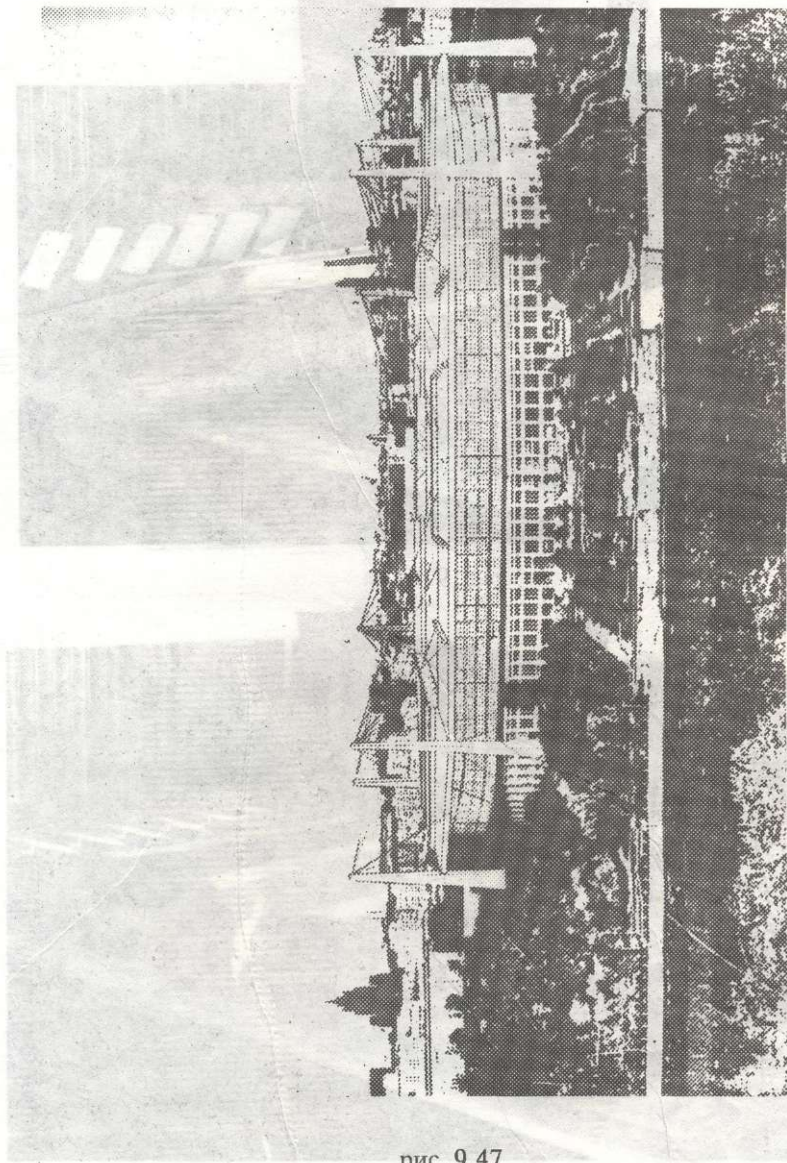


рис. 9.47

Э. В. МЕДВЕДЕВА И ДРУГИЕ. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ И НАЗЕМНЫЕ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ СИСТЕМЫ

Э. В. МЕДЗ. ДАРШАВИЛИ ✧ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ

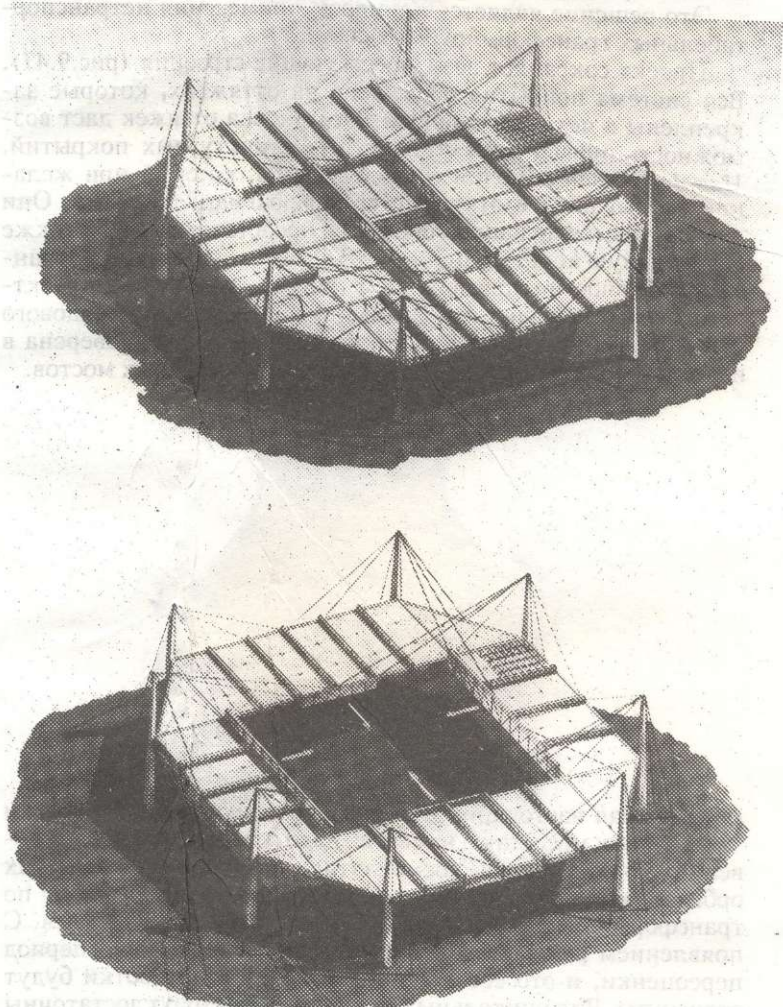


рис. 9.48

конструкций хотелось бы завершить описанием решения конкурсного варианта раскрываемого покрытия центрального стадиона в Лужниках в г. Москве.

Это решение является примером применения нетранспортабельных трансформируемых систем.

Проект сохраняет все существующие строения (рис.9.47). Вся система покрытия подвешена на оттяжках, которые закреплены в четырех пилонах. Расстановка оттяжек даст возможность применения стандартных структурных покрытий. Над футбольным полем оставлен проем, который при желании закрывается и открывается диафрагмами-дисками. Они передвигаются по направляющим и представляют собой также структурную конструкцию (рис.9.48). Реальность такой трансформативности с применением тросово-лебедочной и электромеханической системы доказана при создании стендового испытательного комплекса, а надежность схемы проверена в известных решениях уникальных большепролетных мостов.

Оценивая настоящий этап развития строительной техники как в космосе, так и на земле, надо сказать, что с возникновением новых задач космонавтики по созданию больших орбитальных сооружений отмечался бум в области работ по трансформируемым системам. Сейчас темп этот снизился. С появлением реальных ответственных задач наступил период переоценки, и это естественно. Фальш и недоработки будут отщипнуты. Для уникальных конструкций не будут достаточны только хорошие идеи и даже прекрасные исследования, а потребуется систематизация и практический труд – такова специфика строительства. Так было на земле и так будет в космосе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследований и проведенных работ, частично изложенных в книге, решены теоретические, конструкционные и практические задачи, которые заключаются в следующем:

- Разработана теория трансформируемых систем как геометрическая и физическая модель формообразования т.н. развертываемых конструкций. Они на данном этапе развития космической техники и, в целом для орбитальных автоматических режимов, а также в наземных экстремальных и неординарных ситуациях являются приоритетными.
- Определен и проанализирован класс каркасно-опорных конструкций как конкретное направление трансформируемых систем, структура которого отвечает многим требованиям создания прецизионно-силовых больших космических конструкций.
- Разработаны новые конструкции класса каркасно-опорных трансформируемых систем для больших радиотелескопов и других инженерных сооружений космического и наземного базирования.
- Определены принципы конструкторского и технологического обеспечения и построения комплексов больших космических радиотелескопов.
- Разработаны и созданы конструкции вариантов и базового образца трансформируемого космического радиотелескопа диаметром зеркала 30 метров, работающих в диапазоне дециметровых и сантиметровых радиоволн и не имеющих аналогов в мировой практике.
- Разработаны методики расчетов и проведены теоретические исследования на динамические, статические и температурные, внешние и наружные воздействия каркасно-опорных конструкций трансформируемых радиотелескопов на стадиях развертывания и функционирования в космосе. Одновременно с этим установлены геометрические силовые и временные параметры кинетических процессов, которые являются теоретической базой конструирования и проектирования системы.
- Сформулированы принципы построения и создан уникальный наземный универсальный стендовый

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

комплекс сборки, монтажа и испытаний больших космических конструкций и радиотехнических систем, состоящий из гидробассейна, стенда прецизионной сборки, большого стенда развертывания и поворотного устройства для проверки радиотехнических параметров антенн космического базирования.

- Определены методики наземных испытаний трансформируемых космических конструкций и проведены экспериментальные исследования моделей вариантов конструкции и полномасштабного базового образца космического радиотелескопа диаметром зеркала 30 метров.
- Циклы экспериментальных исследований доказали взаимосвязь теоретических исследований с практикой, надежность, прочность и жесткость конструкций на стадиях транспортировки, развертывания и функционирования, а также технологичность конструкции и правильность способов ее изготовления, сборки и монтажа.
- Существование теоретического базиса методов экспериментальных исследований и наземного стендового комплекса определили внедрение результатов работ в научные, технические и реальные орбитальные программы создания в космосе инженерных конструкций.
- Разработан, изготовлен и испытан новый класс космических и наземных перспективных систем космического и наземного базирования в виде радиотелескопов нового поколения, каркасов станций, солнечных батарей и концентраторов, развертываемых мостов, перебазируемых остроуправленных антенн, покрытий и других конструкций, а также создана база для испытания инженерных трансформируемых сооружений на климатометеорологические воздействия и способов транспортировки и функционирования в труднодоступных местах.

