

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСКРЫТИЯ
ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ ФЕРМЕННОГО ТИПА****В.Н. Зимин¹, В.Г. Бойков², Ф.Р. Файзуллин²**¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

e-mail: sm11@sm.bmstu.ru

²ЗАО “АвтоМеханика”, Москва, Россия

e-mail: boykov@automechanica.msk.ru; jake-take@yandex.ru

Проблема создания навесных систем специального функционального назначения с габаритами, превышающими размеры космических аппаратов, сводится к разработке складных конструкций. 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 и даже тысяч связанных между собой элементов, при гарантированном обеспечении их последующего функционирования. В программном комплексе EULER построены модели и выполнен численный анализ динамики раскрытия плоской и параболической конструкций ферменного типа. Проведенные исследования и расчеты показали, что для конструкций ферменного типа, отличных от плоских, начальные значения обобщенных координат для сложного 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.

Ключевые слова: крупногабаритные трансформируемые конструкции, расчетная схема, математическая модель.

**PECULIARITIES OF SIMULATION OF UNFOLDING
A TRANSFORMABLE FRAME-TYPE STRUCTURE****V.N. Zimin¹, V.G. Boikov², F.R. Faizullin²**¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: sm11@sm.bmstu.ru

²ZAO “AvtoMekhanika”, Moscow, Russia

e-mail: boykov@automechanica.msk.ru; jake-take@yandex.ru

The problem of creating the special-purpose mounted systems with overall dimensions exceeding the spacecraft size is reduced to development of folding structures. These structures are mostly frames and they are composed of hundreds and even thousands of interconnected elements. Although great success is achieved in development of such structures, the problem of their smooth and reliable deployment for ensuring their further operation is actual so far. To solve the problem, on the basis of the EULER software package, some models are developed and dynamics of deployment of flat and parabolic frames is numerically analyzed. The performed calculations show that to determine initial values of generalized coordinates for a non-flat frame structure being in the folded transport state, it is necessary to assume that centers of the nodal hinge elements are on the parabolic (spherical, cylindrical, etc.) surface corresponding to the deployed working state of the structure.

Keywords: large-sized transformable structures, calculation scheme, mathematical model.

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

В настоящее время в литературе широко представлены исследования, посвященные моделированию динамики раскрытия солнечных батарей космических аппаратов различных кинематических схем. Однако они, как правило, не относятся к конструкциям ферменного типа. На основании изложенного можно констатировать, что при очевидных запросах практики в выполненных ранее исследованиях почти нет сведений 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.

Рассматриваемые конструкции образованы двумя поясами, соединенными между собой диагональными стержнями. Пояса выполнены из складывающихся стержней. Один из поясов связан со штангой, которая закреплена на космическом аппарате (КА). Пояс, связанный со штангой, будем называть верхним поясом, а другой пояс — нижним. Узловые шарнирные соединения верхнего пояса располагаются на образующей поверхности, которая может быть плоской или осесимметричной. Сам же верхний пояс может не иметь какую-либо симметрию [1]. Базовая ячейка верхнего и нижнего поясов — треугольник, образованный тремя складывающимися стержнями, а базовая ячейка рассматриваемых ферменных конструкций — тетраэдр, образованный тремя диагональными и тремя складывающимися стержнями. На базе конструкции элементарной ячейки в форме тетраэдра можно построить ферменные модули разнообразных пространственных форм (сферические, цилиндрические, параболические и другие поверхности) с различными очертаниями внешнего контура. Габаритные размеры создаваемой ферменной конструкции определяются конкретными требованиями решаемой технической задачи.

Складывающиеся стержни выполнены из двух равных трубчатых элементов, соединенных шарниром с пружинами. При складывании ферменной конструкции трубчатые элементы складывающихся стержней верхнего и нижнего поясов поворачиваются в шарнирах узловых соединений и шарнирах, соединяющих их, убираются внутрь конструкции и располагаются между диагональными стержнями (рис. 1). Диагональные стержни поворачиваются в своих шарнирах узловых соединений и сближаются, занимая при укладке параллельное положение. Радиоотражающая поверхность, закрепленная на складывающихся стержнях, при складывании убирается внутрь каркаса. Габаритные размеры укладки по высоте определяются длиной диагональных

