На правах рукописи

Зимин Владимир Николаевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ И ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАСКРЫВАЮЩИХСЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ФЕРМЕННОГО ТИПА

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук



Москва-2008 г.

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Светлицкий В.А.
доктор технических наук, профессор Шклярчук Ф.Н.
доктор технических наук, профессор Борзых С.В.

Ведущая организация – ОАО "Информационные спутниковые системы" имени академика М.Ф. Решетнева

Защита состоится "30" октября 2008 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.03 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана
по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

НТБ МГТУ им Н.Э Баумана
1846271
Зимин В.Н. Разработка мето

Автореферат разослан " 30 " сентября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета А.Ю. Карпачев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Перспективы развития радиоастрономии, солнечной энергетики, космической связи, исследования земной поверхности и других планет из космоса в настоящее время непосредственно связаны с возможностью вывода в космос крупногабаритных конструкций. В настоящее время в России и за рубежом ведутся исследования, направленные на создание в космосе конструкций различного класса, которые имеют большие размеры в том или ином измерении: космические телескопы и антенны, энергетические и научные платформы, крупногабаритные солнечные батареи и т.д. Одним из важных и бурно развивающихся направлений в области создания крупногабаритных космических конструкций является разработка раскрывающихся панелей солнечных батарей, а также антенн, устанавливаемых на космических аппаратах (КА) различного назначения.

Проблема создания навесных систем специального функционального назначения с габаритами, превышающими размеры КА, сводится к разработке складных конструкций, удовлетворяющих таким противоречивым требованиям, как минимальные вес и объем в сложенном транспортном состоянии, высокая надежность раскрытия из транспортного состояния в рабочее положение и функционирования на орбите, максимальная площадь рабочей поверхности в раскрытом состоянии, стабильные эксплуатационные характеристики в условиях действия нагрузок. Работоспособность таких конструкций определяется, главным образом, тем, насколько велики возникающие в них усилия при развертывании, поэтому обеспечение их надежного раскрытия связано с решением сложных задач механики. Особое место среди создаваемых в настоящее время систем занимают ферменные конструкции, раскрытие которых происходит автоматически при срабатывании механизма расчековки за счет первоначально накопленной упругой энергии пружин, расположенных в шарнирных соединениях. Отличие этих конструкций состоит в высокой технологичности и удовлетворении большинству из указанных выше требований. Ключевым элементом ферменных конструкций, определяющим в конечном счете их характеристики, является несущий силовой каркас. Именно он обеспечивает минимальные габариты в сложенном положении и высокую жесткость конструкции в раскрытом рабочем состоянии.

Принципы, заложенные в конструктивную схему ферменных каркасов, позволяют на базе его элементарной ячейки, например, в форме тетраэдра, построить ферменные модули разнообразных пространственных конфигураций (сферические, цилиндрические, параболические и другие поверхности) с различными очертаниями внешнего контура. Габаритные размеры формируемой в результате раскрытия конструкции определяются конкретными требованиями решаемой технической задачи.

Исследованию динамики многозвенных механических конструкций посвящено большое количество работ. Проблемы динамики механических систем наиболее полно изложены в работах И.И. Артоболевского, А.Е. Кобринского,

А.Г. Овакимова, Ф.М. Диментберга, Ю.А. Степаненко, В.С. Медведева, А.Ф. Верещагина, А.Г. Лескова, В.Г. Бойко, Й. Витенбурга, Уикера мл., Т.Р. Кейна, М. Вукобратовича, Р.Е. Nikravesh и др. Методы анализа динамики многозвенных систем переменной кинематической структуры представлены в работах Я.Г. Пановко, Н.А. Кильчевского, Е.М. Рубановича, А.М. Формальского, С.В. Рутковского, С.В. Борзых, И.С. Ососова, Ю.Н. Щиблева, В.И. Паничкина, В.Г. Боярко, В.П. Малкова, Ю.А. Фатьянова, Y.A. Khulief, A.A. Shabana, R.A. Wehage, E.J. Haug, S. Dubowsky и др.

Несмотря на достигнутые значительные успехи в области проектирования таких конструкций, важной остается задача обеспечения плавного и надежного раскрытия крупногабаритных конструкций, прежде всего, ферменного типа, состоящих из десятков, сотен и даже тысяч взаимосвязанных между собой элементов, при гарантированном обеспечении их последующего функционирования.

В настоящее время в литературе широко представлены также исследования, посвященные моделированию динамики раскрытия солнечных батарей космических аппаратов различных кинематических схем. Однако они, как правило, не относятся к конструкциям ферменного типа. Изложенное позволяет констатировать, что при очевидных запросах практики, в выполненных ранее исследованиях практически отсутствуют сведения о методах анализа динамики раскрытия конструкций ферменного типа и оценки их работоспособности на этапе создания, включая проектирование, изготовление, экспериментальную отработку, а также моделирование различных нештатных ситуаций.

Цель работы состоит в повышении качества, сокращении сроков и снижении материальных затрат при проектировании, изготовлении и наземной отработке раскрывающихся крупногабаритных космических конструкций ферменного типа.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие задачи:

– разработка методов моделирования раскрытия крупногабаритных конструкций ферменного типа из транспортного положения в рабочее состояние в условиях космического пространства;

– формирование новых научно обоснованных подходов к построению комплекса математических моделей динамики раскрытия конструкций ферменного типа, а также создание соответствующего алгоритмического и программного обеспечения для количественного анализа этих моделей, позволяющих автоматизировать процесс определения рациональных параметров конструкций;

– разработка эффективной модели для динамического расчета конструкций ферменного типа, содержащих большое количество шарнирных соединений, обеспечивающих их минимальный транспортный объем, на основе детального исследования влияния жесткостей отдельных элементов конструкций ферменного типа на их динамические характеристики;

– разработка метода оценки прочности элементов конструкций ферменного типа при их полном раскрытии;

– разработка методов оценки работоспособности раскрывающихся космических конструкций ферменного типа на этапе их создания, в том числе методов моделирования поведения таких конструкций при проведении испытаний в земных условиях.

Научная новизна работы определяется следующим:

1. Предложен новый подход к разработке специализированных моделей для анализа динамики крупногабаритных раскрывающихся космических конструкций ферменного типа. Разработанные модели и вычислительные процедуры не содержат лишних элементов, в связи с чем свойственные специализированным моделям вычислительные преимущества перекрывают предполагаемые достоинства универсальных моделей. Предложенный подход продемонстрирован на конкретных примерах расчета ферменных конструкций.

2. Разработаны математические модели, алгоритмы и программы, позволяющие исследовать процесс раскрытия плоских и осесимметричных конструкций ферменного типа, провести анализ динамики и оценочный прочностной расчет.

3. Исследованы основные факторы, влияющие на раскрытие и работоспособность конструкций ферменного типа. Выявлены закономерности динамического нагружения элементов конструкции при их установке на упоры и фиксаторы. Полученные новые результаты открывают большие возможности для оптимизации конструктивных решений при проектировании крупногабаритных раскрывающихся космических конструкций ферменного типа с надежным и плавным раскрытием.

4. Выявлены закономерности влияния жесткостных характеристик отдельных элементов конструкции ферменного типа на ее динамические характеристики. Определен диапазон частот, который соответствует собственным колебаниям конструкций данного класса.

5. Получены определяющие критерии при моделировании процесса раскрытия конструкций ферменного типа. Продемонстрирована возможность адекватного отражения поведения натурной конструкции ферменного типа в невесомости при проведении испытаний в земных условиях при соответствующем выборе материалов и масштабов моделей конструкции.

Достоверность результатов работы базируется на использовании фундаментальных положений, законов и теорем механики и подтверждена сопоставлением с соответствующими экспериментальными данными и известными результатами других авторов, а также сравнением результатов расчета, полученных разными методами.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные методы анализа динамики раскрытия и оценки работоспособности раскрывающихся крупногабаритных космических конструкций ферменного типа, расчетно-теоретический аппарат и программное обеспечение позволяют автоматизировать процесс определения рациональных параметров конструкции, повысить качество и сократить сроки разработки, создания и отработки раскрывающихся

крупногабаритных космических конструкций ферменного типа. Результаты работы использованы в ГК НПЦ им. М.В.Хруничева, НПО Машиностроения и ОКБ МЭИ при разработке раскрывающихся крупногабаритных космических антенн ферменного типа.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Комплексный подход к анализу динамики раскрывающихся крупногабаритных космических конструкций ферменного типа на основе совокупности разработанных моделей.

2. Комплекс методик, алгоритмическое и программное обеспечение для эффективного выполнения проектных расчетов и анализа различных вариантов компоновки конструкций.

3. Методика оценки влияния массовых характеристик элементов конструкций ферменного типа на динамику и параметры раскрытия.

4. Методика оценки влияния жесткостных характеристик элементов конструкций ферменного типа на значения частот их собственных упругих колебаний.

5. Метод оценки работоспособности раскрывающихся крупногабаритных конструкций ферменного типа на этапе их создания.

6. Определяющие критерии для моделирования процесса раскрытия крупногабаритных конструкций ферменного типа при проведении испытаний в земных условиях.

