



ЗИМИН

Владимир Николаевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ZIMIN

Vladimir Nikolaevich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



ФАЙЗУЛЛИН

Фарис Рафаэльевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

FAYZULLIN

Faris Rafael'evich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

О расчете раскрытия трансформируемой структурной космической конструкции

В.Н. Зимин, Ф.Р. Файзуллин

Проблема создания навесных систем специального функционального назначения с габаритами, превышающими размеры космических аппаратов, сводится к разработке трансформируемых конструкций. Несмотря на достигнутые значительные успехи в области проектирования таких конструкций, важной остается задача обеспечения плавного и надежного раскрытия крупногабаритных конструкций, прежде всего, структурного типа, состоящих из десятков, сотен и даже тысяч взаимосвязанных между собой элементов.

В программном комплексе автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем EULER построена модель для расчета процесса раскрытия крупногабаритной трансформируемой структурной космической конструкции. Работоспособность такой конструкции определяется, главным образом, тем, насколько велики возникающие в ней усилия при раскрытии из транспортного плотноупакованного состояния в рабочее положение на орбите.

Для построения модели используется хорошо учитывающая особенности структурных конструкций расчетная схема в виде системы абсолютно твердых тел, связанных между собой шарнирными узлами. Массы и моменты инерции твердых тел принимаются равными массам и моментам инерции реальных элементов структурной конструкции. Шарнирный узел в данной расчетной модели имеет более широкий смысл, чем понятие «шарнир». Он включает в себя цилиндрическое шарнирное соединение, допускающее относительное вращательное движение смежных тел, устройства раскрытия в виде пружин кручения и устройства фиксации смежных тел трансформируемой структурной конструкции в рабочем раскрытом положении. С помощью построенной модели проведен численный анализ динамики раскрытия параболической структурной конструкции. Конкретная трансформируемая структурная космическая конструкция выбрана, главным образом, потому, что для нее существуют реальные опытные образцы, а также получены экспериментальные результаты, позволившие проверить адекватность построенной расчетной модели.

Разработанная модель может быть использована при проектировании, создании и экспериментальной отработке трансформируемых крупногабаритных структурных космических конструкций.

Ключевые слова: расчет раскрытия, трансформируемая конструкция, расчетная схема, шарнирный узел, расчетные формы.

Analysis of the deployment of a transformable space structure

V.N. Zimin, F.R. Fayzullin

The problem of creating special suspended systems transported in spacecrafts of a much smaller size is reduced to the development of transformable structures. Despite significant advances in the design of such structures, smooth and reliable deployment of large structures consisting of dozens, hundreds, and even thousands of interconnected elements is still a challenge. The EULER software

package designed for the automated dynamic analysis of multi-component mechanical systems is used to construct a model for simulating the deployment of a large transformable space structure. The efficiency of this structure is mainly determined by the level of internal forces arising during its deployment from the transportation close-packed state to a normal operating state in the orbit. The constructed model is a system of perfectly rigid bodies connected by hinges. The masses and moments of inertia of the solid bodies are assumed to be equal to the corresponding characteristics of the existing elements of the structure. The term «hinge joint» in the design model has a broader meaning than the term «joint». It includes a cylindrical hinge enabling relative rotational movements of adjacent bodies, deployment elements in the form of torsion springs, and elements for fixing adjacent bodies of the transformable structure in its operation position. The model was used to simulate the deployment dynamics of a parabolic structure. A specific transformable space structure was chosen mainly because its prototypes do exist and experimental results are available, which makes it possible to verify the developed model. The proposed model can be used in the design, development and experimental study of transformable large space structures.

Keywords: deployment, transformable structure, mathematical model, hinge joint, design shapes.