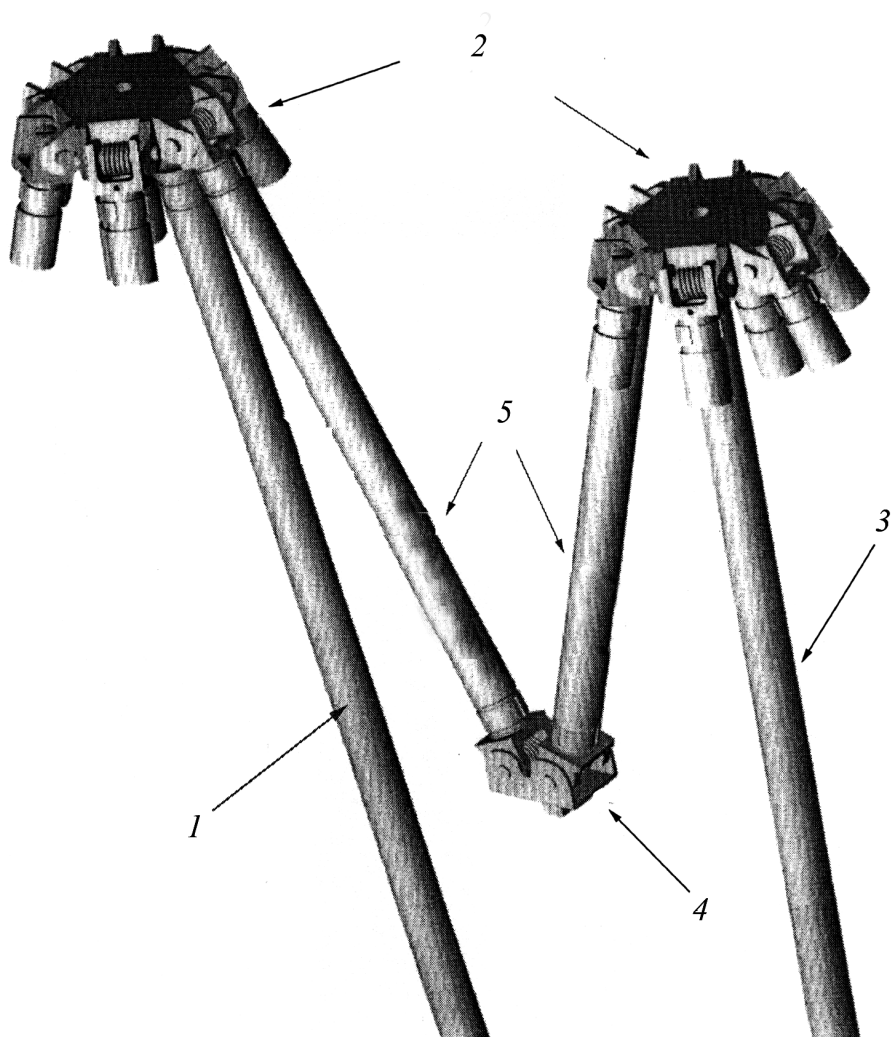


Рис. 1. Фрагмент ферменной конструкции при складывании:

1, 3 — части диагонального стержня; *2* — узловые шарниры; *4* — шарнир, соединяющий трубчатые элементы складывающегося стержня; *5* — складывающийся стержень.

стержней. Поперечный размер укладки ферменной конструкции определяется из условий наиболее тесного расположения узловых шарнирных соединений.

Проектирование и создание раскрывающихся крупногабаритных космических конструкций в значительной степени опираются 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 с прикладной точки зрения задача математического моделирования динамики раскрывающихся ферменных конструкций как системы мно-

гих тел, очевидно, не может быть решена с помощью одной, универсальной модели. Создание такой модели вызывает принципиальные затруднения, связанные с отсутствием полной совокупности необходимых 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.