Апробация работы. Основные положения диссертации и полученные результаты докладывались на:

– VI Межотраслевой школе по проблемам проектирования конструкций (Красноярск, 1985);

– II Всесоюзной конференции "Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов" (Куйбышев, 1986);

– I Всесоюзной научно-технической конференции "Математические методы анализа и оптимизации зеркальных антенн различного назначения" (Свердловск, 1989);

– Гагаринских научных чтениях по космонавтике и авиации (Москва, 1991);

– Международной конференции по крупногабаритным конструкциям (Новгород, 1993);

– Международных симпозиумах "Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред" (Ярополец: III (1997), IV (1998), V (1999), VI (2000), VII (2001), VIII (2002), XI (2005), XIII (2007));

– Международной научной конференции "Ракетно-космическая техника: фундаментальные проблемы механики и теплообмена" (Москва, 1998);

– III Международной конференции по мобильным и быстрособираемым конструкциям (Мадрид, 2000);

– XI Международной конференции по численным методам и экспериментальным исследованиям (Аликанте, 2001);

– VIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Пермь, 2001);

– V Международном семинаре "Современные проблемы прочности" имени В.А. Лихачева (Старая Русса, 2001);

– III Международной конференции--выставке "Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке" (Королев, 2002);

– XII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Владимир, 2003);

– IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006);

– V Всероссийской научной конференции "Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики" (Томск, 2006);

– Международных научных конференциях "Решетневские чтения" (Красноярск, IX (2005), X (2006), XI (2007));

– XXXI академических чтениях по космонавтике (Москва, 2007).

– III Международной научной конференции "Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы" (Москва, 2007);

– XI Международной конференции "Современные проблемы механики сплошной среды" (Ростов-на-Дону, 2007).

Личный вклад автора. Все научные положения и результаты, изложенные в диссертации, получены автором. Во всех случаях заимствования других результатов в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора состоит в формулировании проблем, постановке задач, создании теоретических основ для их решения, разработке математических моделей, алгоритмов расчета и анализе полученных результатов.

Автор выражает искреннюю признательность коллегам по творческому коллективу отдела "Крупногабаритные космические конструкции" НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, вместе с которыми выполнялись исследования, лежащие в основе диссертации. Их участие отражено в цитируемых в работе совместных публикациях. Особо следует отметить совместное многолетнее сотрудничество с В.И. Усюкиным, В.Е. Мешковским и И.М Колосковым.

Публикации результатов. По теме диссертации опубликовано 29 работ, из них 7 в рецензируемых научных журналах Перечня ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы. Материалы исследований изложены в работе на 309 страницах. Она содержит 165 рисунков и 11 таблиц. Список цитируемой литературы включает 151 источник.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, определена степень научной новизны, практической значимости и достоверности полученных результатов.

Первая глава посвящена разработке математической модели раскрытия конструкций ферменного типа. Классическая схема анализа крупногабаритных космических конструкций включает следующие основные этапы: выбор расчетной схемы, с той или иной степенью полноты отображающей свойства реальной конструкции, и формирование на ее основе соответствующей математической модели; проведение анализа влияния определяющих параметров; проверка адекватности характеристик модели и реальной конструкции на основе физического или численного эксперимента. При необходимости производится уточнение расчетной схемы, и процедура анализа повторяется. Критерием правильности выбора расчетной схемы является достижение требуемой точности анализа исходной конструкции. При этом в процессе проектирования и создания крупногабаритных космических конструкций инженеру-разработчику всегда приходится искать компромисс между желаемой точностью результата и допустимыми экономическими и временными затратами, связанными с его получением.

При создании раскрывающихся крупногабаритных космических конструкций значительная роль отводится натурным экспериментам, результаты которых являются основным критерием надежности и функциональной пригодности разрабатываемых конструкций.

Для конструкций, функционирующих в космическом пространстве, важными факторами становятся невесомость, отсутствие или значительная разреженность атмосферы. Для воссоздания этих условий в наземных экспериментах требуются дорогостоящие стенды имитации невесомости, уникальные по размерам вакуумные камеры. Проведение полномасштабной экспериментальной отработки таких конструкций оказывается чрезвычайно дорогостоящим делом. Поэтому вычислительный эксперимент, использующий разрабатываемые математические модели крупногабаритных космических конструкций с идентифицированными параметрами, является важным этапом проверки и обоснования функциональной пригодности проектируемых систем

Сложная в прикладном плане задача математического моделирования динамики раскрывающихся конструкций ферменного типа как системы многих тел, очевидно, не может быть решена с помощью одной универсальной модели. Создание такой модели вызывает принципиальные затруднения, связанные с отсутствием полных исходных данных о геометрических и физических параметрах конструкции, а также с не всегда преодолимыми вычислительными трудностями и большими затратами машинного времени. Неполнота информации обусловлена неточностями в изготовлении конструкции, разбросом физико-механических характеристик применяемых материалов, несовершенствами соединительных узлов и многими другими факторами.

На практике, как правило, динамическое поведение конструкции анализируют с помощью совокупности моделей, каждая из которых нацелена на решение конкретной технической задачи: либо на определение динамических характеристик конструкции, либо на исследование динамики процесса раскрытия конструкции. Таким образом, говоря о модели динамики таких конструкций,

мы имеем в виду не одну модель, а совокупность дополняющих и развивающих друг друга моделей – своего рода иерархию моделей. Можно ожидать, что темпы усложнения проектируемых раскрывающихся ферменных конструкций и роста их размерности как динамических систем будут постоянно опережать развитие методов и технических средств математического моделирования подобных конструкций. Поэтому представляется целесообразным проводить анализ динамики раскрывающихся крупногабаритных конструкций ферменного типа в том объеме, который необходим для решения частных технических задач их проектирования, создания и экспериментальной отработки на основе совокупности специализированных моделей. Такой подход необходимо рассматривать в качестве основного для анализа динамики конструкций данного класса.

Первым шагом формирования расчетной схемы конструкции, как правило, является принятие совокупности гипотез о характере деформирования элементов и условиях их совместной работы в конструкции, особенностях взаимодействия с внешней средой, характере приложения нагрузок и т.п. Вторым, не менее важным шагом, является выбор метода анализа математической модели, соответствующей принятой расчетной схеме. В дальнейшем под математической моделью динамики раскрытия крупногабаритных конструкций будем иметь в виду систему дифференциальных уравнений, описывающих движение отдельных элементов этих конструкций, а под математическим моделированием понимать численное решение этих уравнений.

На математические модели, описывающие динамику раскрытия конструкций, размерный фактор сказывается через изменение системы упрощающих допущений, касающихся распределения масс между телами и соотношения геометрических размеров, позволяющих, собственно, получить такое описание исходной технической системы, которое, будучи как можно более простым, сохраняет ее основные динамические особенности.

Раскрывающиеся крупногабаритные космические конструкции ферменного тип представляют собой многоэлементные системы, состоящие из десятков тысяч взаимосвязанных между собой с помощью шарнирных соединений отдельных трубчатых элементов рис. 1.

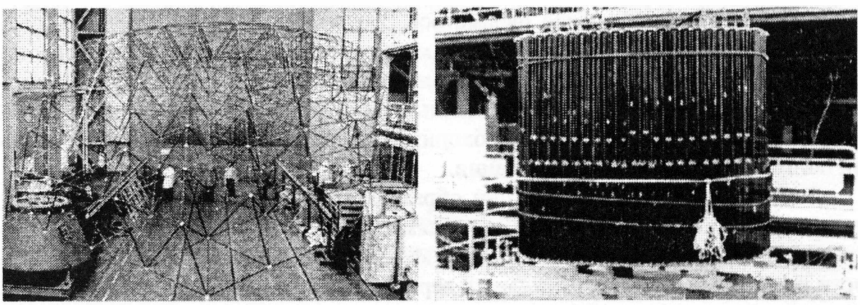


Рис. 1

Конструкции доставляются на космические орбиты в сложенном (транспортном) плотноупакованном состоянии и приведение их в рабочее положение связано с реализацией процесса раскрытия. Таким образом, при рассмотрении таких конструкций мы имеем дело с системой многих тел (трубчатые элементы). Для полного описания динамики системы многих тел требуется большое количество параметров, которые характеризуют геометрию, распределение масс, природу внешних сил и сил, действующих в местах их соединений.

Для исследования динамики сложных механических систем широко используются численные методы, в том числе матричные, обладающие рядом существенных преимуществ: простотой и наглядностью записи формул, удобством применения для расчетов на ЭВМ, единообразием использования для исследования как разомкнутых, так и замкнутых многозвенных систем.

Применение вышеописанных методов к исследованию динамики раскрывающихся конструкций ферменного типа на практике встречает пока огромные трудности, как при получении самих уравнений движения, так и при их интегрировании, связанные с необходимостью получения системы дифференциальных уравнений достаточно большого порядка, описывающей движение отдельных элементов. В процессе раскрытия при определенном относительном положении смежных трубчатых элементов конструкции на них накладываются связи, ограничивающие их взаимное перемещение. Установка трубчатых элементов конструкции на упоры (фиксаторы) при раскрытии эквивалентна наложению импульсных связей в произвольный момент времени. При наложении таких связей возникает явление удара, которое приводит к скачкообразному изменению скоростей элементов раскрывающейся конструкции. Конструкции ферменного типа имеют структуру взаимосвязей с замкнутыми кинематическими цепями. Поэтому в диссертации при разработке математических моделей раскрытия конструкций ферменного типа учитываются их следующие особенности: многозвенность, ударный характер установки элементов на упоры или фиксаторы, ограничивающие взаимное движение смежных звеньев, а также то, что они относятся к системам с замкнутыми кинематическими цепями.