Раскрывающиеся крупногабаритные структурные космические конструкции, изображенные на рис. 1 [1], представляют собой многоэлементные системы, состоящие из десятков тысяч взаимосвязанных между собой с помощью шарнирных соединений отдельных трубчатых элементов (рис. 2). Конструкции доставляются на космические орбиты в сложенном (транспортном) плотноупакованном состоянии, в рабочее положение они приводятся путем раскрытия. Процесс раскрытия таких конструкций чрезвычайно ответственен и определяется выполнением в заданной последовательности нескольких этапов:

- начальное страгивание элементов конструкции;
- перемещение и разворот элементов конструкции на соответствующие расстояния и углы до рабочего их положения (состояния);
- установка или фиксация в рабочем состоянии при определенной относительной ориентации смежных элементов конструкции.

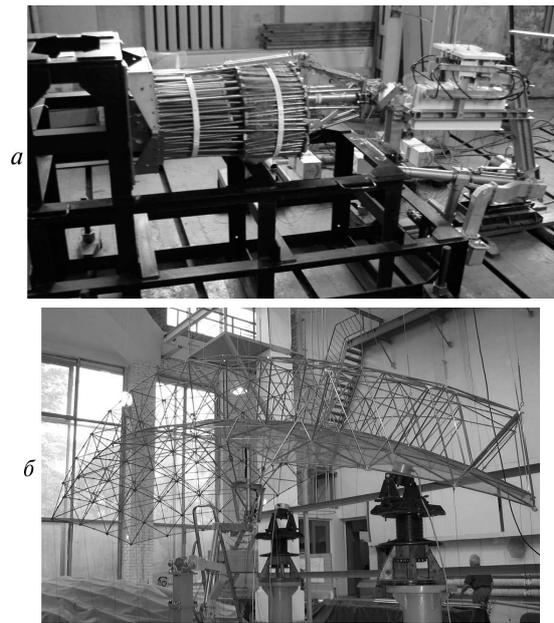


Рис. 1. Конструкция в транспортном положении (а) и в раскрытом рабочем состоянии (б)

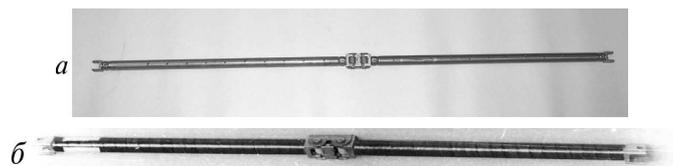


Рис. 2. Диагональный стержень:

а — из стали; б — из композиционного материала

Таким образом, рассматриваемые конструкции представляют собой систему многих тел (трубчатые элементы). Для полного описания динамики системы многих тел должно быть известно большое количество параметров, характеризующих геометрию, распределение масс, природу внешних сил и сил, действующих в местах соединений. Поэтому составить уравнения движения трансформируемой структурной конструкции с достаточно большим числом трубчатых элементов и получить численное их решение при заданных начальных условиях и заданных возмущениях, которые могут иметь место в процессе раскрытия, весьма сложно, поскольку:

1) необходимо составить систему дифференциальных уравнений достаточно большого порядка, описывающую непрерывное движение системы многих тел;

2) в процессе раскрытия при определенном относительном положении смежных трубчатых элементов конструкции на них накладываются

связи, ограничивающие их взаимное перемещение. Техническое исполнение налагаемых связей может быть самым разнообразным — различного рода упоры (фиксаторы). Установка трубчатых элементов конструкции на упоры (фиксаторы) может происходить как поэтапно в процессе раскрытия структурной конструкции, когда в некоторой последовательности происходит ограничение на относительное положение отдельных смежных элементов конструкции, так и одновременно (в один этап) всех элементов — в момент ее полного раскрытия. Таким образом, установка трубчатых элементов конструкции на упоры (фиксаторы) эквивалентна наложению импульсных связей в произвольный момент времени. При этом возникает явление удара, которое приводит к скачкообразному изменению скоростей элементов раскрываемой конструкции;

3) так как такие конструкции имеют структуру взаимосвязей с замкнутыми кинематическими цепями, проектирование и создание трансформируемых крупногабаритных структурных космических конструкций в значительной степени опирается на математический эксперимент, использующий разрабатываемые расчетные модели с идентифицированными параметрами.