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Андерсен М.С. Колебания предварительно напряженных решетчатых конструкций. Ракетная техника и космонавтика, 1982, т. 20, № 5, стр. 78–83.
2. Багдаришвили Н.Е. Архитектурное формообразование зрелищных и спортивных сооружений с динамическими покрытиями. – Тбилиси "Мецниереба" 1977, 260 с.
3. Белвин В.К. Теоретическое и экспериментальное исследование характеристик вибрационного поведения и устойчивости стоек с предварительно натянутыми оттяжками. Аэрокосмическая техника, 1985, № 6, стр. 9–18.
4. Беляков И.Т., Борисов Ю.Д. Некоторые проблемы сборки и обслуживания объектов в космосе. – В сб. Научные чтения по авиации и космонавтике. – 1973. – М., 1980. – с. 94 – 99.
5. Бемянский П.В., Кришмановский В.А. Проблемы управления большими космическими антеннами. Зарубежная радиоэлектроника. 1984. № 6. с. 43 – 55.
6. Бемянский П.В., Терехова Г.А. Методы измерения отклонений профиля отражающей поверхности больших наземных и космических антенн. Зарубежная техника. 1985., № 2, стр. 68 – 83.
7. Бемянский П.В., Мустафаев М.И. Управление формой отражающей поверхности больших космических антенн. Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 5, с. 61 – 70.
8. Береговой Ф.Г., Джаникашвили М.В., Медзмаришвили Э.В., Чернявский А.Г., Якобашвили А.Т. Экспериментальные исследования замкнутого развертываемого контура в системе весовой разгрузки. – XVIII Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации. – М. 1988. 4 – 8 апр., п/с Технология сборки и испытания, с. 12 – 13.
9. Богданов Ф.Г., Кеванишвили Г.Р., Медзмаришвили Э.В. и др. Дифракция плоской волны на системе из диэлектрического слоя и решетки. – Радиотехника и электроника. – Москва. АН СССР. 1987, Отд. вып. № 8, том XXXII, 4 с.
10. Богданов Ф.Г., Медзмаришвили Э.В., Зеркальные радиотелескопы. – Грузинский политехнический институт 1989, 80 с.

## БИБЛИОГРАФИЯ

11. Богомолов А.Ф., Букарев Н.В., Баженцев Г.Н., Космическая складная антенна. – В кн. : Антенны. Сборник научных статей. М. : Радио и связи, 1981, вып. 29, с. 10 – 20.
12. Булатов Г.А. Полууретаны в современной технике. Москва, Издательство "Машиностроение", 1983.
13. Бураков В.А. Применение гибких оболочек на транспорте. – Москва "Транспорт", 1974, 128 с.
14. Бучанан Г.Дж., Шок Р.У., Уайтес Г.Б. Орбитальный эксперимент для исследования динамики и управления больших конструкций. Аэрокосмическая техника, 1985. № 6, стр. 147 – 158.
15. Вада Б.К., Куин К.Н., Клейзер Р.Дж. Наземные испытания больших космических конструкций. Аэрокосмическая техника, 1986. № 9, стр. 189 – 195.
16. Веннинджер М. Модели многогранников. – Москва. "Мир". 1974. 236 с.
17. Воеводин А.А. Шпренгельные радио-мачты. Москва. "Радио и Связь". 1981 г.
18. Вэнг С.Д., Камерон Д.М. Динамика и управление большой космической антенной. Аэрокосмическая техника. 1985, № 3, стр. 30 – 39.
19. Гармония форм в живой природе и в архитектуре. Составители Лебедев Ю.С., Белявский И.И. /Москва, ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре, 1976. – 50 с.
20. Гвамичава А.С., Кошелов В.А., Строительство в космосе. Серия – Космонавтика. Астрономия. 1984, № 9 М. "Знание 1985. 64 с.
21. Глазерман Е.Г. и др. Космические антенны второго поколения. Зарубежная радиотехника. 1981. № 8, с. 93 – 106.
22. Голованов Я.К. Архитектура невесомости. – Москва. "Машиностроение". 1978. 79 с.
23. Голотюк С.В., Паис Э.В. Большие космические конструкции и основные положения по моделированию и сборке в гидросреде. Тематический сборник научных трудов. – Моделирование космических операций в условиях гидроневесомости и динамика движения подводных аппаратов. Москва 1985, стр. 7 – 14.
24. Гришес В.А. Солнечные космические энергостанции. Ленинград. Издательство "Наука", Ленинградское отделение, 1986.



25. Данилов Ю., Кулешов Ю., Рудаков В., Первый космический радиотелескоп. – Наука и жизнь. 1979, № 11, с. 2 – 6.
26. Данилов Ю., Бурдаков И. Индустрия в космосе. – Москва. : "Машиностроение". 1979.
27. 90 лет радио. Под редакцией Фортуненко А.Д. и Быкова В.Л. – Москва "Радио и связь". 1985. 230 с.
28. Дру Дж.О., Су З.В., Фанг К.К., Бодлин К. Эквивалентное представление сплошными телами конструкций, состоящих из повторяющихся элементов. Аэрокосмическая техника, 1986. № 12, стр. 125 – 132.
29. Инженерный справочник по космической технике. – М. : Воениздат, 1977. – 430 с.
30. Кардашов Н.С., Рарийский Ю.Н., Соколов А.Г. Космическая радиоастрономия. – Успехи физических наук, 1971, № 10, с. 328 – 330.
31. Колейчук В.Ф., Лебеда Ю.С. Новые архитектурно-конструктивные структуры. – Москва. "Стройиздат". 1978. 65 с.
32. Колейчук В.Ф. Новейшие конструктивные системы. – Москва. "Знание". 1984, 200 с.
33. Курт Зигель. структуры и форма в современной архитектуре. – Москва. Стройиздат. 1963. 267 с.
34. Ланжеро Р. Франция в космосе (1962 – 1987), журнал "Аэрокосмическая техника" № 8, 1987, стр. 140 – 158.
35. Лебедев Ю., Вознесенский С., Гоциридзе О. От биологических структур к архитектуре. – Москва. "Знание". 1971. 35 с.
36. Лебедев Ю.С. Архитектура и техника. Москва. "Знание". 1975. 64 с.
37. Лиапницкий М.Е. Купола. – Ленинград. Стройиздат. 1973. 127 с.
38. Лосман В.И., Гряник М.В. Развертываемые антенны СВЧ диапазона. Зарубежная радиоэлектроника № 7, 1979, с. 68 – 94.
39. Лукьянов А.В. Исследования по теории больших конструкций в космосе. Часть I – Световое и радиационно-гравитационное управление ориентацией. – МГУ им. М.В. Ломоносова, М., 1977, 35 с.

40. Лукьянов А.В. Исследование по теории больших конструкций в космосе. Часть 2—Сверхлегкие стержни, блоки и программно ориентируемые отражатели и коллекторы. МГУ им. М.В. Ломоносова. Москва. 1977. 75 с.
41. Лукьянов А.В. Исследования по теории больших конструкций в космосе. Часть 3, Многоблочные конструкции. МГУ им. М.В. Ломоносова. Москва. 1977. 92 с.
42. Мардер А.П. Металл в архитектуре. Москва. Стройиздат. 1980. 320 с.
43. Медзмариашвили Э.В. Трансформируемые системы. — Тбилиси, АН СССР, НПО "Прогностика и перспективные НИОКР", 1990. — 75 с.
44. Медзмариашвили Э.В., Савин А.И., Лоладзе Т.Н., Данилов Ю.И., Заксон М.Б., и др. Экспериментальный космический комплекс с трансформируемым радиотелескопом диаметром зеркала 30 метров и наземный комплекс для его испытания. — Научные труды СКБ — Тбилиси, Специальное конструкторское бюро при ГПИ, 1988, Сборник № 1, с. 6 — 33.
45. Медзмариашвили Э.В., Савин А.И., Лоладзе Т.Н., Тусишвили О.Ш., Джаникашвили М.В., Наземная, перебазируемая полноповоротная трансформируемая радиоантенна — "НПР" диаметром зеркала 12 м — Научные труды СКБ — Тбилиси, Специальное конструкторское бюро при ГПИ, 1988, Сборник № 1, с. 208 — 215.
46. Медзмариашвили Э.В., Якобашвили А.Т., Заксон М.Б., Богданов Ф.Г. Критерии выбора принципиальной схемы наземных радиотехнических испытаний трансформируемых антенн. — Научные труды СКБ — Тбилиси, Специальное конструкторское бюро при ГПИ, 1988, Сборник № 1, с. 147 — 152.
47. Медзмариашвили Э.В., Бедукадзе Г.В., Джаникашвили М.В., Хатиашвили Н.И., Якобашвили А.Г. Экспериментальное исследование фрагментов трансформируемого радиотелескопа. — Научные труды СКБ. — Тбилиси, Специальное конструкторское бюро при ГПИ, 1988, Сборник № 1, с. 143 — 146.