С ростом числа взаимосвязанных между собой элементов крупногабаритных конструкций ферменного типа существенно возрастают объемы вводимой исходной информации в виде параметров, характеризующих геометрию, распределение масс и сил, действующих в местах соединений. При этом актуальной задачей становится подготовка и контроль большого объема исходной информации. Ручной ввод исходных данных становится малоэффективным, поэтому для исключения ошибок необходимо создавать блоки автоматизированной подготовки исходной информации.

Рассматриваемые конструкции образованы двумя поясами, соединенными между собой диагональными стержнями. Пояс, связанный со штангой, которая закрепляется на базовом элементе конструкции, либо на носителе, в частности на корпусе КА, будем называть верхним поясом, а другой – нижним. Узловые шарнирные соединения верхнего пояса располагаются на образующей

поверхности, которая может быть плоской или осесимметричной. Сам же верхний пояс может не обладать какой-либо симметрией.

На ранних стадиях проектирования особую ценность представляют методы и программы, которые с достаточной для практики степенью точности при малых вычислительных затратах позволяют провести конструктивные проработки различных вариантов, оценить их характеристики и выбрать наиболее рациональный вариант. Основным требованием к рабочей программе на этом этапе является минимальное время расчета одного варианта.

В первом приближении расчетная модель может быть представлена в виде дискретных пружин с массами, рис. 2.

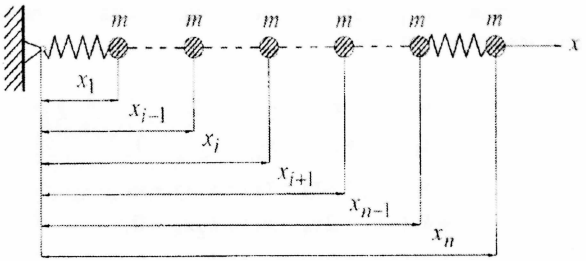


Рис. 2. Простейшая расчетная модель

Принимая, что предварительное поджатие всех пружин одинаково, запишем выражение потенциальной энергии системы в виде

$$W = W^0\left[\left(\frac{x_1}{l}-1\right)^2+\sum_{i=1}^{n-1}\left(\frac{x_{i+1}-x_i}{l}-1\right)^2\right], \qquad (1)$$

где W^0 – энергия предварительно напряженной пружины; l – длина одного звена, n – число степеней свободы.

Кинетическая энергия системы и диссипативная функция соответственно равны:

$$T=\sum_{i=1}^{n}\frac{m}{2}\dot{x}_i^2, \quad D=\sum_{i=1}^{n}\frac{\mu}{2}\dot{x}_i^2, \qquad (2)$$

где m – масса одного звена, μ – коэффициент диссипации.

Для получения уравнений движения воспользуемся уравнением Лагранжа II-го рода

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i}\right)-\frac{\partial T}{\partial x_i}+\frac{\partial W}{\partial x_i}+\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_i}=0, \quad i\in[1,n]. \qquad (3)$$

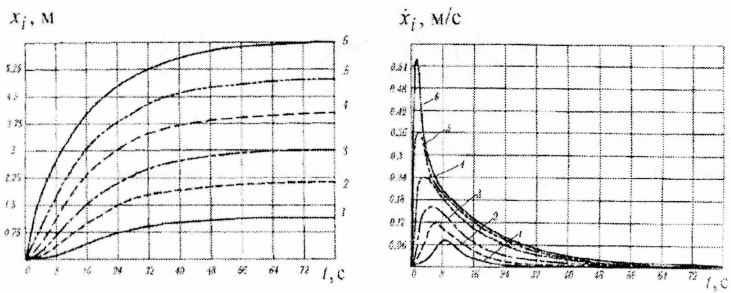
Подставляя выражения (1)-(2) в (3), получим систему уравнений

$$\left.\begin{aligned}
&m\ddot{x}_1+\frac{2W^0}{l^2}(2x_1-x_2)+\mu\dot{x}_1=0,\\
&m\ddot{x}_2+\frac{2W^0}{l^2}(-x_1+2x_2-x_3)+\mu\dot{x}_2=0,\\
&\ldots\quad\ldots\quad\ldots\quad\ldots\quad\ldots\\
&m\ddot{x}_n+\frac{2W^0}{l^2}(-x_{n-1}+x_n)-\frac{2W^0}{l}+\mu\dot{x}_n=0.
\end{aligned}\right\}$$

На рис. 3 представлены результаты интегрирования уравнений движения цепочки пружин с массами для $n=6$:

$$\begin{aligned}
&\ddot{x}_1+k_1(2x_1-x_2)+k_2\dot{x}_1=0,\\
&\ddot{x}_2+k_1(-x_1+2x_2-x_3)+k_2\dot{x}_2=0,\\
&\ddot{x}_3+k_1(-x_2+2x_3-x_4)+k_2\dot{x}_3=0,\\
&\ddot{x}_4+k_1(-x_3+2x_4-x_5)+k_2\dot{x}_4=0,\\
&\ddot{x}_5+k_1(-x_4+2x_5-x_6)+k_2\dot{x}_5=0,\\
&\ddot{x}_6+k_1(-x_5+x_6)-k_3+k_2\dot{x}_6=0,
\end{aligned}$$

где $k_1=\frac{2W^0}{ml^2}$, $k_2=\frac{\mu}{m}$, $k_3=\frac{2W^0}{ml}$.



а б

Рис. 3. Результаты расчета движения цепочки из 6 пружин с массами:
а – перемещения масс; б – скорости перемещения масс

Данная расчетная модель позволяет достаточно просто провести анализ процесса раскрытия проектируемой конструкции ферменного типа и опреде-

лить необходимый запас потенциальной энергии упругих элементов, обеспечивающий ее надежное раскрытие. На основе этой модели создана быстродействующая программа для определения рациональных параметров раскрывающихся конструкций ферменного типа.

На рис. 4 приведены формы, принимаемые конструкцией в различные моменты времени при раскрытии. Формы конструкции получены на основе результатов расчета перемещений масс по времени, рис. 3. Для расчета использованы исходные данные, соответствующие характерным диапазонам параметров разрабатываемых реальных конструкций ферменного типа.

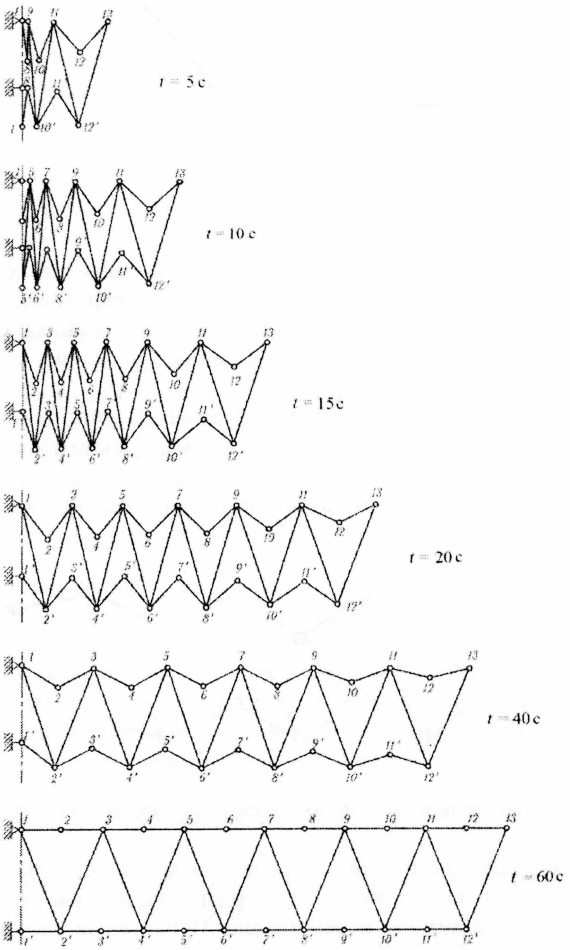


Рис. 4. Формы конструкции при раскрытии

На рис. 5 приведены зависимости времени раскрытия и максимальной скорости при раскрытии конструкции от параметра $2W^0/ml^2$

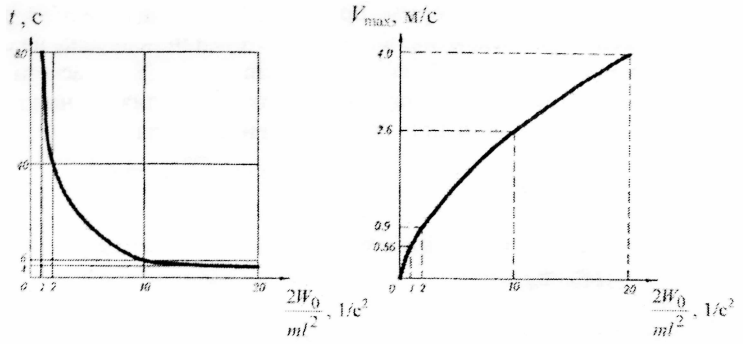


Рис. 5

Данная модель является наиболее простой из возможных расчетных моделей раскрытия осесимметричных ферменных конструкций. Существенный недостаток данной модели – невозможность оценить возникающие динамические нагрузки в момент фиксации или установки на упоры складывающихся стержней конструкции.