Целью эксперимента является проверка заложенных в конструкцию проектных решений с точки зрения их соответствия заданию на разработку и обоснование функциональной пригодности проектируемого изделия. Сложная в прикладном плане задача расчета раскрытия трансформируемой структурной конструкции как системы многих тел, очевидно, не может быть решена с помощью одной универсальной модели [1—4]. Создание такой модели вызывает принципиальные трудности, поскольку отсутствуют все необходимые данные о геометрических и физических параметрах конструкции, необходимо выполнить огромные объемы вычислений, требуются большие затраты машинного времени. Неполнота информации обусловлена неточностями в изготовлении конструкции, разбросом физико-механических характеристик применяемых материалов, несовершенствами соединительных узлов и многими другими факторами. При этом на этапе проектирования крупногабаритных

трансформируемых конструкций анализируются различные варианты конструктивно-силовых схем и компоновок с целью выбора рациональной конструкции с точки зрения веса, технологии изготовления, а также с учетом плавности и надежности раскрытия. На ранних стадиях проектирования особую ценность представляют расчетные модели и программы, позволяющие с достаточной для практики степенью точности при малых вычислительных затратах выполнить конструктивные разработки различных вариантов, оценить их характеристики и выбрать наиболее рациональный вариант. Основным требованием к рабочей программе на этом этапе является минимальное время расчета одного варианта при достаточной для практики точности.

Для структур, отличных от плоской, составить функцию Лагранжа и ее производных не представляется возможным из-за громоздких аналитических выкладок. Следует отметить, что 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 2005 (Automatic Dynamics Analysis of Mechanical Systems) или программным комплексом автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем EULER [5]. Программный комплекс EULER предназначен для математического моделирования поведения многокомпонентных механических систем в трехмерном пространстве.

На первом этапе исследования анализировалось раскрытие центральной части плоской и параболической структурной конструкции. В качестве модели установки элементов конструкции на упоры или фиксаторы использовалась модель, включающая упругие и демпфирующие элементы.

Целью исследований являлось определение кинематических параметров и времени раскрытия в зависимости от изменения коэффициента жесткости пружин. При этом коэффициент жесткости пружин k последовательно

принимался равным следующим значениям: 0,1; 0,3; 0,6 и 0,9 Н·(м/рад).

При увеличении коэффициента жесткости пружин существенно увеличиваются максимальные скорости в узлах конструкции и, соответственно, уменьшается время раскрытия. Однако при этом возрастают ударные нагрузки на элементы конструкции.

На следующем этапе исследовалось раскрытие осесимметричной структурной плоской конструкции (рис. 3). На рисунке 3, в хорошо видно различие в скоростях аналогичных элементов конструкции верхнего пояса (узлы 6 и 5). Значения максимальных скоростей для узлов 6 и 5 соответственно равны 4 и 9,2 м/с.

Заключительный процесс раскрытия центральной части структурной конструкции характеризуется резкой остановкой складывающихся стержней и возникновением колебаний около состояния равновесия, которое определяется относительным углом между трубчатыми элементами складывающихся стержней, соответствующим моменту установки элементов конструкции на упоры или фиксаторы.

Амплитуда колебаний зависит от коэффициента жесткости упругого элемента после установки элементов конструкции на упоры или фиксаторы. При учете демпфирования в шарнирных соединениях конструкции процесс раскрытия заканчивается затухающимися колебаниями относительно состояния равновесия. При большом коэффициенте вязкого трения демпфирующего элемента процесс раскрытия конструкции заканчивается аperiодическим режимом движения трубчатых элементов складывающихся стержней.