48. Медзмариашвили Э.В., Даташвили Л.Ш., Церодзе Ш.П., Газашвили В.Ш., Гогова Э.В., Саникидзе М.М. Перспективные разработки крупногабаритных трансформируемых радиотелескопов космического базирования. – Научные труды СКБ. – Тбилиси, Специальное конструкторское бюро при ГПИ, 1988, Сборник № 1, с. 153 – 189.
49. Медзмариашвили Э.В., Размадзе А.Н., Кипиани Н.В. и др. Новые оптимальные пространственные комбинированные шпренгельные и арочные фермы – Сборник статей научно-технической конференции “Металлические конструкции” – Варшава, 1974, с. 287 – 305.
50. Медзмариашвили Э.В., Размадзе А.Н., Сохадзе А.П. Комбинированно-комплексное покрытие. – Научные труды “Строительство” – Тбилиси, Грузинский политехнический институт, 1974, Сборник № 5 (169), с. 40 – 43.
51. Медзмариашвили Э.В., Чаладзе Р.В., Сургуладзе Б.А. Новый вид пространственного комбинированно-комплексного (структурного) покрытия. – Научные труды “Металлические конструкции” – Тбилиси, Грузинский политехнический институт, 1977, Сборник № 1 (192), с. 10 – 13.
52. Медзмариашвили Э.В., Адеишвили М.Н. Новое транспортабельное сталежелезобетонное покрытие – Научные труды “Строительные конструкции” – Тбилиси, Грузинский политехнический институт, 1981, Сборник № 11 (247), с. 14 – 20.
53. Медзмариашвили Э.В., Авалишвили Л.Н. Сборная конструкция покрытия без применения типовых ферм. – Научные труды “Технология строительства” – Тбилиси, Грузинский политехнический институт, 1981, Сборник № 13 (245), с. 23 – 31.
54. Медзмариашвили Э.В., Данилов Ю.И., Джаникашвили М.В. и др. Исследование крупногабаритной разворачиваемой антенны. – Тезисы докладов XXV Всесоюзной межотраслевой научно-технической конференции “Теория и техника антенн”. – Москва, 1987, 24 – 25 ноя., часть I, с. 4–5.

55. Медзмаришвили Э.В., Патон Б.К., Семенов Ю.П., Чернявский А.Г. и др. Теоретическое и экспериментальное исследование раскрытия и динамики протяженных кольцевых конструкций на грузовом корабле "Прогресс-40" – Тезисы докладов научно-технической конференции "Крупногабаритные космические конструкции" – Севастополь, 1990, 15–16 ноя., с. 71.
56. Медзмаришвили Э.В., Савин А.И. и др. Радиотелескопы космического базирования. – Тезисы докладов научно-технической конференции "Крупногабаритные космические конструкции" – Севастополь, 1990, 15–16 ноя., с. 67–68.
57. Медзмаришвили Э.В., Савин А.И., Заксон М.Б. и др. Экспериментальный комплекс для наземных испытаний крупногабаритных инженерных сооружений космического базирования. – Тезисы докладов научно-технической конференции "Крупногабаритные космические конструкции" – Севастополь, 1990, 15–16 ноя., с. 68–69.
58. Морозов А.П., Василенко В.О., Миронов Б.А. Пространственные конструкции общественных зданий. Ленинград. Стройиздат. 1977. – Конкретные конструкции. 168 с.
59. Мышонкова Н.В. Экспериментальное исследование складных антенн. – В кн.: Развитие конструктивных форм и методов расчета металлических конструкций инженерных сооружений типа антенных устройств и опор. Труды ЦНИИПСК.М., 1981, с. 115 – 118.
60. Никравич П.И. Динамический анализ крупномасштабных механических систем и компьютерная мультипликация. Аэрокосмическая техника, 1985. № 12, с. 151 – 158.
61. Ольков Я.И., Холопов И.С. Оптимальное проектирование металлических предварительно напряженных ферм. Москва, Стройиздат, 1985. 156 с.
62. Отто Ф., Шлейер К. Тентовые и вантовые строительные конструкции. – Москва. Стройиздат. 1970. 175 с.
63. Патури Ф. Растения-гениальные инженерные приводы. – Москва. "Прогресс". 1982. 271 с.

64. Патрушев В.И., Бачурко В.И., Голотюк С.В., Иванов В.М. Сборка больших конструкций на орбите и гидросреде. Тр. 19 чтения, посвященные разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, Калуга 17–20 сент., 1984, Москва, 1986. с. 75 – 82.
65. Прац Дж., Редди А.Д., Рефилд Р.У., Труделл Р.У. Экспериментальное определение характеристик пассивного демпфирования соединений для космических конструкций. Аэрокосмическая техника, 1987. № 7, с. 112 – 121.
66. Русаков А.А. Экспериментальный искусственный спутник Земли АТ – 6. – Зарубежная промышленность, 1975. № 8, с. 3 – 22.
67. Рюле Г. Пространственные покрытия. – Москва, Стройиздат, 1974. 245 с.
68. Самоцветов А.В., Раскладные антенные конструкции. Сборник рефератов изобретений, СССР, США, Англии, ФРГ и др. стран (выборочно за 1957 – 1978 гг. 155 изобретений), ОНТИ – 1978. 103 с. Москва.
69. Самоцветов А.В. Зеркальные антенны, сборник изобретений СССР, США, ФРГ, Франции, Великобритании, Японии, Швейцарии и др. стран за 1960 – 1977 гг. (598 изобретений), Москва, ОНТИ – 1979, 375 с.
70. Соколов А.Г., Гвамичава А.С. Решение инженерных конструкций космических радиотелескопов. В кн.: Антенны. Сб. научных статей. М.: Радио и связь, 1981. вып. 29, с. 3 – 10.
71. Темнов В.Г. Конструктивные системы в природе и строительной технике. – Ленинград. Стройиздат. 1987. 256 с.
72. Трансформируемые конструкции. Под общей редакцией Медзмаришвили Э.В. – Научные труды Института космических сооружений. – Тбилиси, Грузинский политехнический институт. Сборник № 1. 1988. 282 с.
73. Трофимов В.И., Бегун Н.Б. Структурные конструкции. – М. : Стройиздат, 1972 – 272 с.
74. Трубицын Г.М. Мезенцева Б.С. Типы жестких трансформируемых ограждающих конструкций. В журнале Строительство и архитектура Узбекистана. 1981. № 7. с. 21 – 25.

75. Тушев А.Г. Пространные металлические конструкции – Москва. Стройиздат. 1975. 215 с.
76. Уайт Б., Фурумото Н., Бэнерджи Э., Барбе Б. Моделирование в расчет динамики развертывания панелей солнечных батарей космического аппарата "Аэрокосмическая техника № 5, 1987. с. 161 – 169.
77. Уикс Дж.Е. Динамический расчет развертываемой космической конструкции. Аэрокосмическая техника. № 12, 1986. с. 168 – 175.
78. Хаттон Д.В. Исследование собственных колебаний развертывающихся форм методом конечных элементов. Аэрокосмическая техника, 1985. № 6, с. 3–9.
79. Христиансен У., Хегбом И. Радиотелескопы. – Москва "Мир". 1988. 304 с.
80. Хук Ф.Х. Новый взгляд на надежность конструкций и теорию риска. Ракетная техника и космонавтика, 1979., т. 17, № 9, с. 65 – 76.
81. Чен Дж. Динамика больших космических конструкций с управляемой жесткостью. Аэрокосмическая техника. 1985. № 6 с. 37 – 43.
82. Чжайхун Ю. Оптимизация применяемых в космических конструкциях стоек в виде треугольных решетчатых форм с трубчатыми стержнями. Ракетная техника и космонавтика. т. 17, № 8, 1979, с. 153 – 158.
83. Шахтер Д.Б., Элдред Д.В. Эксперимент по управлению нежесткой конструкцией. Аэрокосмическая техника. 1985. № 6, с. 158 – 167.
84. Шичанин В.Н., Алпатов А.П., Белоножко П.А. и др. Разработка программ расчета и численное моделирование тепловых деформаций элементов конструкций. Отчет НИР. Рег. № 136. Днепропетровск. Институт технической механики АН Украины, 1991, 224 с.
85. Янг Дж.Н., Хорта Г.Л. Эксперимент по управлению поворотом упругих конструкций. Аэрокосмическая техника. 1987. № 6, с. 157 – 168.
86. Японские космические проекты. БИНТИ ТАСС. – 1986. – № 33, с. 9.
87. А.С. 707210 (СССР), Мост./ Медзмаришвили Э.В. – Оpubл. в Б.И. 1979. № 40.