Если массу диагональных стержней ферменной конструкции разнести по узлам активных элементов, то при таком подходе достаточно рассматривать движение одной из радиальных полос. Цепочка складывающихся стержней формируется на основе заданной геометрии первоначально плоской ферменной конструкции, рис. 6.

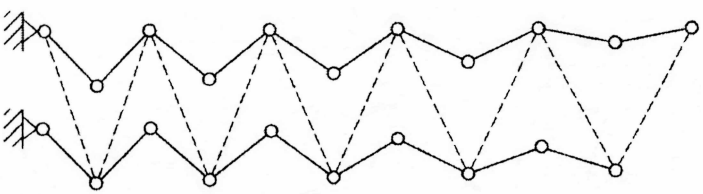


Рис. 6. Модель в виде цепочки складывающихся стержней

В процессе раскрытия при определенном относительном положении трубчатых элементов складывающихся стержней на них накладываются связи, ограничивающие их взаимное перемещение. Простейшая расчетная схема таких устройств может быть представлена в виде упругого и демпфирующего элементов с соответствующими характеристиками.

Если характеристики упругого и вязкого (демпфер) элементов линейные, то возникающие моменты от ограничивающих устройств M_y и $M_д$ определяются зависимостями

$$\begin{aligned} M_y &= k_y(\Delta\varphi_к - \Delta\varphi), \\ M_д &= c_д\Delta\dot{\varphi}, \end{aligned} \tag{4}$$

где k_y и $c_д$ – коэффициенты жесткости и вязкого трения упругого и демпфирующего элементов; $\Delta\varphi_к$ – относительный угол между смежными элементами конструкции, соответствующий моменту наложения связи на них; $\Delta\dot{\varphi}$ – относительная угловая скорость смежных элементов. Эти элементы вводятся в шарнирный узел в необходимые моменты времени с помощью ступенчатых функций, отражающих логику процесса раскрытия элементов трансформируемых конструкций.

Если установка элементов конструкции происходит на упоры, то на них накладываются ограничения типа неравенств

$$\Delta\varphi \geq \Delta\varphi_к. \tag{5}$$

Ограничение (5) выполняется за счет применения следующей логики построения расчетного алгоритма. Если ограничение не достигается, то уравнения движения интегрируются на следующем шаге по времени без учета ограничений. Если при этом выясняется, что будет скоро достигнуто ограничение по относительному углу смежных тел, то выбирается меньший шаг по времени, который используется до момента удара.

В момент удара

$$\Delta\varphi_{к\min} \leq \Delta\varphi_к \leq \Delta\varphi_{к\max}, \tag{6}$$

и в конкретный шарнирный узел, где достигнуто ограничение (6), вводятся упругий и демпфирующий элементы. Если на следующем шаге интегрирования выясняется, что снова выполняется ограничение (5), то упругий и демпфирующий элементы исключаются из шарнирного узла. Если установка элементов конструкции происходит на фиксаторы, то на них накладываются ограничения типа (6). Это ограничение выполняется за счет применения следующей логики построения расчетного алгоритма. Если ограничение не достигается, то уравнения движения интегрируются на следующем шаге по времени без учета ограничений. Если при этом выясняется, что скоро будет достигнуто ограничение по относительному углу смежных тел, то выбирается меньший шаг по времени, который используется до момента удара. Удар считается абсолютно неупругим, т.е. предполагается, что после удара

$$\Delta\dot{\varphi} = \Delta\ddot{\varphi} = 0\ . \tag{7}$$

Выполнение условия (7) обеспечивается с помощью демпфирующего элемента. Общие рекомендации по нахождению коэффициентов упругого и вязкого элементов состоят в следующем:

– необходимо провести статическое нагружение элементов трансформируемых конструкций и определить по экспериментальным данным коэффициент жесткости упругого элемента;

– для нахождения коэффициента демпфирования вязкого элемента необходимо провести серию тестовых расчетов; на основе их результатов и выбирается коэффициент демпфирования.

Рассмотрим установку на упор или фиксатор одного элемента трансформируемой конструкции, рис. 7.

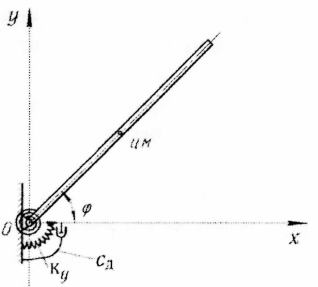


Рис. 7

Уравнение углового движения элемента трансформируемой конструкции имеет вид

$$J_0\ddot{\varphi} = -k(\varphi + \varphi_z) - (k_y \Delta\varphi + c_д\dot{\varphi}) \cdot H(\Delta\varphi) \ ,$$

где J_0 – момент инерции элемента раскрывающейся (трансформируемой) конструкции; k – коэффициент жесткости пружины, обеспечивающей раскрытие; φ_z – угол предварительной закрутки пружины; k_y – коэффициент жесткости упругой компоненты модели упора (фиксатора); $c_д$ – коэффициент демпфирования вязкой компоненты модели упора (фиксатора); φ – угол поворота элемента конструкции, $\Delta\varphi = (\varphi - \varphi_к)$ – относительный угол, соответствующий моменту установки на упор (фиксатор); $H(\Delta\varphi)$ – функция, которая принимает значение $0(\Delta\varphi \geq 0)$ или $1(\Delta\varphi < 0)$.

Параметр φ_z, характеризующий предварительное заневоливание пружины, оказывает существенное влияние на время затухания колебаний элемента конструкции. При изменении параметра φ_z от 0 до $\pi/2$ время раскрытия элемента конструкции сокращается почти на порядок. Однако дальнейшее увеличение φ_z до π несущественно влияет на время раскрытия. Частота колебатель-

ного процесса элемента конструкции возрастает с ростом коэффициента жесткости пружины, обеспечивающей раскрытие. В тестовых расчетах этот параметр изменялся от 0,1 до 1,0 Н·м/рад. В этих пределах коэффициент жесткости пружины значительно влияет на время раскрытия элемента конструкции. Дальнейшее увеличение коэффициента жесткости не приводит к существенному уменьшению времени раскрытия.

Для определения параметров модели упора складывающихся стержней ферменной конструкции был проведен цикл экспериментов по раскрытию стержней реальной ферменной конструкции. Качественное совпадение результатов экспериментальных исследований и расчетов позволяет использовать такие модели упоров (фиксаторов) для расчета раскрытия трансформируемых конструкций ферменного типа.

Для расчета использовался программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем Эйлер (Euler). На рис. 8 представлены результаты расчета раскрытия полосы складывающихся стержней при установке трубчатых элементов на упоры и фиксаторы.

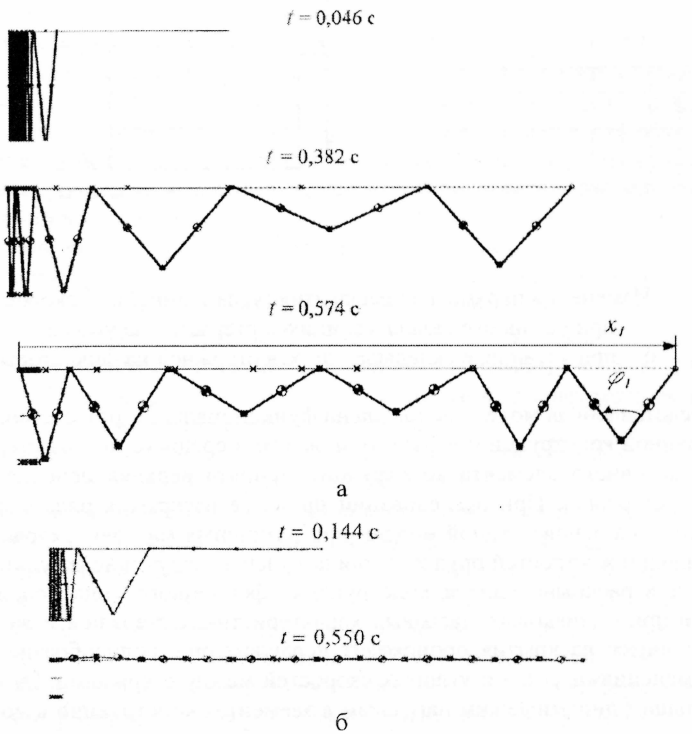


Рис. 8. Раскрытие радиальной полосы: а – установка складывающихся стержней на упоры; б – установка складывающихся стержней на фиксаторы.

Расчеты проведены с использованием исходных данных, соответствующих характерным типовым диапазонам параметров разрабатываемых реальных конструкций ферменного типа.

На рис. 9 приведены соответствующие изменения кинематических параметров радиальной полосы.

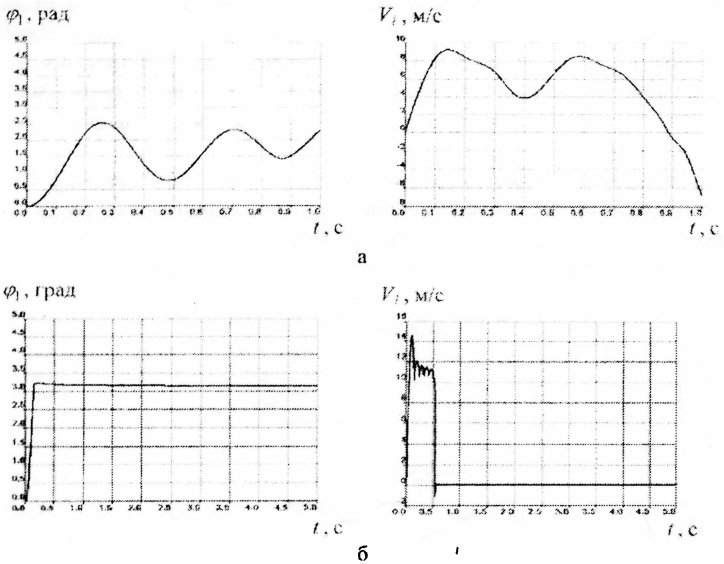


Рис. 9. Изменения параметров раскрытия (угла и линейной скорости):
а – при установке складывающихся стержней на упоры;
б – при установке складывающихся стержней на фиксаторы.

