

В. Н. З и м и н

**ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РАСЧЕТУ
ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ
ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ПРИ ИХ РАСКРЫТИИ**

Предложен комплексный подход к расчету прочности раскрывающихся ферменных конструкций, основанный на 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

Перспективы развития радиоастрономии, солнечной энергетики, космической связи, исследований земной поверхности и других планет из космоса в настоящее время непосредственно связаны с возможностью вывода в космос крупногабаритных конструкций [1]. 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 антенн, устанавливаемых на космических аппаратах (КА) связи и дистанционного зондирования Земли. Это связано с повышением эффективности радиотехнических систем, используемых как в народном хозяйстве (связь, радиолокация и мониторинг), так и в военной области (радиоэлектронное обнаружение и подавление). Антенно-фидерные устройства, входящие в состав бортового ретрансляционного и радиолокационного комплексов, относятся к числу важнейших систем и оказывают первостепенное влияние на проектирование КА.

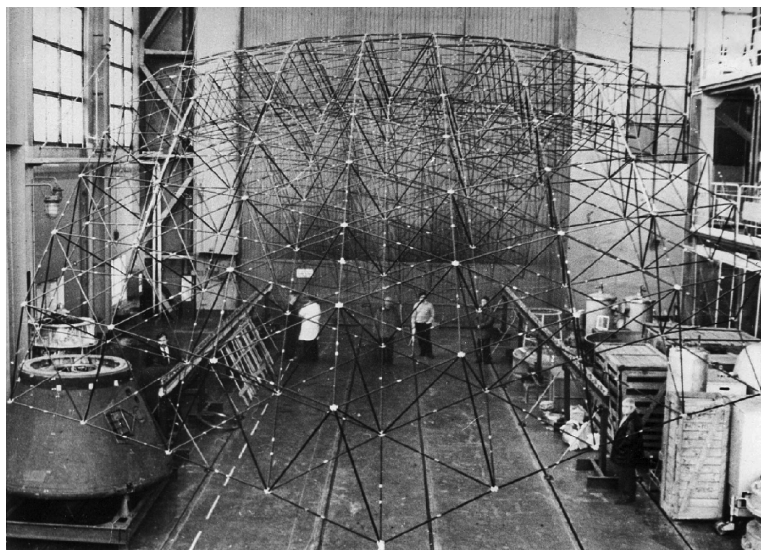
Проблема создания антенных систем с габаритными размерами, превышающими размеры выводимого в космическое пространство аппарата, сводится к разработке складных конструкций, раскрывающихся на орбите. При этом необходимо удовлетворить таким противоречивым требованиям, как минимальные вес и объем в сложенном транспортном положении, высокая надежность раскрытия из транспортного в рабочее положение и надежное функционирование на ор-

бите, максимальная площадь рабочей поверхности в раскрытом состоянии, стабильные радиотехнические характеристики в условиях эксплуатационных нагрузок. Обеспечение надежного раскрытия таких конструкций связано с решением сложных задач механики. Особое место среди создаваемых в настоящее время раскрывающихся антенн занимают ферменные конструкции, формирование которых происходит автоматически при срабатывании механизма зачековки вследствие первоначально накопленной упругой энергии пружин, расположенных в шарнирных соединениях. Такие конструкции отличаются технологичностью, компактностью при транспортировке, значительной разницей объемов в раскрытом и сложенном состояниях, быстротой раскрытия (единицы секунд), малой массой при значительных размерах и в то же время большой площадью рабочей поверхности в раскрытом состоянии. Ключевым элементом ферменных конструкций, определяющим в конечном счете их характеристики, является несущий силовой каркас. Именно он обеспечивает минимальные габаритные размеры в сложенном положении и высокую жесткость конструкции в раскрытом состоянии (рис. 1).