88. А.С. 749127 (СССР) Пролетное строение колейного моста. / Медзмариашвили Э.В., Адеишвили М.Н. – Оpubл. в Б.И. 1980, № 26.
89. А.С. 1011820 (СССР). Покрытие. / Медзмариашвили Э.В., Адеишвили М.Н. – Оpubл. в Б.И. 1983, № 14.
90. А.С. 107211 (СССР) Складной каркас зеркала антенны. / Медзмариашвили Э.В., Лоладзе Т.Н., Савин А.И., Данилов Ю.И. Заксон М.Б., Хачидзе Н.А. – Оpubл. в Б.И. 1984, № 57
91. А.С. 1106390 (СССР). Раскладной рефлектор / Медзмариашвили Э.В., Саралидзе Р.А. – Оpubл. в Б.И. 1984, № 28.
92. А.С. 232040 (СССР). Складной космический радиотелескоп / Медзмариашвили Э.В., Савин А.И., Лоладзе Т.Н., Данилов Ю.И. Заксон М.Б., Саралидзе Р.А., Митрякович Л.В. – 1985.
93. А.С. 239070 (СССР). Развертываемый рефлектор / Медзмариашвили Э.В., Лоладзе Т.Н. Савин А.И., Данилов Ю.И., Заксон М.Б. и др. 1986.
94. А.С. 1092259 (СССР). Складное сборно-разборное покрытие зданий и сооружений. / Медзмариашвили Э.В., Салуашвили М.Э. – Оpubл. в Б.И. 1987, № 18.
95. А.С. 1361267 (СССР). Складная секция сводчатого покрытия / Медзмариашвили Э.В., Салуашвили М.Э. – Оpubл. в Б.И. 1987, № 47.
96. А.С. 291260 (СССР). Раскладной каркас рефлектора / Медзмариашвили Э.В., Лоладзе Т.Н., Савин А.И., Данилов Ю.И., Заксон М.Е. – 1989.
97. А.С. 1753908 (СССР). Складной рефлектор / Медзмариашвили Э.В., Тусишвили О.Ш., Джаникашвили М.В., Гагнидзе Г.М. – 1989.
98. А.С. 298726 (СССР). Раскладной каркас отражателя / Медзмариашвили Э.В., Церодзе Ш.П., Даташвили Л.Ш., Гогова З.В. – 1989.
99. А.С. 318343 (СССР). Развертываемый каркас рефлектора / – Медзмариашвили Э.В., Кизирия Г.В., Гогова З.В. – 1990.
100. А.С. 321275 (СССР). Складной рефлектор/ – Медзмариашвили Э.В., Тусишвили О.Ш., Джаникашвили М.В., Гагнидзе Г.М., – 1990.

## БИБЛИОГРАФИЯ

101. А.С. 330670 (СССР). Складная длинномерная ферменная конструкция / Медзмаришвили Э.В., Мелкадзе Т.В., Мгалоблишвили М.Г., Наскидашвили Ш.С., Сутидзе Д.В., Гомелаури Г.М., Авалиани С.И. – 1991.
102. А.С. 1628429 (СССР). Сборная стержневая ферменная конструкция и способ ее монтажа / Медзмаришвили Э.В., Арчвадзе Г.Я., Джаникашвили М.В., Кривченко Ю.Д., Черняковский А.Г. и др. – Оpubл. в Б.И. 1991, № 6.
103. А.С. 1807824 (СССР). Раскладной параболический рефлектор / – Медзмаришвили Э.В., Гомелаури Г.М., Савин А.И., Данилов Ю.И., Заксон М.Б., Сыромятников В.С., Беликов Э.М. и др. – 1992.
104. А.С. 1797162 (СССР). Складной рефлектор. / Медзмаришвили Э.В., Даташвили Л.Ш., Хачидзе Н.А., Гогавя З.В., Гигинеишвили Л.З. и др. – 1992.
105. А.С. 1817504 (СССР). Трансформируемая пространственная конструкция / Медзмаришвили Э.В., Джаникашвили М.В., Кривченко Ю.Д., Цагнадзе Н.Г., Черняковский А.Г. – 1992.
106. А.С. 1762716 (СССР). Развертываемый рефлектор. / Медзмаришвили Э.В., Лоладзе Т.Н., Савин А.И., Данилов Ю.И., Заксон М.Б. и др. – 1992.
107. А.С. 1802661 (СССР). Раскладной каркас отражателя / Медзмаришвили Э.В., Церодзе Ш.П., Даташвили Л.Ш., Гогавя З.В. – 1992.
108. А.С. 1743471 (СССР). Устройство для защиты от града виноградных насаждений. / Медзмаришвили Э.В., Салуашвили М.Э., Эсванджия В.В. – Оpubл. в Б.И. 1992 № 24.
109. А.С. 408999 (СССР). Пространственная арочная ферма / Размадзе А.Н., Медзмаришвили Э.В. – Оpubл. в Б.И. 1973, № 48.
110. А.С. 1243498 (СССР). Космическая антенная система / Савин А.И., Данилов Ю.И., Заксон М.Б., Лоладзе Т.Н., Медзмаришвили Э.В. и др. – Оpubл. в Б.И. 1986 № 28.
111. Aguirre-Martinez M.A. ESA – Sponsored Developments in the field of Deployable Masts. ESA Journal, vol. №9, 1985 pp. 313–321.



112. Bertram A. Dynamic qualification of large space structures by means of modal coupling techniques. *Acta astronaut.* 1980, 7, № 10, 1179–1190 pp.
113. Bush H.G., Mikulas M., Heard W.L. Some design considerations for large space structures. AIAA/ASME 18th struct., struct. dyn. and mater. Conf., AIAA Aircraft Compas: Emerging Meth. Struct. Assur. San Diego, Calif., 1977, vol. A.s.l. 1977, 186–196.
114. Dragomir Virgil, Gheorghiu Adrian. Representation geometrique des structures spatiales. *Cahiers du untred etudes architecturales.* Bruxells 1970, 112.
115. Fager J.A. Garriott R. Large-aperture expandable truss microwave antenna. *IEEE. Trans.*, 1969 July, AP-17, № 4, 452–458.
116. Fearn D.G. A Review of Future Orbit Transfer Technology. *Journal of the British Interplanetary Society*, vol.35, pp.304–325, 1982.
117. Hoff N.J., Fernandes-Scutes J. Kinematically unstable space frameworks. *Mechanics Today*, 1980, 95–111 pp.
118. Leipholz H.E. Structural control. Symposium on Structural Control held at the University of Waterloo. Ontario, Canada, June 4–7, 1979, 25c.
119. Madewell J.F. and Sexton R.E. Space stations for the international ruturs. *Space World*, vol 9, № 165, Sept. 1977, pp. 4–40.
120. Medzmariashvili E., Jakobashvili A., Beducadze G. Constructions and ground testing of large high precision space structures.
121. Elgudja Medzmariashvili, Alexander Iacobashvili, Guram Beducadze. Creating and Testing Large Space Structures of High Precision Surface. *Space Power*, vol 1&2, 1993.
122. Morgan L.M., Burton J.B. The orbital ante na form concept. *Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 32, 1979, pp. 243–254.
123. Morry R. From Eureka – A to Eureka – B. *ESA Bulletin* 1987, № 50, pp. 24–31.
124. Rene Sarger. Structures nouvelles. *Cahiers du centre d'etudes architecturales.* Bruxelles. 1967, 45.
125. Richard L. Kline. Construction of Large Structures in Space. *The Journal of the Astronautical Sciences*, vol. XXVII, № 4, pp. 401–418. Oct. – 1979.

126. Stephane Du Chateau. Structures spatiales. Cahiers du centre d'etudes architecturales. Bruxelles, 1967, 47.
127. Robichon Roger. Structures tendues et pretendues. Cahiers du centre d'etudes architecturales. Bruxelles, 1967.
128. Waites H.B., Seltzer S.M., Follison D.K. NASA/MSEG ground experiment for large space structures control verification. AJAA PAP 1985, № 115, p.12.

# Brief content and importance of the book "TRANSFORMABLE SPACE AND GROUND CONSTRUCTIONS" by E.V. Medzmariashvili

The conquest of outer space and development of space engineering are connected with building large engineering structures in space. With the progress of astronautics, we will solve civil, defense and other special problems with the aid of space structures which, along with the aid of space structures which, along with air-borne vehicles, will be the central task in realizing a multitude of space programs.

Production process, power generation, study and control of earth, water, atmospheric, flora and fauna parameters, astronomy, communication, radio and TV-broadcasting, detection of moving and stationary underwater objects and many other aspects of human activities, including the development of planets, demand the erection in orbits of large engineering structures.

The book gives a detailed account of the theoretical fundamentals, constructional logistics, new systems, experimental research and ground facilities for manufacturing and testing the specimens of large engineering objects designed for the work in space.

Many-year studies have led to creating the shape transformation theory which is expounded in this book. This theory forms the scientific basis for building and operating unfoldable structures in space and in extreme conditions on the earth.

The book contains quite a number of novelties of theoretical and applied value. A class of unfoldable load-bearing framework systems was determined, which made it possible to formulate the basic principles of designing space and ground

structures considered in the book.

Based on the generalized theoretical models and transformable systems, a new class of load-bearing skeleton structures was developed with regard to the conditions of their application. These new structures are supposed to be very helpful in solving a lot of engineering problems connected with the erection in orbits of large precision and load-bearing structures.

The book suggests several design modifications of transformable space radiotelescopes with a mirror diameter up to 30 m which can be operated in decimetre and centimetre radiowave length ranges and hence are well suitable for modern booster-rockets and spaceships.

A transformable radiotelescope specimen with a mirror diameter of 30 m was manufactured, using data provided by the analysis of the developed radiotelescope design modifications incorporating supporting frames, as well as prestressed, combined, self-regulated, planar-leafed flexible rope-supported systems which impart to the radiotelescope such features as reliability, precision and strength.

The book suggests the methods and principles of building a traditional space complex working in the off-line mode and consisting of a transformable radiotelescope with a mirror diameter of 30 m. Also, the geometrical model is proposed for the transformable screen cloth, taking into account technological and physico-mechanical properties of the material, which makes it possible to increase the reflective capacity of the screen, to reduce the material consumption and weaken the action of the stretched screen cloth on the mirror frame.