Представленная модель основана на функциональном разделении элементов ферменной конструкции: верхнего, нижнего и среднего поясов стержней. В качестве активного элемента конструкции принята верхняя цепочка складывающихся стержней. При исследовании процесса раскрытия ряда ферменных конструкций на основе данной модели при различных массовых характеристиках стержней и жесткостей пружин были получены следующие результаты.

Если в раскрывающихся конструкциях ферменного типа используются упоры, то при одинаковых массовых характеристиках стержней и жесткостей пружин процесс раскрытия происходит неравномерно, волнообразно, с большими изменениями углов и угловых скоростей между стержнями. Это приводит к большим динамическим нагрузкам в элементах конструкции в момент установки складывающихся стержней на упоры. Однако за счет рационального распределения жесткостей пружин можно добиться равномерного раскрытия.

Если используются фиксаторы, то также за счет рационального распределения жесткостей пружин можно уменьшить динамические нагрузки в элементах конструкции.

Полученные результаты открывают новые возможности для оптимизации различных конструктивных решений при проектировании раскрывающихся крупногабаритных конструкций ферменного типа. Данная модель относится к категории рабочих или исследовательских моделей, необходимых на этапе эскизного проектирования. По сравнению с простейшей моделью она более полно отражает основные механические свойства реальных элементов конструкции. Использование данной модели позволяет оценить динамические нагрузки, возникающие в элементах раскрывающейся конструкции в момент установки на упоры или фиксаторы складывающихся стержней. Ее предлагается использовать для определения рационального соотношения масс и жесткостей, обеспечивающего надежное раскрытие конструкции с минимальными динамическими нагрузками на ее элементы.

Одностепенная модель построена с использованием формализма Лагранжа для плоской ферменной конструкции. Полученные на ее основе соотношения позволяют определить положение всех узловых элементов конструкции ферменного типа в произвольный момент времени. Эти данные могут быть использованы при визуализации процесса раскрытия конструкции. Опыт экспериментальной отработки подобных систем показывает, что в реальных условиях не все складывающиеся стержни полностью раскрываются, что обусловлено технологическими погрешностями при сборке конструкции. Использование реальных размеров стержней при визуализации процесса раскрытия на основе разработанной модели позволит уже на этапе проектирования ввести соответствующие коррективы в разрабатываемую конструкцию.

Для структур, отличных от плоской, при построении модели составить функцию Лагранжа и ее производные не представляется возможным из-за громоздких аналитических выкладок. В этом случае не могут помочь даже такие мощные компьютерные системы символьной математики, как Maple и Mathematica. Целесообразно использовать возможности современных пакетов моделирования динамики механических систем.

Для решения задачи можно воспользоваться программным комплексом MSC.ADAMS (Automatic Dynamics Analysis of Mechanical Systems) или программным комплексом автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем EULER. Программный комплекс EULER предназначен для математического моделирования поведения многокомпонентных механических систем в трехмерном пространстве. В данном программном комплексе построены модели и проведен численный анализ динамики раскрытия плоской и параболической конструкций ферменного типа (рис. 10). Цифрами 1,2,…,8 на рисунке 10,а обозначены узлы ферменной конструкции, а на рисунке 10,с – соответствующие этим узлам скорости.

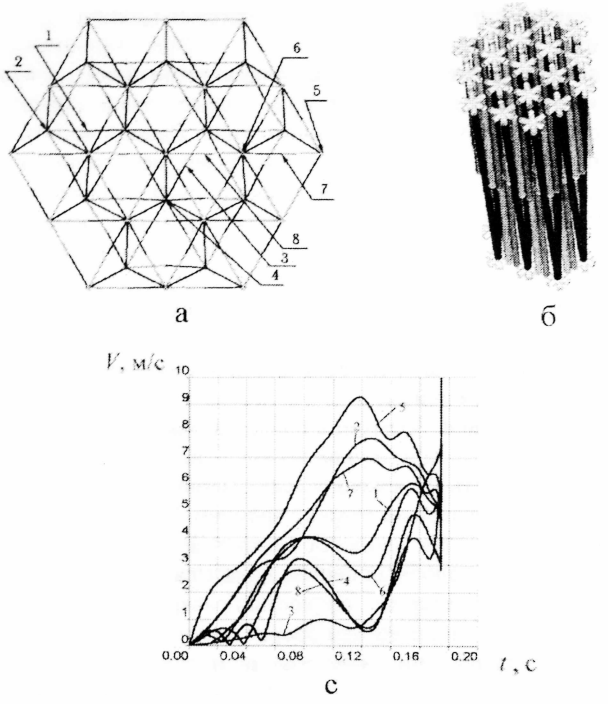


Рис. 10. Модель ферменной конструкции: а – раскрытое состояние; б – сложенное состояние; с – скорости узлов ферменной конструкции.

Модели относятся к категории поверочных моделей, предназначенных для уточнения применимости рабочих моделей, а также оценки достоверности получаемых с их помощью результатов. Они необходимы на стадии рабочего проектирования, а также в процессе экспериментальной отработки раскрытия крупногабаритных конструкций ферменного типа для моделирования различных нештатных ситуаций.

Во второй главе представлены результаты частотных испытаний конструкций ферменных зеркальных раскрывающихся антенн с рефлекторами 5×3 м и 6×3 м, трубчатые элементы которых выполнены из стали, а также ферменного рефлектора 6×7 м, трубчатые элементы которого выполнены из углепластика.

Одной из основных целей моделирования динамики раскрывающихся крупногабаритных ферменных космических конструкций является получение относительно простых и надежных моделей конструкции для использования как в процессе проектирования, так и при разработке систем управления. Эти моде-

ли предназначаются для решения таких сложных проблем, как управление, ориентация и стабилизация космического аппарата с крупногабаритной ферменной конструкцией. Они необходимы для оценки динамического отклика конструкции на нестационарные воздействия, связанные с обеспечением переориентации конструкции из одного положения в другое или ее возможного программного углового движения. Частоты свободных колебаний крупногабаритных ферменных конструкций, как правило, располагаются очень плотно и концентрируются в нижней части спектра. Для моделирования низкочастотных форм движения конструкции в ряде случаев требуется определить достаточно большое число частот и форм колебаний. Это необходимо для решения задач отстройки от резонанса при адаптации систем управления, а также минимизации последствий внешних воздействий на конструкцию.

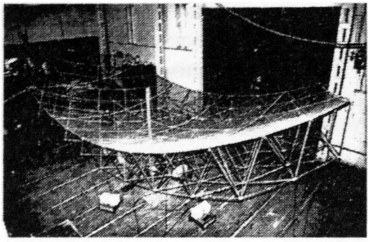
Помимо задачи анализа динамического поведения конструкции, на первый план выдвигаются вопросы коррекции параметров расчетной модели раскрывающейся крупногабаритной ферменной конструкции по результатам наземного эксперимента. Значительную роль при решении задачи коррекции математической модели играет планирование эксперимента. При проведении частотных испытаний конструкция нагружается разнообразными силовыми воздействиями, которые должны возбуждать все исследуемые частоты и формы колебаний конструкции. Таким образом, специальные целенаправленные эксперименты используются для получения полной и объективной информации о динамических характеристиках конструкции.

Для возбуждения колебаний антенны, стержни которой выполнены из стали (рис 11а) и углепластика (рис. 11б), и регистрации откликов использовались многоканальная виброустановка фирмы "Продера" (рис. 11в) и частотный анализатор английской фирмы "Шлюмберже".

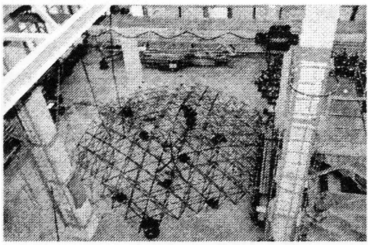
С помощью виброустановки "Продера" проведены частотные испытания рефлектора антенны при синусоидальном возбуждении с изменением частоты возбуждения в диапазоне 0-50 Гц. Колебания возбуждали электродинамическими вибраторами EX 58 с максимальным усилием возбуждения 50 Н, массой подвижных частей 0,11 кг и жесткостью упругих элементов 1900 Н/м. Динамический диапазон вибраторов 0-3000 Гц, амплитуда перемещения подвижной катушки – 0,007 м.

В резонансном методе конструкция возбуждалась гармонической силой, а амплитуда колебаний измерялась в различных узлах верхнего стержневого пояса. Усилие от вибраторов прикладывалось к узлам нижнего стержневого пояса. Для исключения возможности расположения точки возбуждения вблизи узловой линии воздействие вибраторов осуществляли в различных местах нижнего стержневого пояса и в различных направлениях. В процессе испытаний задавали одноточечное и многоточечное возбуждение конструкции.