Преимуществом модели установки элементов конструкции на упоры или фиксаторы в виде упругого и демпфирующего элементов является значительная простота, физическая наглядность и близость результатов расчета к экспериментальным данным для реальных конструкций. Недостаток данной модели — большая трудоемкость экспериментов при подборе коэффициентов жесткости и вязкого трения упругого и демпфирующего элементов для трансформируемых конструкций. Кроме того, в системе обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих процесс раскрытия ферменной конструкции, при некоторых коэффициентах модели установки элементов конструкции

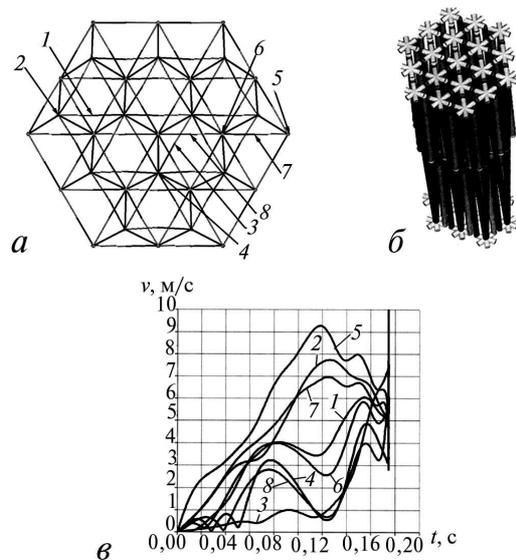


Рис. 3. Модель структурной конструкции:

a — раскрытое состояние; *б* — сложенное состояние; *в* — скорости узлов ферменной конструкции; 1—8 — узлы конструкции

на упоры и фиксаторы может происходить резкое возрастание «жесткости», обусловленное резко изменяющимися производными на конечном этапе процесса раскрытия. Численное интегрирование таких дифференциальных уравнений требует достаточно малого шага по времени и высокой точности представления чисел на ЭВМ для устойчивого процесса решения, а также специальных приемов численного интегрирования.

Трансформируемая структурная космическая конструкция выбрана, главным образом, потому, что для нее существуют реальные опытные образцы, разрабатываемые в ОАО «ОКБ МЭИ» [1], а также получены экспериментальные результаты, позволяющие проверить применимость методики расчета.

Для расчета раскрытия структурной конструкции из плотноупакованного положения необходимо привести ее из рабочего состояния в начальное транспортное. Для этого используется искусственный прием — в шарнирных узлах задаются «отрицательные» моменты (противоположные реально действующим в пружинах кручения) [3]. Под их действием структурная конструкция складывается и принимает начальное (транспортное) состояние. Данное состояние и является исходным (начальным) для расчета раскрытия конструкции.

Расчетные формы, принимаемые конструкцией в различные моменты времени при раскрытии,

изображены на рис. 4. Они качественно совпадают с экспериментально полученными формами.

В результате проведенных исследований установлено, что для конструкций ферменного типа, отличных от плоских, начальные значения обобщенных координат для сложенного транспортного состояния необходимо определять исходя из предположения, что центры узловых шарнирных элементов должны располагаться на поверхности (параболической, сферической, цилиндрической и т. д.), соответствующей раскрытому рабочему положению конструкции.

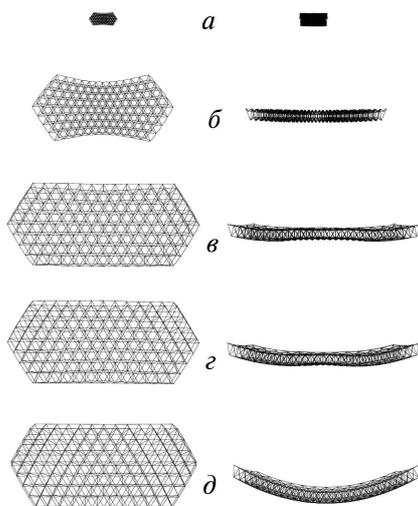


Рис. 4. Расчетные формы, принимаемые конструкцией при раскрытии в различные моменты времени:

$a - t = 0,5$ с; $б - t = 1,5$ с; $в - t = 1,9$ с; $г - t = 2,2$ с;
 $д - t = 4,0$ с

Литература

[1] Гутовский И.Е., Золин А.В., Курков С.В., Пантелеев В.А., Хребников В.А. Моделирование динамики раскрытия ферменного каркаса трансформируемого рефлектора антенны космического базирования методом конечных элементов. *Современное машиностроение. Наука и образование*, 2012, № 2, с. 276—285.