The methods for designing radiotelescope constructions were developed with regard to dynamic, static and temperature influences occurring during the transformation and functioning of radiotelescopes in outer space. Furthermore, these methods take into account the kinetic and kinematic aspects of the processes so as to enable one to control the configuration parameters of the antenna, general and local stability of its members, and also to calculate stresses.

Using the developed methods and standard software, a

theoretical study was conducted to determine load-bearing, geometrical and time parameters of the unfolding and functioning processes of the radiotelescope under internal and external influences. The study led to the formation of a database for designing the base specimen of an unfoldable 30 m radiotelescope and its modification.

The book gives the guidelines for designing and building a ground complex for the assembly of large space constructions for load-bearing, supporting and radioengineering systems and their testing in conditions simulating the space situation with the aim of changing the characteristics of the antenna without changing its "space" configuration.

The principles expounded in the book under the stand-test complex built in Georgia. The availability of such a complex is an obligatory condition for implementing the task of manufacturing and testing on the ground the specimens of constructions to be stationed in space.

Methods are suggested for conducting ground experimental studies of transformable space radiotelescopes by subjecting them to bench-tests at mechanical loading. Models, design modifications and the base specimen of a space antenna with a mirror diameter of 30 m, as well as other systems were tested by hydrosimulating the state of weightlessness, and afterwards were placed in space orbits.

New transformable structures of ground and space application were designed, manufactured and tested and the book gives reasons why these structures have good prospects and lists the fields of their application.

New transformable structures of ground and space application were designed, manufactured and tested and the book gives reasons why these structures have good prospects and lists the fields of their application.

A ground quickly-restationed transformable radiotelescope with an autonomous shelter and a mirror diameter of 12 m has been designed to operate in the decimetre radiowave range.

A special court was built for testing transformable ground

engineering structures for climatic and meteorologic influences and extreme transportation conditions in hardly accessible localities.

Design modifications of drawbridges, civil and agricultural structures are developed and new promising designs of radiotelescopes, solar batteries and load-bearing frames for space stations are proposed.

The book further considers the importance of transformable structures in space engineering, the interconnection of the traditional construction methods with space engineering techniques. Much attention is given to practical problems and prospects of creating large orbital engineering structures.

Quite a number of researchers, experts and engineers made their respective contributions to the subject-matter of the book as well as to the implementation of the results obtained. Among them are N.V. Banichuk, V.A. Blagov, A.F. Bogomolov, V.L. Bikov, S.A. Gvamichava, **Yu.I. Danilov**, M.B. Zakson, D.M. Klimov, Yu.N. Kopten, N.S. Kardashov, T.N. Loladze, L.S. Medlev, Yu.N. Glazunov, A.I. Savin, G.F. Samoilovich, Yu.P. Semenov, A.G. Sokolov, V.S. Siromyatnikov, B.E. Paton, V.I. Usyukin, G.M. Chernyavski and others.

A greater part of research was accomplished and the obtained results were implemented through collaboration of the Institute of Space Constructions of the Georgian Technical University under the Science and Technology Committee of the Republic of Georgia with the Central Research-and-Production Association "Kometa" of the Defence Industry Committee of the Russian Federation, also with the Research-and-Production Association "Energia".

Quite a number of organizations from different countries provided technical, technological and theoretical assistance and hence participated in designing and manufacturing unique engineering construction specimens, in building unique experimental centres, and in formulating their scientific fundamental principles. Among these organizations are the Institute "Gruzgorproekt", Tbilisi Aircraft Production As-

sociation, "Gruzspetsmontazhstroy" concern, Moscow Aviation Association, Ukrainian Polytechnical Institute (Kharkov), Dnepropetrovsk Institute of Technical Mechanics of the Ukrainian Academy of Sciences, Siktivkar State University, Yerevan Polytechnical Institute, Khrunichev Plant in Moscow, Moscow Research-and-Production Association "Tekstilgalantereya", "Giproshakht", Tbilisi Power Engineering Institute, "Gruzelkhozstroy", the State Committee for Civil Engineering and Architecture, Rustavi Steel Construction Works, Rustavi Crane-Building Plant and others.

The book gives a conceptual evaluation of the space and ground engineering processes and related problems. The main accent is placed on the ability of constructions to transform their shape in extreme conditions, and also on the constructional architecture.

Reasons justifying the good prospects for transformable systems are given. However, the shape transformation principle advocated in the book does not exclude other methods of shape transformation of constructions in space orbits. Problems of creating large space structures have been considered from the functional, technical and engineering standpoints, which makes it possible to cover the entire range of the problems – from the desired operating parameters to the concrete design.

Various aspects have been considered exactly from the above standpoints, including various space problems, instrumental provision, solutions of technical problems, questions connected with the theory, technology and material study, experimental research, optimization, relativity and so on.

Much space of the book is taken up by theoretical research of transformation as a means of shape formation. Transformable systems are considered at the level of mathematical model using geometrical and physical parameters and defining their interconnection and regularities of changing in space. General criteria of transformable systems were determined by analogy with mechanisms, structures, combined systems so as to apply suitable terms and concepts for transformable systems. The latter systems are described as

"a set of elements interconnected with one another in the definite order so as to form the integrity characterized by many fixed and intermediate transformation forms which preserve the integrity of their interconnections, while the mutual arrangement of elements changes in space and in time".

Various aspects of shape-formation processes are considered - from functional requirements to bionic and technical methods, but in developing general principles the accent is placed on engineering systems. Possible shape-formation processes are modelled on system elements (N), on the structure (S) with its specific stable and unstable connections and two connection parameters: geometrical and mechanical.

A separate consideration is given to the structural aspect of transformable systems, taking into account changes that might occur both in the internal structure and in the external structure contour. The notion of "a base element" is defined, and the compatibility of shape-transformation of geometrically unchangeable systems with the developed general models is discussed.

Special importance is attached to the geometry of transformable systems and transient stages of shape-formation: linear, planar and spatial.

Much attention is given to defining the main parameters of transformable systems: field of definition, volume of definition, volume of overall packing, overall dimensions, packing density of a package, transformation value, linear, surface and volume multiplicity of transformation, transformation time, reduced mass, process orientation, transformation rate and others, which have practical importance.

Systems are classified as mobile, dynamic, prefab-transformable, solid, discrete, skeleton, arbitrary, uniform, non-uniform, isotropic and anisotropic transformable systems.

Classification of transformation by types and kinds is the basic one. Definitions are given for "organic" and "nonorganic" types of change of the "external" and "internal" one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional



shape, which in all design modifications refer only to three cases of shape-formation: spiral, pleated and layered. Along these directions investigations are accomplished by studying transformable "composite forms" and tiered systems.

The dynamic structure of transformable systems is described from the position of their gradation on driving, driven and load-bearing parts taking into account their compatibility, stationary and nonstationary behaviour.

The section devoted to the classification of transformable systems consists of three subsections dealing with: 1) geometrical principles of shape transformation processes; 2) unfolding load-bearing systems; 3) constructional criteria. Such an approach actually solves many questions connected with the elaboration of standard classification of transformable constructions by their constructional principles and load-bearing structures and is based on the traditional classifications of mechanisms and structures. As for geometrical and physical properties, transformable constructions are classified on the basis of analytical data. The developed theory of transformable systems form the scientific basis for the evaluation, analysis and development of conceptual schemes of unfoldable constructions of various applications.

One of the chapters of the book contains the general fundamental concepts of transformable systems. In particular, theoretical fundamentals of shape-formation are formulated for transformable systems. The logic of theoretical fundamentals of transformable systems applies to geometrical, kinetic and dynamical processes of building a structure, changing and fixing its shape. The developed model of transformable systems includes general criteria and shape-formation processes, analysis of structures and their geometry, defines the parameters and system varieties, types and kinds of shapes, a dynamic character of transformable systems and their classification principles. The theory of transformable systems is a methodical tool to be used in defining the purpose and type of constructional schemes to be used for the practical implementation of concrete large ground and space engineering constructions.

The shape-formation models proposed for transformable systems have changed the evaluation aspect of the traditional classification of processes of building structures in favour of prefabricated and monolithic construction, since the mathematical logic practically combines the fundamental processes of shape-formation by "monolithic" and traditional techniques.

The load-bearing transformable frames described in the book are regarded as the specific trend in the construction of transformable systems whose main structural parts are load-bearing frames, filling and contact zones. New load-bearing frame schemes have been developed, taking into account the results of study of the properties and peculiarities of the system.

Following the logic, transformable systems are called load-bearing frame systems if in their transformation zones certain unified structural zones have a lower degree of shape-formation freedom. It is these zones that are referred to as load bearing frames. The unified system together with a load-bearing frame consists of filling zones which are linked with the load-bearing frame by means of contact zones.

The conclusions refer to transformation processes and systems providing the static state and not to the construction equilibrium schemes which are considered quite comprehensively in the traditional construction literature.

Possible variants of unfolding are defined as being of load-bearing, load-free and combined types.

A separate analysis is performed of the design of load-bearing frames, filling and contact zones.

New solutions of constructional schemes are proposed for transformable load-bearing framed systems as separate class.

Comprehensive analysis of load-bearing framed systems as an independent trend in transformable system construction made it possible to describe transformable constructions as new multi-circular, meridial and radial, combined-circular, paired-circular, supporting cyclic (lococyclic), planar-struct-

tural, slip-way, spatial-structural, rope-suspended framed, rope-and-truss-suspended, rope-and-column-suspended, regular, combined-leafed, cyclic arched and made up of "flying" bars.