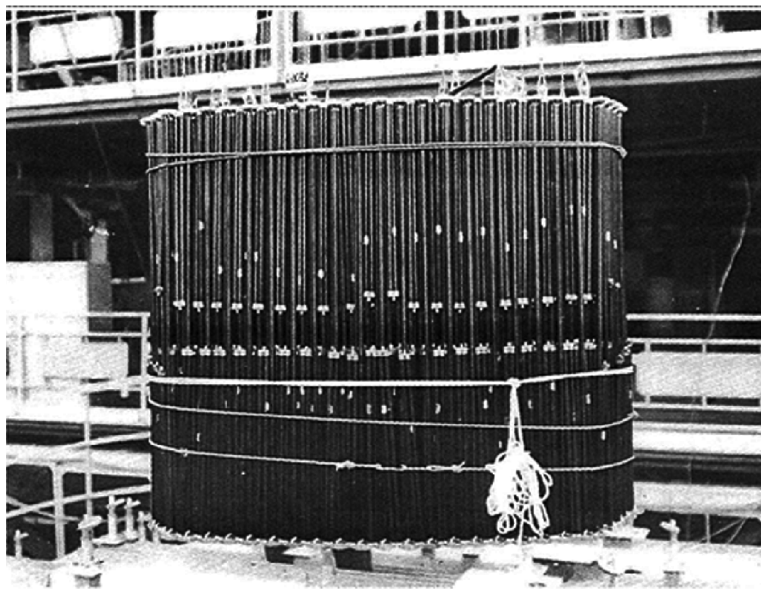
Принципы, заложенные в конструктивную схему ферменного каркаса, позволяют на базе его элементарной ячейки, например в форме тетраэдра, построить ферменные модули разнообразных пространственных конфигураций (сферические, цилиндрические, параболические и др.) с различными очертаниями внешнего контура и многообразной архитектурой. Габаритные размеры создаваемой ферменной системы определяются конкретными требованиями решаемой технической задачи. Несмотря на достигнутые значительные успехи в области проектирования таких конструкций, важной остается задача обеспечения плавного и надежного раскрытия крупногабаритных конструкций ферменного типа, состоящих из десятков, сотен и даже тысяч взаимосвязанных элементов.

Очевидно, что сложная в прикладном плане задача математического моделирования динамики раскрывающихся ферменных конструкций как системы многих тел не может быть решена с помощью одной универсальной модели. Препятствием для создания такой модели являются принципиальные затруднения, связанные с отсутствием необходимых полных 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 элементов конструкции, разбросом физико-механических характеристик применяемых материалов, несовершенством соединительных и шарнирных узлов и многими другими факторами.

На практике, как правило, динамическое поведение конструкции анализируют с помощью совокупности моделей, каждая из которых



a



б

Рис. 1. Ферменная конструкция в раскрытом рабочем состоянии (а) и транспортном положении (б)

нацелена на решение конкретного технического вопроса: либо направлена на определение динамических характеристик конструкции, либо исследует динамику раскрытия конструкции [2]. 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 их. Можно ожидать, что темпы усложнения проектируемых раскрывающихся ферменных конструкций и роста их размерности как динамических систем будут постоянно

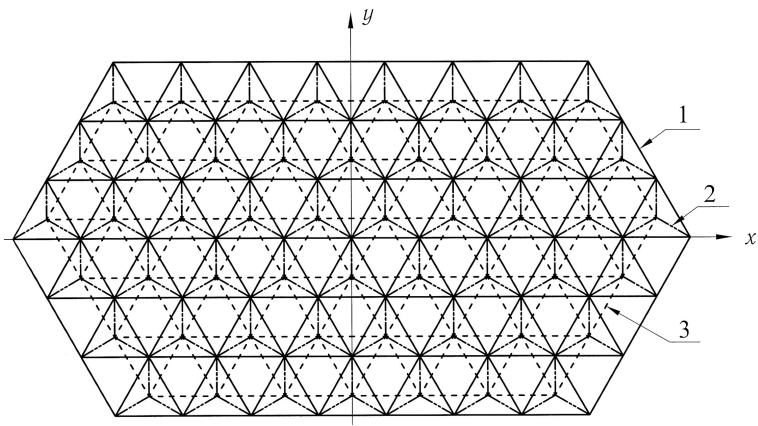


Рис. 2. Плоская раскрывающаяся ферменная конструкция: 1 и 3 – складывающиеся стержни верхнего и нижнего поясов; 2 — диагональные стержни

опережать развитие методов и технических средств математического моделирования подобных конструкций. Поэтому представляется целесообразным проводить анализ динамики раскрывающихся крупногабаритных ферменных конструкций в том объеме, который необходим для решения технических вопросов их проектирования, создания и экспериментальной отработки на основе совокупности частных моделей. Такой подход необходимо рассматривать в качестве основного метода анализа динамики конструкций данного класса.