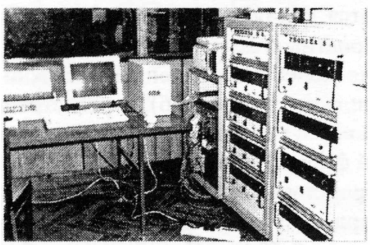
Уровень динамического воздействия выбирался минимальным с точки зрения возможности рассмотрения конструкции рефлектора как динамической системы с линейными свойствами, для которой справедливы понятия частот и форм собственных колебаний.



а



б



в

Рис. 11. Частотные испытания ферменных рефлекторов космических антенн: а – стержни конструкции выполнены из стали; б – стержни конструкции выполнены из углепластика; в – виброустановка "Продера"

Форма колебаний рефлектора, изготовленного из стали, полученная экспериментально, представлена на рис. 12. Вследствие проявления конструкцией нелинейных упругих свойств резонансные частоты для различных узлов конструкции отличаются друг от друга. В связи с этим следует говорить о некоторых диапазонах частот, которые соответствуют собственным колебаниям конструкций. Данный диапазон в проведенных исследованиях составлял примерно 0,2 Гц. С ростом частоты возбуждения амплитудно-частотные характеристики приобретают все более хаотический характер, что вызвано возрастающим проявлением нелинейных свойств конструкции.

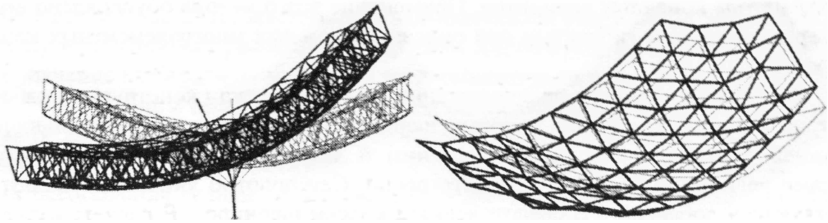


Рис. 12. Изгибные колебания штанги с рефлектором как абсолютно твердым телом в вертикальной плоскости, проходящей через большую ось рефлектора. Частота 3,22 Гц

На высоких частотах возбуждения колебания сопровождаются дребезжанием за счет наличия люфтов в шарнирных соединениях стержней.

В третьей главе приведены результаты исследования влияния жесткостей отдельных элементов ферменной конструкции на ее динамические характеристики. Экспериментально полученные жесткости стержней, выполненных из материала 12Х18Н10Т, оказались меньше жесткости трубчатого элемента, выполненного из того же материала, рис. 13.

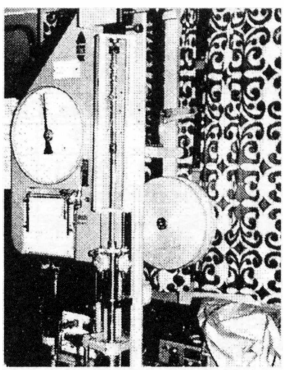


Рис. 13

Объясняется это конструктивными особенностями складывающихся и диагональных стержней. Для диагональных стержней разброс составлял порядка 10÷15%, однако для складывающихся стержней разброс был более значительным: отношение жесткости трубчатого элемента к экспериментально полученным значениям изменялось в широком диапазоне. Это обусловлено разбросом жесткостных свойств собственно шарниров, расположенных в середине каждого складывающегося стержня.

Для обеспечения максимально точного и подробного описания упругих характеристик конструкции использовалась расчетная модель, построенная на

основе метода конечных элементов. Применение этого метода обусловлено его универсальностью и гибкостью при описании сложных многоэлементных конструкций.

Расчеты проведены в предположении, что все стержни конструкции работают на растяжение-сжатие, узловые шарниры и шарниры складывающихся стержней считаются абсолютно жесткими и заменяются сосредоточенными массами величиной 55 и 15 г соответственно. Сетеполотно учитывалось соответствующей добавкой к сосредоточенным массам шарниров. В расчете варьировали значения жесткостей диагональных и складывающихся стержней. Для исследования влияния жесткостных свойств стержней на динамические характеристики конструкции использовали конечно-элемент-ный программный комплекс UAI/NASTRAN. Для снижения трудоемкости ввода исходных данных был создан текстовый файл на языке Auto LISP, который после обработки его в системе Auto CAD передавался в графический редактор FEMAP, входящий в комплекс NASTRAN. В качестве конечного элемента был взят стержневой элемент "rod".

В таблице 1 приведены результаты вычислений для девяти низших частот собственных колебаний ферменной конструкции. Значения частот в первой строке соответствуют случаю, когда жесткость диагональных и складывающихся стержней задавалась равной жесткости трубчатых элементов.

Таблица 1

№	Частота, Гц								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1,89	3,53	5,04	28,52	26,11	29,74	33,35	36,88	46,73
2	1,85	3,49	5,00	21,21	23,72	28,00	32,11	33,85	34,82
3	1,82	3,49	5,00	20,75	23,31	27,29	31,74	33,26	33,71

Вторая строка частот соответствует расчетному случаю, когда жесткость только складывающихся стержней принималась в 2 раза меньше жесткости трубчатых элементов. Третья строка значений частот соответствует расчету, когда жесткость всех стержней (складывающихся и диагональных) ферменной конструкции принималась в 2 раза меньше жесткости трубчатых элементов. Анализ результатов расчета показал, что значения частот, соответствующих формам колебаний упругой штанги и ферменной конструкции рефлектора как твердого тела (три первые строки в табл. 1), практически совпадают. Существенно различаются значения частот, которые соответствуют собственным колебаниям ферменного рефлектора, обусловленным упругими свойствами стержневой конструкции. При этом разница в значениях частот ферменной конструкции, когда жесткость всех стержней была меньше жесткости трубчатых элементов и когда жесткость лишь складывающихся стержневых элементов была меньше жесткости трубчатых элементов, не превышает 2-3%. Следовательно, на значения частот упругих колебаний ферменной конструкции рефлектора существен-

ное влияние оказывает жесткость складывающихся стержневых элементов. Поэтому в дальнейших расчетах варьировали жесткость этих стержней, при этом ее значение выбирали из интервала экспериментально полученных данных.

В таблице 2 приведены результаты вычислений частот собственных колебаний конструкции ферменного рефлектора, соответствующие форме колебаний, обусловленной осесимметричной деформацией конструкции рефлектора как параболоида вращения, жестко защемленного в полюсе (частота 13,98 Гц), форме колебаний, обусловленной скручиванием конструкции рефлектора относительно его большой оси (частота 22,98 Гц) и форме колебаний, характеризующейся наличием трех узловых линий, параллельных большой оси конструкции рефлектора, и двух узловых линий, параллельных ее малой оси (частота 40,54 Гц). Значения частот в первом столбце соответствуют экспериментально полученным значениям. Второй столбец частот соответствует случаю, когда жесткость складывающихся стержней задавалась равной жесткости трубчатых элементов. Третий, четвертый и пятый столбцы частот соответствуют расчетным случаям, когда жесткость складывающихся стержней принималась в 3, 5 и 10 раз меньше жесткости трубчатых элементов соответственно.

Таблица 2

Частота, Гц				
1	2	3	4	5
11,00	25,11	17,63	13,87	9,94
23,77	46,73	28,96	22,98	15,71
40,90	72,04	49,76	40,54	29,91

В модели диагональные и складывающиеся стержни были представлены в виде составных неоднородных стержней постоянного сечения. Условные модули упругости материалов участков данных стержней определялись на основе результатов испытаний на растяжение стержней реальной конструкции.

Анализ частот и форм собственных колебаний конструкции показал, что:

– на значения частот упругих колебаний ферменной конструкции существенное влияние оказывает жесткость складывающихся стержневых элементов;

– на этапе проектирования подобных конструкций в качестве расчетной модели возможно использовать ферменную конструкцию, состоящую из стержней с жесткостью на растяжение, равной жесткости трубчатых элементов;

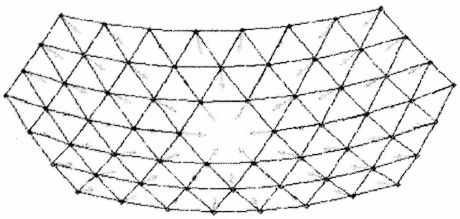
– для уменьшения погрешностей при определении частот необходимо в качестве жесткости складывающихся стержней брать ее экспериментально полученное значение.

Четвертая глава посвящена анализу прочности элементов при раскрытии ферменных конструкций.

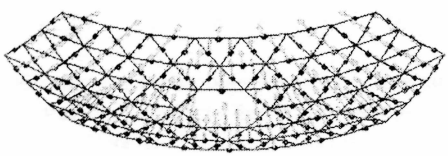
Анализ прочности проводится в два этапа. На первом этапе ведется расчет раскрытия конструкции в предположении, что все ее элементы являются абсолютно твердыми телами и определяется поле скоростей данных элементов в момент установки их на упоры. На втором этапе исследуется изменение

напряженно-деформированного состояния упругой конструкции во времени при заданных (полученных на первом этапе) начальных условиях. При этом проводится согласование расчетной модели раскрытия с конечно-элементной моделью конструкции в раскрытом рабочем состоянии.