Раскрывающиеся крупногабаритные космические конструкции ферменного типа доставляются на космические орбиты в сложенном (транспортном) плотно упакованном состоянии, и приведение их в рабочее положение связано с реализацией процесса раскрытия. Конструкции ферменного типа раскрываются автоматически при срабатывании механизма расчеховки за счет первоначально накопленной упругой энергии деформации пружин, расположенных в шарнирных соединениях. Раскрытие происходит относительно некоторой точки (оси) пространства, выбор которой определяется конкретным креплением конструкции к КА. Раскрытие таких конструкций представляется чрезвычайно ответственным и определяется выполнением в заданной последовательности следующих стадий: начальное страгивание элементов конструкции, перемещение и разворот элементов конструкции на соответствующие расстояния и углы до достижения их рабочего положения, установка или фиксация в рабочем положении при определенной относительной ориентации смежных элементов конструкции. Таким образом, при рассмотрении таких конструкций мы имеем дело с системой многих тел (трубчатых элементов). Для полного описания динамики системы многих тел требуется значительное число параметров, которые характеризуют геометрию, распределение масс, природу внешних сил и сил, действующих в местах соединений. Поэтому составить уравнения движения раскрывающейся конструкции с достаточно большим числом трубчатых элементов и дать их численное решение при заданных начальных условиях и возмущениях, которые могут иметь место в процессе раскрытия, весьма сложно. Во-первых, это связано с необходимостью получения системы дифференциальных уравнений достаточно большого порядка, описывающей непрерывное движение системы многих тел. Во-вторых, в процессе раскрытия при определенном относительном положении сложных 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 может происходить как поэтапно в процессе раскрытия

ферменной конструкции, когда в некоторой последовательности накладываются ограничения 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 эквивалентна наложению импульсных связей в произвольный момент времени. При наложении таких связей возникает явление удара, которое приводит к скачкообразному изменению скоростей элементов раскрываемой конструкции. В-третьих, конструкции ферменного типа имеют структуру взаимосвязей с замкнутыми кинематическими цепями.

Для структур, отличных от плоских, составить функцию Лагранжа и ее производные 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. Программный комплекс EULER предназначен для математического моделирования поведения многокомпонентных механических систем в трехмерном пространстве.

Наиболее простой, но в то же время достаточно хорошо учитывающей особенности конструкций ферменного типа расчетной схемой является система абсолютно твердых тел, связанных между собой шарнирными узлами. Массы, геометрические размеры и моменты инерции твердых тел принимаются равными массам, геометрическим размерам и моментам инерции реальных стержневых элементов конструкции. Под шарнирным узлом здесь понимаются не только шарнирное соединение, допускающее относительное вращение смежных элементов конструкции, и пружины кручения, накапливающие в процессе складывания конструкции в транспортное плотно упакованное состояние необходимую для последующего раскрытия энергию, но и упоры (фиксаторы), определяющие их взаимное положение в развернутом рабочем состоянии.

В данном программном комплексе построены модели и выполнен численный анализ динамики раскрытия плоской и параболической конструкций ферменного типа. На рис. 2 приведена плоская модель конструкции ферменного типа, где цифрами 1–8 на рис. 2, а обозначены узлы конструкции; на рис. 2, в — соответствующие этим узлам скорости.

При построении модели было принято, что связанная система координат $OXYZ$ расположена в центре шарниров и ориентирована таким образом, чтобы раскрытие происходило вокруг оси OX , перпендикулярной складываемому стержню. Ось OZ направлена вдоль

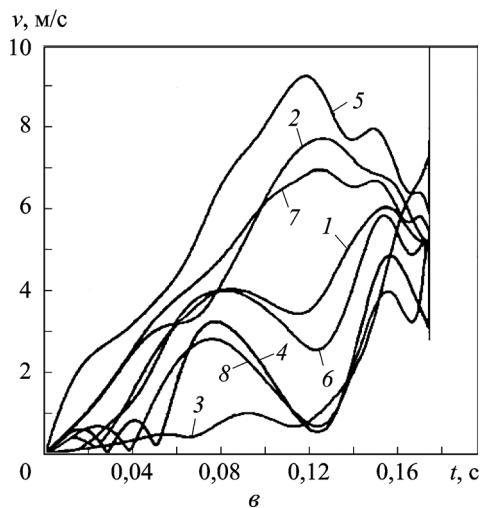
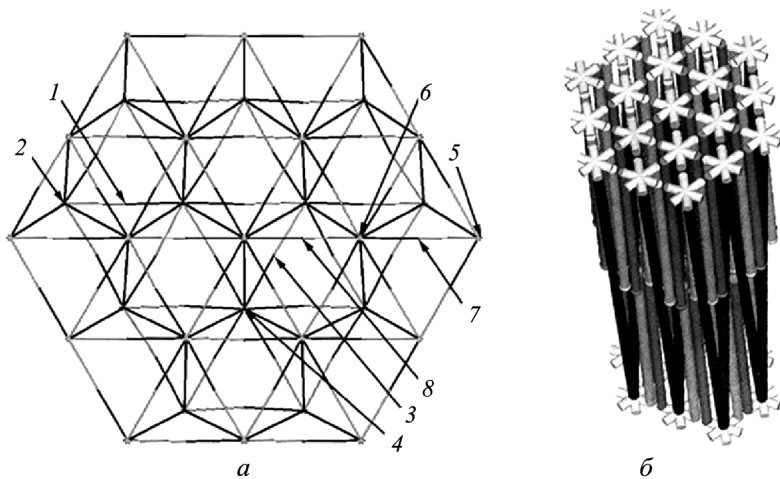