Используя уравнение Лагранжа 2-го рода, получим дифференциальное уравнение, описывающее раскрытие плоской ферменной конструкции [3] (рис. 2),

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{f'(\varphi)}{2f(\varphi)} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + 2kN \frac{\varphi}{f(\varphi)} - k_1N \frac{1}{f(\varphi)} = 0,$$

где φ — угол поворота стержневых элементов верхнего и нижнего поясов ферменной конструкции; $f'(\varphi) = \frac{df(\varphi)}{d\varphi}$; k — жесткость пружин; $k_1 = k \left(\frac{\pi}{2} + \frac{M_n + M_k}{k} \right)$, M_n , M_k — начальное и конечное значения моментов, создаваемых пружинами; N — число складывающихся стержней верхнего и нижнего поясов конструкции. Углы поворота φ_d диагональных стержней l_d определяются углом φ (рис. 3). Выражение $f(\varphi)$ здесь не приводится из-за его громоздкости.

Уравнение позволяет получить следующее выражение для угловой скорости $\omega = d\varphi/dt$ в замкнутом виде:

$$\omega^2 = 2N \frac{k_1\varphi - k\varphi^2}{f(\varphi)}. \quad (1)$$

Зависимость (1) получена при условии, что в начальный момент времени t_0 $\varphi = 0$ и $\omega = 0$.

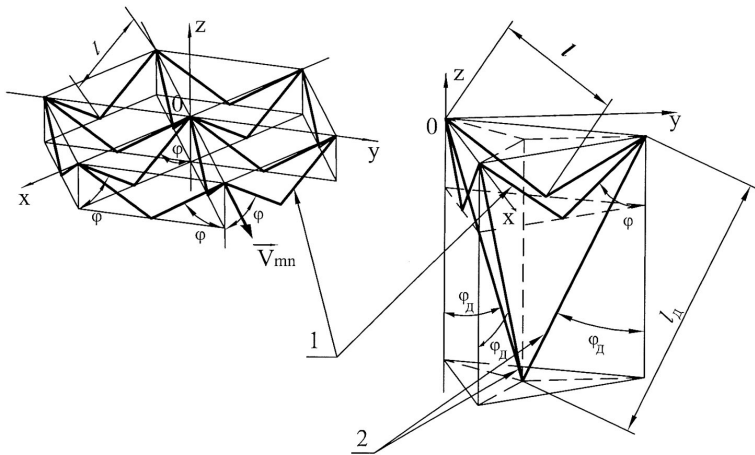


Рис. 3. Одностепенная модель ферменной конструкции:

1 – складывающиеся стержни верхнего пояса; 2 – диагональные стержни; l – длина трубчатого элемента складывающегося стержня; l_d – длина диагонального стержня; φ – угол поворота стержневых элементов верхнего и нижнего поясов конструкции; φ_d – угол поворота диагональных стержней

Интегрируя дифференциальное уравнение первого порядка (1), получаем

$$\int_0^{\varphi} \sqrt{\frac{f(\varphi)}{k_1\varphi - k\varphi^2}} d\varphi = \sqrt{2N} (t - t_0). \quad (2)$$

Из уравнения (2) определим время раскрытия рефлектора

$$t_k - t_0 = \frac{1}{\sqrt{2N}} \int_0^{\pi/2} \sqrt{\frac{f(\varphi)}{k_1\varphi - k\varphi^2}} d\varphi.$$

Одностепенная модель раскрытия ферменной конструкции позволяет определить перемещения и скорости всех ее узловых элементов. Используя данную модель, можно приближенно определить поле скоростей ферменной конструкции (см. рис. 1) в момент времени, соответствующий полному ее раскрытию. Конкретная конструкция рефлектора выбрана, главным образом, потому, что для нее имеются экспериментальные данные, позволяющие проверить применимость предлагаемого подхода и алгоритма расчета.