Задача определения прочности трубчатых элементов при раскрытии конструкции рефлектора формулируется следующим образом: определить напряженно-деформированное состояние упругой конструкции рефлектора с заданными начальными скоростями и начальными перемещениями. Начальные перемещения принимаем равными нулю, а начальные скорости узлов принимаем равными скоростям узлов, полученным в результате интегрирования уравнений движения, рис. 14.



а



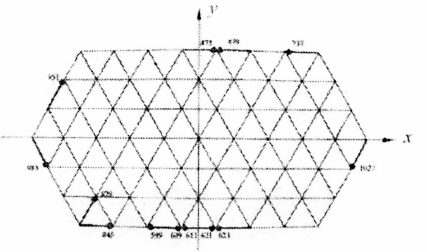
б

Рис. 14. Поле скоростей верхнего пояса ферменной конструкции:
а – узловых шарниров; б – шарниров складывающихся стержней

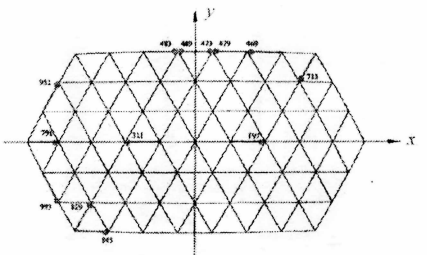
Расчетная модель основана на методе конечных элементов и анализ ее динамики сводится к решению задачи Коши для системы обыкновенных линейных дифференциальных уравнений второго порядка $M\ddot{u} + D\dot{u} + Ku = 0$ при начальных условиях $u(0) = u_0$, $\dot{u}(0) = \dot{u}_0$ где M, D, K – соответственно матрицы масс, демпфирования и жесткости конструкции; $u, \dot{u}, \ddot{u}$ – векторы узловых перемещений, скоростей и ускорений.

Для прямого интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка использованы специальные процедуры, ориентированные на метод конечных элементов. Шаг интегрирования для обеспечения

точности и устойчивости вычислительной схемы выбирается на основе результатов решения задачи по определению частот собственных колебаний конструкции. Он должен составлять долю от наименьшего периода (наибольшей частоты собственных колебаний конструкции). Прочностной расчет проводился с помощью программного комплекса MSC/NASTRAN. В расчетной модели использовался балочный элемент "beam", учитывающий работу стержней на растяжение-сжатие, кручение и изгиб. Трубчатые элементы диагональных и складывающихся стержней рефлектора выполнены из однонаправленного углепластика с продольным расположением волокон. Наружная и внутренняя поверхности элементов образованы кольцевой укладкой стеклонити. Толщина углепластикового слоя составляет 0,4 мм, а стеклопластиковых слоев 0,1 мм. Внешний диаметр элементов равен 10,6 мм. Трубчатые элементы имеют следующие характеристики: $E = 156$ ГПа, ρ = 1098 кг/м^3, μ = 0,3. Длины образующих складывающихся стержней равны 0,53 м, а диагональных 0,57 м. Шаг интегрирования по времени принят $\Delta t = 10^{-4}$с. На рис. 15 показано расположение узлов и соответствующих им складывающихся стержней верхнего пояса, в которых достигаются максимальные значения напряжений.



Верхний пояс. Максимальные напряжения



Верхний пояс. Минимальные напряжения

Рис. 15. Расположение узлов и соответствующих им складывающихся стержней, в которых достигаются максимальные и минимальные значения напряжений

Рассматриваемые напряжения соответствуют трубчатым элементам, расположенным на периферии конструкции рефлектора антенны. Это объясняется тем, что ударный характер нагрузки определяется начальными скоростями, наибольшие значения которых достигаются именно на периферии конструкции. За максимальные значения напряжений были приняты суммарные значения напряжений от изгиба и растяжения-сжатия трубчатых элементов. Несимметричность распределения по поясам максимальных и минимальных напряжений объясняется несимметричностью самой конструкции рефлектора, обусловленной конструктивным выполнением нижнего пояса.

Из проведенного анализа следует, что напряженное состояние трубчатых элементов в момент полного раскрытия определяется в основном напряжениями от изгиба. Доля осевых напряжений, которые являются растягивающими, не превышает 20% в различные моменты времени.

Проведенные расчеты показали, что наибольшее напряжение составляет $\sigma_{\text{наиб}}$ = 308 МПа. Из экспериментальных исследований механических характеристик трубчатых образцов из углепластика (рис. 16) следует, что среднее значение разрушающих напряжений $\bar{\sigma}_{\text{разр}}$ = 392 МПа при значениях коэффициентов k_V = 26%. Данное значение получено для образцов, у которых клей между металлическими законцовками и углепластиком не приобрел максимально возможных прочностных свойств. В процессе же температурных воздействий прочность клеевого слоя увеличивалась за счет дополнительной полимеризации. В результате $\bar{\sigma}_{\text{разр}}$ = 532 МПа.

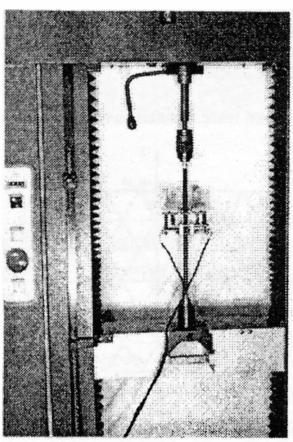


Рис. 16.

Таким образом, коэффициент запаса $n_b = \bar{\sigma}_{\text{разр}} / \sigma_{\text{наиб}}$ может принимать значения от 1,27 до 1,72.

Повысить значение коэффициента запаса можно за счет уменьшения величины первоначальной потенциальной энергии пружин, т.е. изменением упругой характеристики используемых в конструкции пружинных элементов. При этом соответственно уменьшаются угловые скорости в момент установки элементов складывающихся стержней на упоры. Это приводит к уменьшению величины скоростей, определяющих величину ударного импульса, действующего на рассматриваемую упругую ферменную конструкцию.

Пятая глава посвящена разработке принципов моделирования динамического поведения крупногабаритных ферменных конструкций при их раскрытии из транспортного положения и в процессе эксплуатации. Проведение экспериментов по раскрытию на орбите с целью проверки работоспособности конструкций в условиях, в которых они должны функционировать, связано с большими материальными затратами и могут быть проведены лишь на заключительной стадии их создания. Полная экспериментальная отработка процесса раскрытия крупногабаритных ферменных конструкций и принятие ими необходимой формы в наземных условиях сопряжена с рядом принципиальных трудностей. Невозможность одновременно устранить влияние сил тяжести и сил сопротивления среды вносит существенные трудности в суждения об адекватности результатов экспериментов с действительной работой конструкции в орбитальных условиях. Это, в свою очередь, требует создания критериев по выбору таких моделей и оценки влияния стенда имитации невесомости и сопротивления среды на процесс раскрытия. В связи с этим предпринята попытка физического моделирования раскрытия ферменной конструкции.

На основе анализа размерности и анализа уравнений движения в лагранжевой форме получены следующие критериальные уравнения для моделирования процесса раскрытия, в частности, антенн ферменного типа

$$j = \varphi_1\left(\frac{\tau^2 E}{\rho l^2}, \frac{\rho \lg}{E}, \frac{c}{El^3}, f, \frac{m}{\rho F}, \frac{F}{l^2}, \frac{E'}{E}, \frac{W^0}{c}\right),$$

$$\varphi = \varphi_2\left(\frac{\tau^2 E}{\rho l^2}, \frac{\rho \lg}{E}, \frac{c}{El^3}, f, \frac{m}{\rho F}, \frac{F}{l^2}, \frac{E'}{E}, \frac{W^0}{c}\right),$$

$$\omega l\sqrt{\frac{\rho}{E}} = \varphi_3\left(\frac{\tau^2 E}{\rho l^2}, \frac{\rho \lg}{E}, \frac{c}{El^3}, f, \frac{m}{\rho F}, \frac{F}{l^2}, \frac{E'}{E}, \frac{W^0}{c}\right),$$

$$\frac{N}{El^2}=\varphi_4\left(\frac{\tau^2 E}{\rho l^2},\frac{\rho \lg}{E},\frac{c}{El^3},f,\frac{m}{\rho F},\frac{F}{l^2},\frac{E'}{E},\frac{W^0}{c}\right),$$

где l – характерный линейный размер, с помощью которого могут быть выражены в определенных долях все остальные размеры; F – площадь поперечного сечения стержней; E – модуль упругости материала стержней; E' – модуль упругости материалов шарниров; c – жесткость пружин в шарнирных соединениях; f – коэффициент трения в шарнирах; m – погонная масса стержней; ρ – плотность материала стержней; τ – время протекания процесса; g – ускорение свободного падения; j – перегрузки в конструкции; φ – угол между осью стержня и вертикальной осью; ω – частота колебаний; N – усилия в стержнях; W^0 – потенциальная энергия предварительной затяжки пружин.

Модель и натурная конструкция должны быть геометрически подобными. Однако форма поперечного сечения стержней в модели и натурной конструкции может быть различной в соответствии с критерием $F/l^2 = \text{idem}$. При этом должны быть подобными распределения погонных масс стержней m, коэффициентов трения в шарнирах f, модулей упругости материалов стержней и шарниров и начальной затяжки пружин W^0. При соответствующем подборе материалов и масштабов модели перенесение земных модельных испытаний в орбитальные условия для реальной конструкции имитирует невесомость с погрешностью, составляющей 4...8 %.