Рис. 2. Модель ферменной конструкции:

a – раскрытое состояние; *б* – сложенное состояние; *в* – скорости узлов ферменной конструкции

стержня, а ось OY дополняет систему до правой системы координат и направлена перпендикулярно стержню. Угол γ_c определяет начальное положение трубчатого элемента складывающегося стержня относительно центральной штанги антенны, которая крепится к КА; угол γ_E определяет поворот узлового шарнира, обусловленный кривизной рабочей параболической поверхности антенны. При построении расчетной модели раскрытия конструкции антенны угол γ_E задан средним по всей поверхности. Точкой K обозначена ось вращения трубчатого элемента складывающегося стержня относительно узлового шарнира, а точкой B – центр шарнира складывающегося стержня. Значение теоретического угла раскрытия трубчатого элемента складывающегося стержня в узловом шарнире обозначено как φ_k , а значение теоретического угла раскрытия шарнира складывающегося стержня – как

φ_c . Пружины кручения, расположенные в шарнире складывающегося стержня и узлов шарнире и обеспечивающие раскрытие конструкции ферменного типа, моделируются упругими элементами. Силовая характеристика каждого упругого элемента (зависимость момента от угла раскрытия) в общем случае определяется следующим соотношением:

$$M_i(\varphi_i) = c_i (\varphi_{\text{закр}_i} - \varphi_i),$$

где c_i — коэффициент жесткости i -го упругого элемента; φ_i — текущий угол раскрытия; $\varphi_{\text{закр}_i}$ — предварительный угол закрутки упругого элемента. Когда угол раскрытия трубчатого элемента складывающегося стержня достигает определенного значения $\varphi_{\text{упор}_i}$, соответствующего его рабочему положению, происходит постановка трубчатых элементов на упоры. Постановка на упор моделируется упругим и диссипативным элементами [2] и описывается в общем случае следующей зависимостью момента от угла раскрытия и угловой скорости:

$$M_{\text{упор}_i}(\varphi_i, \omega_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } \varphi_i < \varphi_{\text{упор}_i}, \\ -c_{\text{упор}_i}(\varphi_i - \varphi_{\text{упор}_i}) - \mu_i \omega_i, & \text{если } \varphi_i \geq \varphi_{\text{упор}_i}, \end{cases}$$

где $c_{\text{упор}_i}$ — коэффициент жесткости упругого элемента; φ_i — текущий угол раскрытия; $\varphi_{\text{упор}_i}$ — значение угла раскрытия, при котором происходит постановка на упор; μ_i — коэффициент вязкого демпфирования i -го диссипативного элемента; ω_i — относительная угловая скорость трубчатых элементов складывающегося стержня.

В нашем случае результирующий момент в узловом шарнире можно представить как

$$M_k = \begin{cases} M_{\text{упор}_k} + c_k (\pi + \gamma_E - \gamma_c) - c_k \varphi_x, & \text{если } \varphi_x < \varphi_{\text{упор}_k}, \\ -c_{\text{упор}_k}(\varphi_x - \varphi_{\text{упор}_k}) - \mu_k \omega_k + M_{\text{упор}_k} + \\ + c_k (\pi + \gamma_E - \gamma_c) - c_k \varphi_x, & \text{если } \varphi_x \geq \varphi_{\text{упор}_k}, \end{cases}$$

где $M_{\text{упор}_k}$ — момент кручения пружины при раскрытии трубчатого элемента в узловом шарнире; c_k — коэффициент жесткости пружины узлового шарнира; φ_x — текущий угол раскрытия; $c_{\text{упор}_k}$ — коэффициент жесткости упругого элемента, моделирующего упор в узловом шарнире; $\varphi_{\text{упор}_k}$ — значение угла раскрытия, при котором происходит постановка на упор; μ_k — коэффициент вязкого демпфирования диссипативного элемента, моделирующего упор; ω_k — угловая скорость трубчатого элемента относительно узлового шарнира.