В момент полного раскрытия линейная скорость узловых шарниров и угловая скорость диагональных стержней равны нулю, а угловую скорость трубчатых элементов складывающихся стержней можно определить как

$$\omega_k^2 = \frac{\Pi_0}{NJ}, \quad (3)$$

где $\Pi_0 = \pi N(M_n + M_k)$; $N = N_v + N_n$, N_v , N_n – число складывающихся стержней верхнего и нижнего поясов; J – массовый момент

инерции трубчатого элемента складывающегося стержня относительно основания.

Соотношение (3) можно также получить из равенства потенциальной и кинетической энергий в момент полного раскрытия:

– потенциальная энергия пружин

$$\Pi_0 = 4N \frac{\pi}{4} (M_H + M_K) = \pi N (M_H + M_K),$$

где первый коэффициент равен числу пружин, связанных с одним складывающимся стержнем;

– кинетическая энергия складывающихся стержней

$$T = \frac{1}{2} \omega_k^2 J 2N,$$

где $2N$ – число трубчатых элементов складывающихся стержней.

Из равенства $\Pi_0 = T$ получаем выражение (3).

Раскрытому состоянию рефлектора соответствует кинематическая схема, изображенная на рис. 4. В этом положении линейные скорости узловых шарниров верхнего и нижнего поясов, а также угловые скорости вращения диагональных стержней равны нулю, а угловые скорости вращения складывающихся стержней ω_k определяются по зависимости (3). Кроме того, характерным для этого момента времени является то, что ускорения узловых шарниров отличны от нуля и направлены к центру рефлектора. Отличные от нуля указанные кинематические параметры вызывают движение узловых шарниров к центру рефлектора.

Задача определения прочности трубчатых стержневых элементов при раскрытии ферменных конструкций сводится к исследованию изменения во времени напряженно-деформированного состояния упругой конструкции с заданными начальными скоростями (см. рис. 4) и

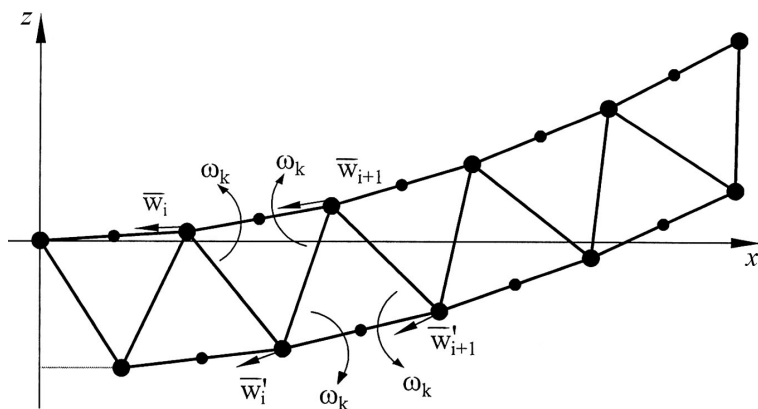


Рис. 4. Кинематическая схема конструкции:

ω_k – угловая скорость вращения складывающихся стержней; \bar{w}_i , \bar{w}'_i – абсолютные ускорения угловых шарниров верхнего и нижнего поясов конструкции соответственно

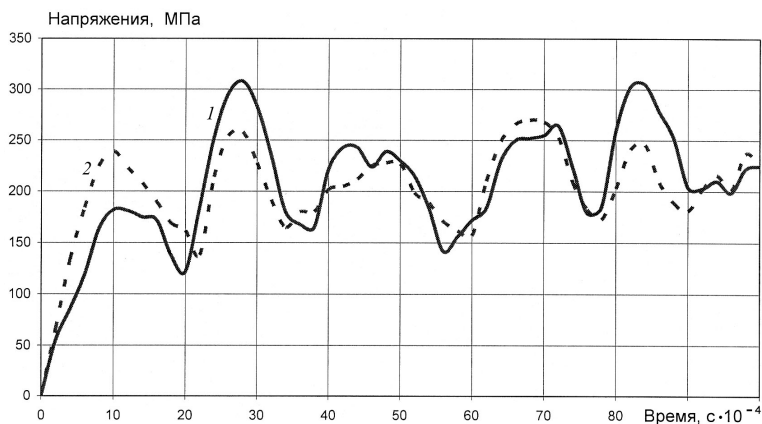


Рис. 5. Расчетные напряжения в элементах ферменной конструкции:

1 — максимальные; 2 — минимальные

перемещениями всех ее узловых элементов. Расчетная модель основана на методе конечных элементов. Начальные скорости для всех узлов конечно-элементной модели вычисляются с помощью одноступенчатой модели. Начальные перемещения принимаются равными нулю. Шаг интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка выбирается на основе результатов решения задачи об определении частот собственных колебаний ферменной конструкции. Он должен составлять долю наименьшего периода (наибольшей интересующей частоты собственных колебаний конструкции). На рис. 5 приведены зависимости максимальных и минимальных напряжений от времени для ферменной конструкции размером $5 \times 2,6$ м, трубчатые элементы которой выполнены из однонаправленного углепластика с продольным расположением волокон. Кроме того, наружная и внутренняя поверхности элементов образованы кольцевой укладкой стеклонити.

Под максимальными и минимальными напряжениями понимаются суммарные значения напряжения при изгибе и растяжении–сжатии трубчатых стержневых элементов конструкции. При этом максимальные напряжения определяются в точке сечения трубчатого элемента, принадлежащей наиболее растянутому при действии изгибающего момента волокну, а минимальные напряжения — в точке, соответствующей сжато-му волокну. На рис. 5 минимальные напряжения — абсолютные по величине. Из рис. 5 видно, что характер изменения максимальных и минимальных напряжений во времени практически один и тот же. Рассматриваемые напряжения соответствуют в основном трубчатым элементам, расположенным на периферии рефлектора антенны. Это объясняется тем, что ударный характер нагрузки определяется начальными скоростями, наибольшие значения которых достигаются именно на периферии конструкции.

Численный анализ напряженно-деформированного состояния трубчатых стержневых элементов ферменной конструкции был проведен с использованием программного комплекса MSC/NASTRAN. Расчеты показали, что возникающие максимальные напряжения в элементах ферменной конструкции в момент полного раскрытия не превышают разрушающих напряжений трубчатых углепластиковых стержней. Наибольшие напряжения в трубчатых стержневых элементах определяются первоначальной потенциальной энергией пружин, обеспечивающих раскрытие конструкций из транспортного плотноупакованного положения в рабочее. Снижение первоначальной потенциальной энергии пружин уменьшает угловые скорости трубчатых элементов складывающихся стержней в момент установки их на упоры, т.е. уменьшаются начальные скорости, определяющие ударный импульс, действующий на конструкцию при раскрытии.

Изложенный подход к расчету прочности элементов ферменных конструкций при их раскрытии может быть использован и при анализе напряженно-деформированного состояния ферменных конструкций при действии на них динамических нагрузок, обусловленных переориентацией и различными маневрами космических аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М е х а н и к а больших космических конструкций / Н.В. Баничук, Н.И. Карпов, Д.М. Климов и др. – М.: Факториал, 1997. – 302 с.
2. Д и н а м и к а пространственно развитых механических систем изменяемой конфигурации / А.П. Алпатов, П.А. Белоножко, В.В. Горбунцов и др. – Киев: Наукова думка, 1990. – 256 с.
3. З и м и н В. Н., М е ш к о в с к и й В. Е. К расчету раскрытия космической ферменной антенны из транспортного положения в рабочее // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы IV Междунар. симп. (16–20 февраля 1998 г., Ярополец). – М.: Графос. – С. 107–112.

Статья поступила в редакцию 8.04.2008

Владимир Николаевич Зимин родился в 1958 г., в 1980 г. окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, директор НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители”. Автор 72 научных работ в области раскрывающихся крупногабаритных космических конструкций.

V.N. Zimin (b. 1958) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1980. Ph. D. (Eng.), director of the Research Institute for Special Mechanical Engineering of the Bauman Moscow State Technical University, assoc. professor of “Spacecrafts and Launch Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 72 publications in the field of opening large-dimension space structures.