All materials collected in the book can be used as methodological guidelines in deriving real solutions of problems connected with designing large engineering constructions of ground or space application.

The findings can be summarized as follows:

- The developed general principles of building geometric, kinematic and dynamic model of transformable configuration were used to define and analyze transformable load-bearing framed systems as a unified trend.
- A structural analysis was performed of load-bearing frames as regards their shape-formation in space and kinetic peculiarities of geometry of transformation processes.
- Peculiarities of the realization of structural schemes of supporting frames have been defined.
- The systematization of filling and contact zone structures is done on the basis of kinematic analysis, load-bearing processes and constructional peculiarities.

Constructional schemes and principal estimates are proposed for new efficient constructions which are regarded as a unified class of transformable load-bearing framed systems.

The consideration of new design versions of transformable load-bearing framed constructions leads to the solution of methodological problems connected with their classification. The developed theoretical questions and new constructional schemes form the methodological system and schematic basis for estimating and creating real optimal transformable load-bearing framed constructions to be used in space and on the earth.

A considerable part of the monograph deals with the basic principles of designing a space transformable radiotele-

scope KTPT-30.

The statement of the problem and choice of the basic trends of its solutions are approached taking into account special requirements for design, placing, unfolding and functioning in space orbits of large unfoldable constructions with a screen having a large surface area.

Such a statement of the problem made it possible to systematize the obligatory properties of the structure and, accordingly, to make the logical conclusions as to their realization which are best suitable for transformable load-bearing framed systems, or, to be more exact, to circular constructions.

Concepts of interconnecting the antenna with an airborne vehicle, also of building original autonomous orbital radio-engineering complexes with large high-directional antennas were on the basis of constructional peculiarities of circular transformable systems.

A separate consideration is given to possible schemes of load-bearing frames of transformable radiotelescopes, taking into account their performance efficiency in space and the use of rope-and-bar-suspended, truss-suspended, framed, combined and prestressed solutions.

Special attention is given to the development of a class of basic constructional schemes of space transformable radiotelescopes KTPT-30 with a mirror diameter of 30 m. The building of such constructions is based on new solutions of problems of constructing systems with a rope-and-bar suspended cupola or systems of the prestressed cyclic-leaved and combined "tiered" and two-layer types.

The structural components of a transformable radiotelescope with a mirror diameter of 30 m are discussed. The principal diagram of the developed design versions consists of a supporting ring, stretched centre and truss supports of the antenna feed. The ring is unfolded by a mutually duplicated mechanism consisting of electrosides and elastic members. The antenna feed supports and the ring employ the principle of the synthesis of transformation of pantographic mechanisms and truss structure.

Antenna design variants differ mainly in schemes of the central part which is the precision frame on which the antenna screen is fixed.

A rope-and-bar supported structure was invented, embodying the idea of a cupola made of flexible fibres and short bars in the form of "flying" members not contacting with one another. Such a structure is a tiered system, where, irrespective of an antenna diameter, though it is not required to increase the bar length and the ring thickness, all advantages of the use of rope-and-bar-suspended systems in transformable structures are preserved. Another merit of the structure is that it has no kinematic displacements.

The problem is solved at a qualitatively higher level by using the frame in the form of ribbon-like leaves in the cyclic ribs of the mirror, which are wound onto the cylinder and, after transformation, get unfolded and transform, due to prestress, into the beam-wall system having sufficient rigidity to preserve the shape not only in space but in the ground tests as well.

These and other principles were used to design several transformable space radiotelescope models. In particular, a circular tiered radiotelescope model KTPT.30.OPA.1.30 was developed, which has a transformable configuration and is provided with an antenna enabling it to operate in space orbits in a decimetre radiowave length range. This model is characterized by a small mass and can be folded into a package convenient for transportation due to its small overall dimensions.

Also, a circular tiered rope-and-bar suspended leaf-type construction has been developed of a space transformable radiotelescope model KTPT.30.OPA.3.30 having a mirror diameter of 30 m and its no-leaf modification KTPT.30.OPA.2.30. As compared with OPA.1.30, the model OPA.3.30 is characterized by higher rigidity and precision parameters and can operate in a centimetre radiowave length range.

The analysis of constructional, engineering and operating parameters of various antenna design versions led to de-

signing the standard circular leafed construction of the space transformable radiotelescope model KTPT.30.OPA.Б.М.30. This model satisfies the stiffness, reliability and precision requirements and is easy to manufacture. It corresponds to the overall dimensions and mass parameters of the existing booster rockets and can be used as a supporting frame for an autonomous satellite. It operates in a centimetre radiowave length range.

The above-mentioned radiotelescope design modifications OPA.1.30, OPA.2.30, OPA.3.30 and OPA.Б.М.30 are provided with complete sets of design documentation. Actually this design documentation has already been tried out in manufacturing the above-mentioned space radiotelescope models and the standard specimen of a space transformable radiotelescope with a mirror diameter of 30 m.

The package of the space transformable radiotelescope models has the following specifications:

Diameter –  $2 \pm 2.2$  m,

Length –  $2.1 \pm 3$  m,

Mass –  $927 \pm 4204$  kg.

The mass value depends on a radiowavelength range and a structural material kind – carbon or aluminum alloys. The time required for the radiotelescope to unfold varies from 25 to 45 seconds depending on the working duty.

The experimental complex ЭКК.КТРТ.30.ОПА.М.30 with a transformable space radiotelescope was developed on the basis of the standard KTPT.30.OPA.Б.М.30 model. This complex is actually an autonomous orbital station erected on the load-bearing frame consisting of supporting members and the rings of a transformation device.

The monograph gives a detailed description of the unique stand-test center that can be used for manufacturing and testing large space radiotelescopes and other engineering structures. The design principles of such a unified complex were worked out after a thorough analysis of ground, combined and space experimental results and production processes of orbital structures.

The design principle of the stand-test center rests on such factors as its multi-purpose application, the interdependence of problems to be solved, including the problem of controlling radio-engineering and optical operational parameters of space constructions, the problem of providing large overall dimensions of the designed load-bearing constructions and the problem of testing it comprehensively for mechanical, thermal and other influences in the simulated space conditions.

The following tasks can be accomplished by building the stand-test complex in general cases (which does not exclude special requirements that may arise in particular cases):

- a large-scale assembly on the ground;
- the mastering of assembling and other building techniques which will be used by space engineers and pilots when working in space orbits;
- the study and practical realization of shape-transformation processes of large space structures in the simulated space conditions;
- the testing of constructions for load endurance, as well as for various internal and external factors that might arise during their assembly and mounting, transportation and delivery to the orbit, unfolding, maintenance and functioning in the outer space;
- the determination of optimal operational specifications ensuring the proper functioning of the structures in space.

The stand-test center consists of a technological precision bench, a hydrostand, a mobile assembly jig, a functional stand and a shape transformation stand. The center also has a laboratory building, power-, water- and gas-supply systems, a communication department, other administrative and everyday service buildings.

The general purpose of the stand-test center is to assemble and test large engineering constructions up to 30 m in size designed for the work in space, while the special purpose is to develop space precision systems in the form of radiotelescopes, highly directional aeri-als, mirrors, solar energy con-

centrators and reflectors of various types. The project was prepared with regard to the above purposes and used to build in Georgia the unique stand-test center having no analogs in the world practice.

The problems posed could be tackled successfully provided the following tasks were realized:

- creation a spacious experimental medium that could accommodate structures designed for the work in space and having the average overall dimensions of 35x30x20 m;
- simulation of space conditions by means of methods applicable for large constructions with parameters as mentioned above;
- provision of an engineering medium that could be used for the final assembly and preparation of the tests and launching with regard to those strict geometric and operational requirements which exist for constructions to be used in space;
- development of means and techniques for a functional study of constructions in the conditions approaching as much as possible the real operating situation;
- provision of the required control-and-measuring equipment;
- electric power and other supplies.

The stand-test center has a chain of facilities ensuring the fulfillment of all required processes.

The processes, technological units and equipment in the form of dewatering systems, hoisting platforms, swivelling mechanisms, mobile assembly jigs and so on are considered for each stand when describing each object.

The results can be summarized as follows:

- The unified technological and functional design principles were developed and used to build the ground stand-test complex for assembly, mounting and testing large space constructions and radioengineering systems.
- The stand-test complex has all the necessary conditions for precise assembly, as well as for mechanical and



hydrosimulation of space weightlessness for orbital constructions having overall dimensions of 30x30x30 m. The "space" configuration of the construction is maintained by means of the 360° swivel stand which makes it possible to subject antennas to various radioengineering tests. The stands are provided with all the required control-and-measuring devices, as well as with simulators of dynamic, static and temperature effects.

One of the chapters of the book describes the experimental studies carried out with the aim to develop the principles of building transformable structures and testing the specimens of large space radiotelescopes.

The availability of the stand-test complex is the main condition for the implementation of the results of comprehensive experimental ground studies of large space unfoldable radiotelescopes and other large engineering constructions to be operated in space. The stand-test complex also makes it possible to try out the orbital technology and artificial simulation of space conditions.

In the first stage, two problems were solved using the models and fragments of constructions. The first problem concerned the practical evaluation of the general principles underlying the creation of large space radiotelescopes, whereas the second problem was connected with the evaluation of the manufacturing and testing processes in the ground conditions, which is very important for space systems economic and from engineering standpoints.