Результирующий момент в шарнире складывающегося стержня можно записать в следующем виде:

$$M_B = \begin{cases} M_{\text{упор}_c} + c_B (2\pi - 2\gamma_c) - c_B \varphi_x, & \text{если } \varphi_x < \varphi_{\text{упор}_B}, \\ -c_{\text{упор}_B}(\varphi_x - \varphi_{\text{упор}_B}) - \mu_B \omega_B + M_{\text{упор}_c} + \\ + c_B (\pi + \gamma_E - \gamma_c) - c_B \varphi_x, & \text{если } \varphi_x \geq \varphi_{\text{упор}_B}, \end{cases}$$

где $M_{\text{упор}_c}$ — момент пружины кручения при раскрытии шарнира складывающегося стержня; c_B — коэффициент жесткости пружины шарни-

ра складывающегося стержня; $c_{\text{упор}_B}$ — коэффициент жесткости упругого элемента, моделирующего упор в данном шарнире; $\varphi_{\text{упор}_B}$ — значение угла раскрытия, при котором происходит постановка на упор; μ_B — коэффициент вязкости демпфирования диссипативного элемента, моделирующего упор; ω_c — угловая скорость трубчатого элемента относительно шарнира складывающегося стержня.

Раскрытие конструкции ферменного типа происходит в пространстве, поэтому для принятия ею конечной рабочей формы в шарнирах предусмотрены люфты (зазоры). При выборке люфта во время поворота вокруг оси OY возможен изгиб стержня, а при выборке люфта во время поворота вокруг оси OZ возможно кручение трубчатого элемента складывающегося стержня. При повороте на угол, меньший, чем угол свободного хода (обусловленный зазором), в расчетной модели в узловом шарнире учитывается только момент, обусловленный действием диссипативного элемента, моделирующего упор. Когда зазор (люфт) выбран, в выражении для момента дополнительно учитывается действие упругого элемента:

$$M_{k_y} = \begin{cases} \mu_k \omega_{k_y}, & \text{если } |\varphi_y| < g_k, \\ \mu_k \omega_{k_y} + c_{\text{упор}_k} (\varphi_y - g_k \text{sign} \varphi_y), & \text{если } |\varphi_y| \geq g_k, \end{cases} \quad (1)$$

где φ_y — текущий угол поворота вокруг оси OY ; g_k — значение угла свободного хода; ω_{k_y} — скорость изменения текущего угла.

При повороте вокруг оси OZ в расчетной модели в узловом шарнире выражение для момента можно представить так

$$M_{k_z} = \begin{cases} \mu_z \omega_{k_z}, & \text{если } |\varphi_z| < g_k, \\ \mu_z \omega_{k_z} + c_{\text{упор}_z} (\varphi_z - g_k \text{sign} \varphi_z), & \text{если } |\varphi_z| \geq g_k, \end{cases} \quad (2)$$

где φ_z — текущий угол, соответствующий кручению стержня; μ_z — коэффициент вязкости диссипативного элемента, моделирующий упор; ω_{k_z} — скорость изменения текущего угла; $c_{\text{упор}_z}$ — коэффициент жесткости упругого элемента, моделирующего упор.

Диагональные стержни конструкции ферменного типа не имеют пружин в узловых шарнирах, и их положение определяется степенью раскрытия складывающихся стержней верхнего и нижнего поясов рассматриваемых конструкций. Постановка на упоры в узловых шарнирах диагональных стержней моделируется только упругим элементом без демпфирующего элемента, и соотношения (1) и (2) принимают следующий вид:

$$M_{k_y} = \begin{cases} 0, & \text{если } |\varphi_y| < g_k, \\ c_{\text{упор}_k} (\varphi_y - g_k \text{sign} \varphi_y), & \text{если } |\varphi_y| \geq g_k, \end{cases}$$

$$M_{k_z} = \begin{cases} 0, & \text{если } |\varphi_z| < g_k, \\ c_{\text{упор}_z} (\varphi_z - g_k \text{sign} \varphi_z), & \text{если } |\varphi_z| \geq g_k. \end{cases}$$

На рис. 3 приведена кинограмма раскрытия ферменной конструкции, а на рис. 4 — расчетные формы, принимаемые конструкцией в различные моменты времени при раскрытии.