[2] Боярко В.Г., Малков В.П., Фатьянов Ю.А. Анализ процесса раскрытия стержневой конструкции. *Прикладные проблемы прочно-*

сти и пластичности: Всес. межвуз. сб. Горький, изд-во Горьковского ун-та, 1988, с. 10—20.

[3] Шесняк С., Романов А., Хитров И., Девятков С., Сергиевский С., Георгиев А. Проектирование и расчет крупногабаритных раскрывающихся конструкций с помощью программных комплексов MSC.Software. *CADmaster*, 2009, № 2-3, с. 28—36.

[4] Зимин В.Н., Бойков В.Г., Файзуллин Ф.Р. Расчет раскрытия крупногабаритной космической конструкции ферменного типа. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. вып. Крупногабаритные трансформируемые космические конструкции и материалы для перспективных ракетно-космических систем*, 2012, с. 5—15.

[5] Бойков В.Г. Программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем EULER. *САПР и графика*, 2000, № 9, с. 17—20.

References

[1] Gutovskii I.E., Zolin A.V., Kurkov S.V., Panteleev V.A., Khrebnikov V.A. Modelirovanie dinamiki raskrytiia fermennogo karkasa transformiruемого рефлектора антенны kosmicheskogo bazirovaniia metodom konechnykh elementov [Modeling the dynamics of disclosure truss frame transformed reflector antenna space-based finite element method]. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie* [Modern engineering. Science and Education]. 2012, no. 2, pp. 276—285.

[2] Boiarko V.G., Malkov V.P., Fat'ianov Iu.A. *Analiz protsessa raskrytiia stержnevoi konstruktсии* [Analysis of the process of disclosure rod construction]. *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti: Vsesoiuznyi mezhvuzovskii sbornik* [Applied Problems of Strength and Plasticity: Union interuniversitny]. Gor'kii, Gor'kovskii universitet publ., 1988. pp. 10—20.

[3] Shchesniak S., Romanov A., Khitrov I., Deviatov S., Sergievskii S., Georgiev A. Proektirovanie i raschet krupnogabaritnykh raskryvaiushchikhsia konstruktсии s pomoshch'iu programnykh kompleksov MSC.Software [Engineering and design of large-scale pull-down structures with software systems MSC.Software]. *CADmaster*, 2009, no. 2-3, pp. 28—36.

[4] Zimin V.N., Boikov V.G., Faizullin F.R. Raschet raskrytiia krupnogabaritnoi kosmicheskoi konstruktсии fermennogo tipa [The calculation of the disclosure of large space truss-type structure]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie. Spetsial'nyi vypusk Krupnogabaritnye transformiruemye kosmicheskie konstruktсии i materialy dlia perspektivnykh raketno-kosmicheskikh sistem* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering. Special issue on Large transformable space structures and materials for advanced rocket and space systems]. 2012, pp. 5—15.

[5] Boikov V.G. Programmnyi kompleks avtomatizirovannogo dinamicheskogo analiza mnogokomponentnykh mekhanicheskikh sistem EULER [Software for automated dynamic analysis of multi-component mechanical systems EULER]. *SAPR i grafika* [CAD and Graphics]. 2000, no. 9, pp. 17—20.

Статья поступила в редакцию 28.08.2013

Информация об авторах

ЗИМИН Владимир Николаевич (Москва) — первый проректор — проректор по научной работе. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sm11@sm.bmstu.ru).

ФАЙЗУЛЛИН Фарис Рафаэльевич (Москва) — аспирант кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Information about the authors

ZIMIN Vladimir Nikolaevich (Moscow) — First Vice-Rector for Research. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: sm11@sm.bmstu.ru).

FAYZULLIN Faris Rafael'evich (Moscow) — Post-Graduate of «Spacecrafts and Launch Vehicles» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).