In the second stage, several series of tests of various radiotelescope modifications were run in order to evaluate the principles of building antennas of various design modifications, as well as to test them for reliable operation, for their behaviour under dynamic, static and temperature influences. Other aims of these tests included the study of the transformation process, the preservation of the mirror configuration, and also the verification of how feasible the theoretical calculations were.

The following conclusions were made:

- The stand-test center along with the engineering, technological and information systems have made it possible to accomplish experimental studies of the general principles underlying the building of transformable constructions and the testing of large space radiotelescope specimens and other systems.
- The results provided by the experimental studies have practically proved that the proposed space construction designs are implementable and meet all the requirements for space constructions.
- The results of both experimental studies and field tests are in practically complete agreement with the theoretically calculated mechanical and radioengineering parameters of the predicted shape transformation processes.
- The readiness for producing the standard specimen of a radiotelescope provided with a supporting framework system has been confirmed by testing:
  - the 15 m model KTPT.30.OPA.1.30(15);
  - the 30 m model KTPT.30.OPA.2.30;
  - the 30 m model KTPT.30.OPA.3.30.
- the field specimen of the standard transformable space circular leaf-type radiotelescope KTPT.30.OPA.B.M.30.

The experimental studies have been proved high operating, technical and technological properties of the test-stands in the conditions of the ground testing of orbital constructions.

The book considers the promising space and ground transformable systems. The proposed new designs embody the synthesis of ideas of designing structures to be used in space and on the ground.

A new zonal principle is suggested to regulate the geometry of the surface of space large radiotelescopes, taking into account their constructional peculiarities.

To increase the precision and rigidity characteristics of radiotelescopes with regard to the specific space conditions, it is proposed to make transformable shells from same-type blocks and to use a pneumorigid cyclic system which later is

able to harden in space and to form an egg-shell-like cupola with ribs.

The unfoldable shell can be modified by using disks instead of blocks so as to form large solar battery areas. The advantage of both modifications enhances when they are used for multiple unfoldings and foldings into a package of 15–20 m in size.

Though the pneumorigid transformable combined cyclic cupola-type construction can effectively be employed in roofs, ground mobile antennas, space technological platforms and solar batteries when the cupola form is replaced by the disk modification, the said construction is best efficient when used in space radiotelescopes with a mirror diameter from 30 to 50–80 m.

When designing the above construction, solutions were obtained for quite a number of structural, technological and functional problems, including:

- reducing as much as possible the quality of mechanical components and realizing the transformation process due to the properties of structural materials and members;
- standardizing the constituent parts;
- simplifying the technological processes for structural members;
- increasing the reliability level of shape transformation so as to ensure the transformed shape preservation;
- taking into account the specific conditions of space;
- simplifying the load-carrying processes during the unfolding of the system and increasing its safety level;
- preserving the general geometric pattern in case individual zones go out of order;
- successively increasing the load-bearing capacity from periphery to centre so as to concentrate the reinforcing elements at the cupola pole and to create thus the force zone for fixing the spacecraft;
- obtaining the precise parabola contours with their oversaturation in the direction of the center so that the

screen cloth could be stretched on them;

- reducing the overall dimensions of the folded package; also making the system folding process simpler;
- increasing the rigidity of the construction on the whole and especially the load-bearing contours on which the radiotelescope screen is fitted.

The designed construction has passed all the required field tests.

Special attention is given in the book to the development of long-dimensional structural members for both the transformable and transformable-and-prefabricated modification. These members are used as assembly manipulators in the erection stage. A lot of experiments have confirmed wide possibilities of their application in load-bearing frames of orbital stations. Important investigations were performed with an aim of designing ground quickly-restationable transformable constructions. The main accent in these investigations was placed on the solution of problems related with the application of such structures in extreme and emergency situations. From the latter standpoint special mention should be made of an unfoldable 40 m bridge for the needs of engineering army troops. The folded bridge package is mounted on a transport vehicle which also serves as a means of unfolding the bridge at the required site and then the unfolded bridge is erected by means of helicopters. The bridge can be folded in the reverse order and loaded onto the transport vehicle and moved to a new place. A special design logic underlies the principal diagram of the bridge based on the capacity of the construction to suppress arising compressive forces by flexible ropes.

A similar approach was used in designing many variants of transformable shelters.

The study of several trial design modifications led to the creation of a quickly-transformable ground radiotelescope with a mirror diameter of 12 m and with its own shelter.

A series of experiments was run using a 15 m static specimen and a standard original radiotelescope construction with a mirror diameter of 12 m. These experiments showed that

such systems have very good application prospects due to such advantages as a transportable package, the combined function of a swivelling-and-supporting mechanism and of a semi-trailer, the readiness of the radiotelescope to function within 25–45 minutes, an individual shelter, operation in the centimetre radiowave range, a simple and reliable construction.

To test the ground radiotelescope constructions for hard transportation conditions and weather influences, a special testing center was built in Borjomi mountains. There, besides swivel antennas, nonswivel antennas in the form of three rings, each 12 m in diameter, were tested. The aim of these tests was to develop high-directional antennas with autonomous shelters using the space engineering techniques.

As for transformable system of agricultural application, the book considers constructions used antihail protection of vineyards.

Described in the book is one of the design versions of an unfoldable roof of the Luzniki stadium in Moscow. The design version, the winner of the competition, is the synthesis of the traditional large-span structure concepts and shape transformation principles.

On the whole:

- Engineering and technological principles of designing space constructions, the stand-test complex, theoretical and experimental studies with regard to the use of transformation as means of shape formation of a system – all these have created the ground for designing new promising constructions to be used for various purposes in space and on the ground.
- A class of space functional and load-bearing constructions has been developed, making it possible to build large precision structures in space orbits even at the present-day engineering development stage.
- A quickly-restationable ground large 360°-rotating radiotelescope with a mirror diameter of 12 m HP-12 was designed, manufactured and tested.
- Quite a number of design modifications of transportable

engineering unfoldable structures have been proposed for multiple applications in extreme and nonstandard situations.

- The experimental center was set up to test the proposed constructions for their endurance of difficult transportation conditions and weather influences.
- – The book proposes the designs of transportable stationary structures for civil, industrial and agricultural applications.

The monograph further presents some results of theoretical studies, in particular:

- The standard geometrical parameters of the proposed constructions have been determined and the method has been suggested for approximating the reflector surface taking into account the specific constructional features of the reflector frame, the technology of fixing the screen so as not to affect the desired radioengineering parameters of the antenna.
- Mathematical models were built for the functional and technological form of the screen cloth and regularities of their interrelationships were found with regard to the mechanical properties of the structural material, as well as to the load-bearing parameters produced by the tensioning of the screen at the antenna construction elements.
- Solutions were obtained for analytical problems of the applied mechanics concerning the transformation and functioning of the standard space transformable radiotelescope and its various design modifications in space orbits.
- Methods of static and dynamic calculations have been proposed for unfolded structures taking into account the stability and deformability of system members and the prestressed cyclic leafed center which serves as the supporting frame for the antenna mirror.
- Methods have been proposed for calculating the kinetics of transformation process of various radiotelescope design modifications depending on the

analysis of influencing factors and the respective rigidity parameters in the unfolding stages.

- Theoretical studies and numerical calculations were performed for the standard radiotelescope constructions and its design modifications, using the existing methods and schemes of designing sophisticated engineering systems.
- Using all the available methods, calculations were performed for a circular tiered rope-and-bar supported leaf-type radiotelescope KTPT.30.OPA.3.30 and its modifications.
- Using all the available methods, calculations have been performed, taking into account many unfolding and shape preservation processes that may occur under various influences in the standard circular leaved system KTPT.30.OPA.Б.М.30.
- The antenna construction parameters determined by theoretical studies were found to meet the requirements for space antennas with a mirror diameter of 30 m designed to work in centimetre and decimetre radiowave length ranges.

## To Readers' Attention!

The Institute of Space Constructions offers conceptual designs, complete sets of technical documents, descriptions of engineering and technological processes, assembly and testing of all types of space and ground constructions, and test-stands which are considered in the book with all the required analyses and calculations.

The Institute of Space Constructions accepts orders and assignments for designing, manufacturing and testing new large space and ground engineering constructions and radiotelescopes and guarantees to satisfy all requirements for overall dimensions, mass, mechanical and geometrical parameters at the level of modern applied space programs with good expectations for the future.

The Institute of Space Constructions can prepare scientific reports and carry out expert studies in the field of large transformable space and ground engineering constructions and radiotelescopes.

The Institute of Space Constructions organizes academic seminars, lecture courses and probation for specialists in the field of space and ground transformable constructions and radiotelescopes.

The Institute of Space Constructions offers unique testing centers which can be used for the assembly and testing of large orbital structures and also for ground tests of space radiotelescopes.

For further information please refer to:

**Gregory Kinteraya**

Germany

tel.: ++49(0)421/169 08 05, 169 08 06

fax: ++49(0)421/169 09 48

**Guram Tevzadze**

Georgia

tel.: ++995 8832/99 05 73

fax: ++995 8832/93 35 48



# მკითხველთა საყურადღებოდ!

**კ**ოსმოსურ ნაგებობათა ინსტიტუტი წარმოგიდგენთ ესკიზურ პროექტებს, ტექნიკური დოკუმენტაციის კომპლექტებს, დამზადების ტექნიკური და ტექნოლოგიური პროცესების, ყველა სახის კოსმოსური და მიწისზედა კონსტრუქციებისა და საცდელი სტენდების აწყობისა და გამოცდის აღწერებს, რომლებიც განხილულია წიგნში სათაბადო უზრუნველყოფითა და გაანგარიშებებით.