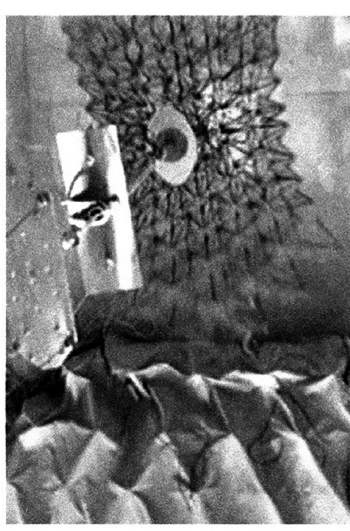
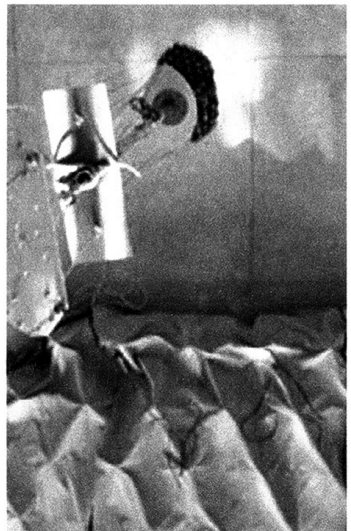
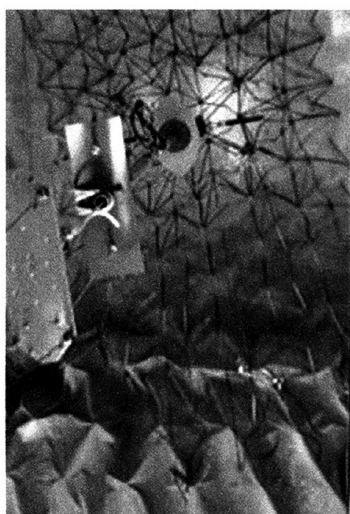
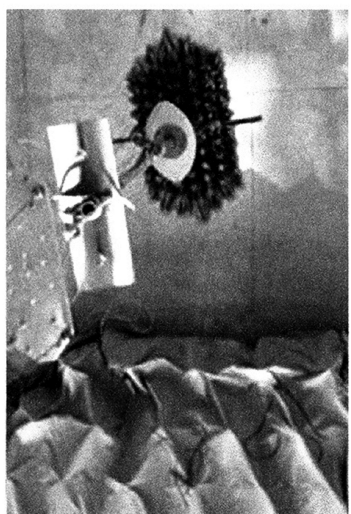
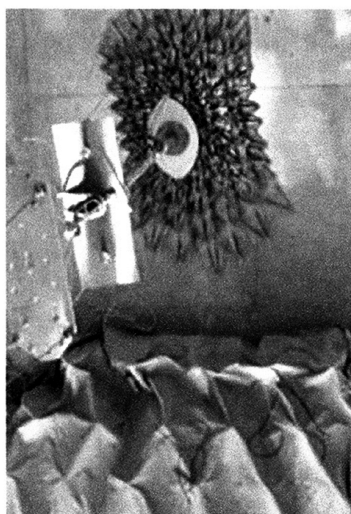