В заключении сформулированы общие выводы по работе.

В процессе выполнения работы получены следующие основные результаты.

1. Предложен комплексный подход к анализу динамики раскрывающихся крупногабаритных космических конструкций ферменного типа на основе совокупности разработанных моделей, каждая из которых нацелена на решение конкретных технических задач, связанных с исследованием параметров процесса раскрытия, определением динамических характеристик конструкции и оценкой прочности ее элементов. Он позволил с единых методических позиций упорядочить и формализовать построение расчетных моделей разной сложности за счет более полного учета физических свойств элементов реальной конструкции в соответствии с задачами этапов их проектирования, изготовления и экспериментальной отработки.

2. Создан комплекс методик и разработано алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс определения рациональных параметров раскрывающихся конструкций.

3. Дана оценка влияния массовых характеристик отдельных элементов конструкций ферменного типа на параметры ее раскрытия. Установлено, что для конструкций, масса стержней которых не превышает 20% массы шарниров, замена реальных стержневых элементов с распределенной массой невесомыми

элементами с разнесенными сосредоточенными массами в шарнирах приводит к упрощенной модели раскрытия, удобной для численного интегрирования, снижению объема проводимых вычислений и уменьшению вероятности появления ошибок.

4. Разработан метод оценки работоспособности раскрывающихся конструкций на основе комбинации метода расчета поля скоростей их элементов в момент полного раскрытия в предположении, что все элементы являются абсолютно твердыми телами и метода конечных элементов для расчета напряженно-деформированного состояния упругих конструкций во времени при заданных начальных условиях.

5. Исследованы динамические характеристики раскрывающихся космических конструкций ферменного типа с габаритными размерами 5×3 м, 6×3 м, 6×7 м, элементы которых выполнены как из традиционных, так и композиционных материалов. Выявлены диапазоны частот, соответствующие собственным колебаниям конструкции. Установлено, что при использовании унифицированных трубчатых элементов в конструкциях складывающихся и диагональных стержней существенное влияние оказывают жесткостные свойства на растяжение-сжатие складывающихся стержней, при этом изменение жесткостных свойств диагональных стержней оказывает влияние на значения частот собственных упругих колебаний конструкции лишь в пределах 2...3%.

6. Получены определяющие критерии для моделирования процесса раскрытия конструкций ферменного типа в виде безразмерных комплексов основных параметров, включающих их геометрические и физические характеристики. Показано, что поведение реальных конструкций в невесомости с достаточной для практики точностью моделируется при проведении испытаний в земных условиях при соответствующем выборе материалов и масштабов их моделей.

7. Полученные научные результаты использованы при проектировании, изготовлении и экспериментальной отработке раскрывающихся конструкций рефлекторов космических антенн в ГК НПЦ им. М.В. Хруничева, НПО Машиностроения и ОКБ МЭИ.

Изложенное, как представляется, дает основание считать, что результаты многолетних исследований, нашедших отражение в диссертации, можно рассматривать как крупное научное достижение, заключающееся в создании новых научно обоснованных подходов и реализующих их методов анализа динамики раскрывающихся крупногабаритных космических конструкций ферменного типа, а также оценки их работоспособности на начальной стадии проектирования и отработки по результатам наземных испытаний.

Основные положения диссертации **опубликованы в следующих работах.**

1. Долгополов Г.А., Зимин В.Н., Коровайцев А.В. Об одном алгоритме расчета движения замкнутых механических систем // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1986. – № 2. – С. 55-58.

2. Коровайцев А.В., Зимин В.Н. Расчет движения многозвенных систем // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1986. – № 7. – С. 53-56.

3. Усюкин В.И., Зимин В.Н. Расчет параметров движения замкнутых многозвенных систем // Расчеты на прочность. – 1989. – Вып. 29. – С. 201-209.

4. Зимин В.Н., Мешковский В.Е., Усюкин В.И. К расчету раскрытия космической ферменной антенны из транспортного положения в рабочее // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных тел: Материалы IV Международного симпозиума. – Москва, 1998. – С. 107-112.

5. Зимин В.Н., Мешковский В.Е. Разработка принципов моделирования динамического поведения крупногабаритных космических антенн // Оборонная техника. – 1999. – № 1-2. – С. 77-81.

6. Зимин В.Н., Мешковский В.Е. Моделирование раскрытия ферменной космической крупногабаритной антенны // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы V Международного симпозиума, г. Ярополец, 15-19 февраля 1999 г. – Москва, 1999. – С. 111-116.

7. Зимин В.Н., Мешковский В.Е. К расчету космической самораскрывающейся ферменной конструкции // Современные проблемы прочности: Научные труды III Международного семинара им. В.А. Лихачева, г. Старая Русса, 20-24 сентября 1999 г. – Великий Новгород, 1999. – Т.1. – С. 150-153.

8. Зимин В.Н., Колосков И.М., Мешковский В.Е. Особенности динамического расчета раскрывающейся космической антенны // Оборонная техника. – 2000. – № 1-2. – С. 60-62.

9. Зимин В.Н., Колосков И.М., Мешковский В.Е. Динамические испытания раскрывающейся зеркальной космической антенны // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2000. – № 2. – С. 120-124.

10. Зимин В.Н., Колосков И.М., Мешковский В.Е. К расчету динамических характеристик раскрывающейся крупногабаритной ферменной антенны // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы VI Международного симпозиума, г. Ярополец, 14-18 февраля 2000 г. – Москва, 2000. – С. 34-35.

11. Зимин В.Н., Колосков И.М., Мешковский В.Е. Особенности расчета динамических характеристик раскрывающейся ферменной космической конструкции // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2001. – № 2. – С. 12-15.

12. Зимин В.Н., Мешковский В.Е. Механика раскрывающейся ферменной космической конструкции // Теоретическая и прикладная механика: Аннотации докладов Восьмого Всероссийского съезда, г. Пермь, 23-29 августа 2001 г. – Екатеринбург, 2001. – С. 276-277.

13. Зимин В.Н., Мешковский В.Е. К определению динамических характеристик раскрывающейся космической конструкции // Современные проблемы прочности: Научные труды V Международного семинара им. В.А. Лихачева,

г. Старая Русса, 17-21 сентября 2001 г. – Великий Новгород, 2001.– Т. 1. – С. 246-249.

14. Зимин В.Н. Анализ процесса раскрытия ферменной космической конструкции // Оборонная техника. – 2002. – №№ 1-2. – С. 105-109.

15. Зимин В.Н., Колосков И.М., Мешковский В.Е. К построению математической модели ферменной раскрывающейся конструкции // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы VIII Международного симпозиума, г. Ярополец, 11-15 февраля 2002 г. – Москва, 2002.– С. 69-70.

16. К определению динамических характеристик раскрывающейся космической конструкции / В.Н. Зимин, И.М. Колосков, В.Е. Мешковский и др. // Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке: Доклады III Международной конференции-выставки. – Королев, 2002. – Кн. II. – С. 397-404.

17. Зимин В.Н., Колосков И.М., Мешковский В.Е. Об одном подходе к моделированию динамического поведения раскрывающейся ферменной конструкции // Оборонная техника. – 2002. – № 11. – С. 73-76.

18. Зимин В.Н. Динамика самораскрывающейся ферменной космической конструкции // Оборонная техника. – 2003. – № 1-2. – С. 63-67.

19. Зимин В.Н. Численный анализ прочности элементов раскрывающихся структурных космических конструкций // Оборонная техника. – 2004. – № 5. – С. 35-38.

20. Зимин В.Н. Особенности расчета раскрывающейся ферменной космической конструкции // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 1. – С. 20-25.

21. Зимин В.Н. Метод расчета раскрывающихся космических структурных конструкций // Оборонная техника. – 2005. – № 4-5. – С. 3-7.

22. Зимин В.Н., Мешковский В.Е. К расчету раскрывающейся крупногабаритной структурной конструкции // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XI Международного симпозиума, г. Ярополец, 14-18 февраля 2005 г. – Москва, 2005. – С. 68-70.

23. Зимин В.Н., Мешковский В.Е. Динамика крупногабаритных раскрывающихся космических конструкций // Ракетно-космическая техника. Фундаментальные и прикладные проблемы: Труды 2-й Международной конференции. – Москва, 2005.– Ч. II. – С. 27-32.

24. Бей Н.А., Зимин В.Н. Трансформируемые антенны больших размеров для геостационарных космических аппаратов // Антенны. – 2005. – Вып. 10. – С. 24-27.

25. Зимин В.Н. Трансформируемые ферменные конструкции зеркальных антенн больших размеров // Антенны. – 2005. – Вып. 10. – С. 28-31.

26. Зимин В.Н., Мешковский В.Е. Расчет раскрывающихся трансформируемых крупногабаритных космических конструкций // IX Всероссийский

съезд по теоретической и прикладной механике: Аннотации докладов. – Нижний Новгород, 2006. – Т. III. – С. 96.

27. Зимин В.Н. Механика трансформируемых структурных космических конструкций // Вестник Самарского госуниверситета. Естественнонаучная серия. Механика. – 2007. – № 4 (54). – С. 105-114.

28. Зимин В.Н. Особенности моделирования динамики раскрытия конструкций ферменного типа // Материалы XI Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2007. – С. 25-26.

29. Зимин В.Н. Об одном подходе к расчету прочности элементов космических ферменных конструкций при их раскрытии // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 2008. – № 2. – С. 3-10.