**კ**ოსმოსურ ნაგებობათა ინსტიტუტი იღებს შეკვეთებს და დაკვლებებს ახალი დიდი კოსმოსური და მიწისზედა საინჟინრო კონსტრუქციებისა და რადიოტელესკოპების შემუშავების, დამზადებისა და გამოცდის თაობაზე და იძლევა გაბარიტული, წონითი, მექანიკური თუ გეომეტრიული ყველა მოთხოვნის თანამედროვე და პერსპექტიული პრაქტიკული კოსმოსური პროგრამების დონეზე დაკმაყოფილების გარანტიას.

**კ**ოსმოსურ ნაგებობათა ინსტიტუტს შეუძლია დიდი გაბარიტების შქონე ტრანსფორმირებადი კოსმოსური და მიწისზედა საინჟინრო კონსტრუქციებისა და რადიოტელესკოპების დარგში ახლებური გადაწყვეტის დონეზე გამოუშვას სამეცნიერო ანგარიშები და ჩაატაროს ექსპერტიზები.

**კ**ოსმოსურ ნაგებობათა ინსტიტუტი უზრუნველყოფს სასწავლო სემინარების, ლექციათა კურსების ჩატარებას და სპეციალისტების სტაჟირებას კოსმოსური და მიწისზედა ტრანსფორმირებადი კონსტრუქციებისა და რადიოტელესკოპების დარგში.

**კ**ოსმოსურ ნაგებობათა ინსტიტუტს შეუძლია მოგახმაროთ სასტენდო კომპლექსები ორბიტული დიდგაბარიტიანი კონსტრუქციების აწყობისა გამოცდის და აგრეთვე კოსმოსური რადიოტელესკოპების მიწისზედა რადიოტექნიკური შემოწმებისათვის.

სპეციალისტებს, ორგანიზაციებს და ფირმებს შეუძლიათ მიმართონ:

## გრიგოლ კინტერაია

გერმანია

ტელ.: ++49(0)421/169 08 05, 169 08 06

ფაქსი: ++49(0)421/169 09 48

## გურამ თევზაძე

საქართველო

ტელ.: ++995 8832/99 05 73

ფაქსი: ++995 8832/93 35 48

## Вниманию читателей!

**И**нститут космических сооружений представляет эскизные проекты, комплекты технической документации, описания технических и технологических процессов изготовления, сборки и испытания всех видов космических и наземных конструкций и испытательных стендов, рассмотренных в книге с соответствующим обеспечением и расчетов.

**И**нститут космических сооружений принимает заказы и задания на разработку, изготовление и испытание новых больших космических и наземных инженерных конструкций и радиотелескопов с гарантиями удовлетворения всех габаритных, весовых, механических и геометрических требований на уровне современных и перспективных практических космических программ.

**И**нститут космических сооружений в области крупногабаритных трансформируемых космических и наземных инженерных конструкций и радиотелескопов, на уровне нового решения, может выпустить научные отчеты и проводить экспертизы.

**И**нститут космических сооружений обеспечивает проведение учебных семинаров, курсы лекций и стажировку специалистов в области космических и наземных трансформируемых конструкций и радиотелескопов.

**И**нститут космических сооружений может представить стендовые комплексы для сборки и испытания орбитальных крупногабаритных конструкций и наземной радиотехнической проверки космических радиотелескопов.

Специалисты, организации и фирмы могут обратиться:

**Грегори Кинтерая**

Германия

тел.: ++49(0)421/169 08 05, 169 08 06

факс: ++49(0)421/169 09 48

**Гурам Тевзадзе**

Грузия

тел.: ++995 8832/99 05 73

факс: ++995 8832/93 35 48

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	11
ВВЕДЕНИЕ	15
1 СТРОИТЕЛЬСТВО В КОСМОСЕ	21
1 Концептуальные вопросы построения сооружений космического базирования	21
2 Проблемы создания больших космических инженерных сооружений	27
2 ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ СИСТЕМЫ	31
1 Общие признаки трансформируемых конструкций	31
2 Процессы формообразования	36
3 Трансформируемые структуры	46
4 Геометрия трансформируемых систем	49
5 Основные параметры трансформируемых систем	53
6 Разновидности трансформируемых систем	64
7 Типы и виды трансформации формы	68
8 Динамическая структура трансформируемых систем	74
9 Вопросы классификации трансформируемых систем	78
3 КАРКАСНО–ОПОРНЫЕ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ СИСТЕМЫ	81
1 Общие принципы строения каркасно–порных трансформируемых систем	81
2 Структура опорных каркасов	84
3 Структура заполняющей и контактной зоны	88
4 Каркасно–опорные трансформируемые конструкции	90
– Многокольцевая концентричная трансформируемая конструкция	91
– Меридиальная конструкция	92
– Комбинированно–кольцевая конструкция	94
– Спаренно–кольцевая конструкция	95
– Опорно–циклическая конструкция	98

– Плоскостная структура	99
– Пространственная структура	102
– Однослойная вантовая каркасно–опорная трансформируемая конструкция	104
– Пространственная вантово–ферменная трансформируемая конструкция	106
– Вантово–стержневая трансформируемая регулярная структура	107
– Лепестковая комбинированная трансформируемая конструкция	109
– Циклическая арочная вантово–стержневая каркасно–опорная трансформируемая конструкция	110
– “Летающе–стержневая” каркасная трансформируемая конструкция	111
<b>4 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМИРУЕМОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА КТРТ.30</b>	<b>115</b>
1 Постановка вопроса и выбор основных направлений ее решения	115
2 Концепция построения систем космических радиотехнических комплексов с большими остронаправленными антеннами	122
3 Конструктивные схемы опорных каркасов трансформируемых радиотелескопов	129
4 Основные конструктивные схемы КТРТ–30	137
<b>5 КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ ДИАМЕТРОМ ЗЕРКАЛА 30 МЕТРОВ КТРТ.30</b>	<b>153</b>
1 Кольцевая ярусная конструкция КТРТ.30.ОРА.1.30	153
2 Кольцевая ярусная вантово–стержневая лепестковая конструкция КТРТ.30.ОРА.3.30	159
3 Базовая кольцевая лепестковая конструкция КТРТ.30.ОРА.Б.М.30	178

6	ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ, ВОПРОСЫ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ КОСМИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ ДИАМЕТРОМ ЗЕРКАЛА 30 МЕТРОМ И НАПРЯЖЕНИЯ, ДЕФОРМАЦИИ И КОЛЕБАНИЯ ОБРАЗЦОВ ОРБИТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	195
1	Геометрические и технологические особенности экрана космических трансформируемых радиотелескопов	196
2	Вопросы математического моделирования механики космических опорно-каркасных трансформируемых систем	199
3	Результаты теоретических исследований базовой кольцевой лепестковой конструкции космического трансформируемого радиотелескопа диаметром зеркала 30 метров КТРТ.30.ОРА.Б.М.30	204
	– Пространственная расчетная схема конструкции радиотелескопа с использованием метода конечных элементов	204
	– Определение усилий от предварительного натяжения и изменения температуры	207
	– Определение форм собственных колебаний	216
	– Расчет конструкции антенны на динамические воздействия	226
	– Перемещение точек антенны в пространстве при различных динамических воздействиях на конструкцию	240
	– Динамика трансформации космического кольцевого радиотелескопа	249
7	НАЗЕМНЫЙ СТЕНДОВЫЙ КОМПЛЕКС СОЗДАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ БОЛЬШИХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ	257
1	Принципы построения комплекса	260
2	Технологический прецизионный стенд	267
3	Гидростенд	270
4	Стенд трансформации	276

5	Технологический стенд	282
8	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ТЕХНИКИ БОЛЬШИХ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ	293
1	Исследование схематических моделей конструкции и фрагментов космических радиотелескопов	295
2	Экспериментальное исследование кольцевой вантово-стержневой ярусной конструкции диаметром 15 метров КТРТ.ОРА.1.30(15)	299
3	Натурные испытания образцов конструкций КТРТ.ОРА.2.30, КТРТ.ОРА.3.30	302
4	Экспериментальные исследования базового варианта трансформируемого космического кольцевого лепесткового радиотелескопа диаметром зеркала 30 м КТРТ.ОРА.Б.М.30	332
9	ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ И НАЗЕМНЫЕ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ СИСТЕМЫ	353
1	Космические инженерные сооружения	353
2	Наземные быстроперсбазируемые и трансформируемые конструкции	378
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	405
	БИБЛИОГРАФИЯ	407

	Brief content and importance of the book “TRANSFORMABLE SPACE AND GROUND CONSTRUCTIONS” by E.V. Medzmariashvili	419
	To Readers' Attention!	440
	გკითხველთა საყურადღებოდ!	441
	Вниманию читателей!	442

Медзмариашвили Элгуджа Викторович

Трансформируемые конструкции  
в космосе и на земле

Тбилиси, 1995

Формат 90×60 1/16. Тираж 1000 экз.

Совместное издание

VALEMAR S&T Ltd. и GREGORY & Co.

Отпечатано в типографии издательства «Самшобло»  
Тбилиси, ул. Костава, 14.