Рис. 3. Кинограмма раскрытия ферменной конструкции

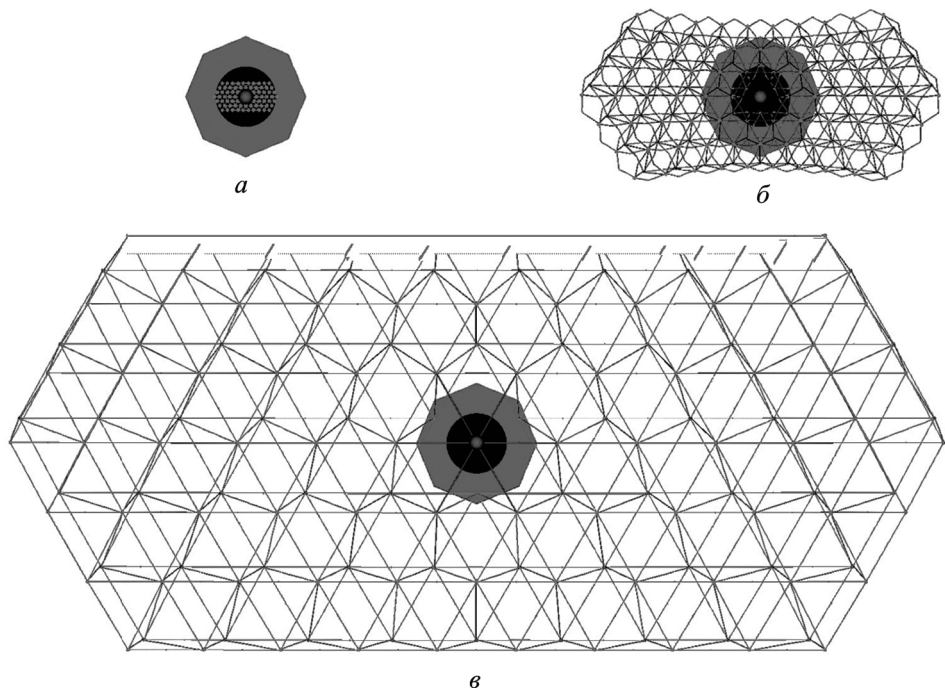


Рис. 4. Расчетные формы, принимаемые конструкцией при раскрытии в различные моменты времени:

$a - t = 0$ с; $b - t = 0,8$ с; $c - t = 1,8$ с

Проведенные исследования и расчеты показали, 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.

Исследования проведены в рамках поисковой научно-исследовательской работы (ГК № П776 от 20 мая 2010 г.) при реализации ФЦП “Научные и научно-исследовательские кадры инновационной России” на 2010–2013 гг.”

ЛИТЕРАТУРА

1. Зимин В.Н. Экспериментальное определение динамических характеристик крупногабаритных трансформируемых космических конструкций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 1 (82). С. 47–56.
2. З и м и н В. Н. К вопросу моделирования и расчета динамики раскрытия трансформируемых космических конструкций // Оборонная техника. 2006. № 1, 2. С. 123–127.
3. Бойков В.Г. Моделирование динамики механических систем в программном комплексе EULER // САПР и графика. 1998. № 1. С. 38–48.
4. Бойков В.Г. Программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем EULER // САПР и графика. 2000. № 9. С. 17–20.

REFERENCES

1. *Zimin V.N.* Experimental study of the dynamic characteristics of transformable large space structures. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2011, no. 1 (82), pp. 47–56 (in Russ.).
2. *Zimin V.N.* Modeling and analysis of the dynamics of transformable space structure deployment. *Oboronnaya Tekh.* [Def. Technol.], 2006, no. 1, 2, pp. 123–127 (in Russ.).
3. *Boikov V.G.* Dynamic analysis of mechanical systems using the EULER software package. *SAPR i Grafika* [CAD and Graphics], 1998, no. 1, pp. 38–48 (in Russ.).
4. *Boikov V.G.* Using the EULER software for automated dynamic analysis of multi-component mechanical systems. *SAPR i Grafika* [CAD and Graphics], 2000, no. 9, pp. 17–20 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 15.05.2012

Владимир Николаевич Зимин — д-р техн. наук, первый проректор — проректор по научной работе, профессор кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 92 научных работ в области раскрывающихся крупногабаритных космических конструкций.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.N. Zimin — Dr. Sci. (Eng.), first pro-rector on science of the Bauman Moscow State Technical University, professor of “Spacecrafts and Launch Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 92 publications in the field of unfolding large-size space structures.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia.

Владимир Георгиевич Бойков — канд. техн. наук, генеральный директор ЗАО “АвтоМеханика”. Автор 18 научных работ в области компьютерного моделирования динамики систем твердых и упругих тел.

ЗАО “АвтоМеханика”, Россия, 125459, Москва, Новопоселковская ул., д. 6.

V.G. Boikov — Cand. Sci. (Eng.), general director of ZAO “AvtoMekhanika”. Author of 18 publications in the field of computer simulation of dynamics of solids and elastic bodies.

ZAO “AvtoMekhanika”, Novoposelkovaya ul., 6, 125459 Russia, Moscow.

Фарис Рафаэльевич Файзуллин — инженер ЗАО “АвтоМеханика”, аспирант кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ЗАО “АвтоМеханика”, Россия, 125459, Москва, Новопоселковская ул., д. 6.

F.R. Faizullin — Engineer of ZAO “AvtoMekhanika”, post-graduate of “Spacecrafts and Launch Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University.

ZAO “AvtoMekhanika”, Novoposelkovaya ul., 6, 125459 Russia, Moscow.