

В. Н. З и м и н, В. Г. Б о й к о в,  
Ф. Р. Ф а й з у л л и н

## РАСЧЕТ РАСКРЫТИЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ ФЕРМЕННОГО ТИПА

*Рассмотрены особенности построения математической модели крупногабаритных космических конструкций ферменного типа. Показана целесообразность использования возможностей современных программных комплексов моделирования динамики механических систем для конструкций данного типа. Приведены примеры расчета раскрытия подобных конструкций.*

**E-mail:** sm11@sm.bmstu.ru

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

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.

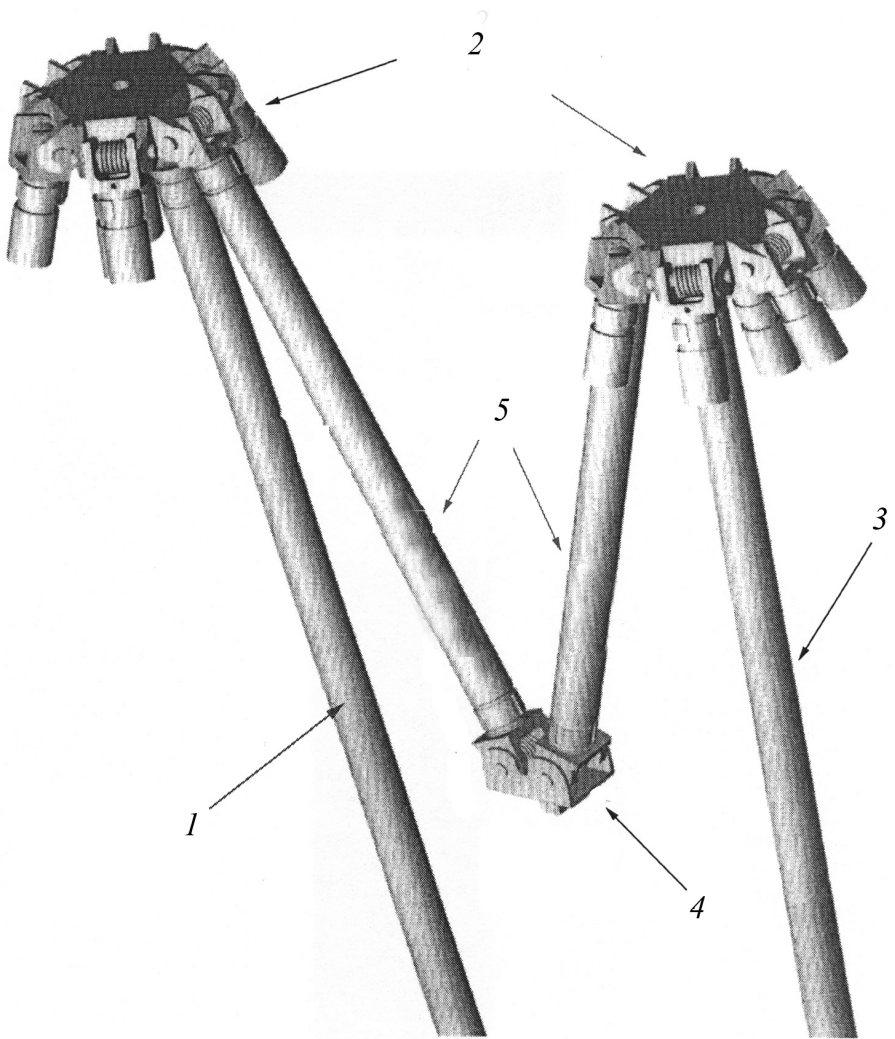
Рассматриваемые конструкции образованы двумя поясами, соединенными между собой диагональными стержнями. Пояса выполнены из складывающихся стержней. Один из поясов связан со штангой, которая закреплена на космическом аппарате (КА). Пояс, связанный со штангой, будем называть верхним поясом, а другой пояс — 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 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 многих 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) плотноупакованном состоянии, и приведение их



**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

в рабочее положение связано с реализацией процесса раскрытия. Конструкции ферменного типа раскрываются автоматически при срабатывании механизма расчехловки 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 рабоче-

го 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 раскрывающейся конструкции. В-третьих, конструкции ферменного типа имеют структуру взаимосвязей с замкнутыми кинематическими цепями.

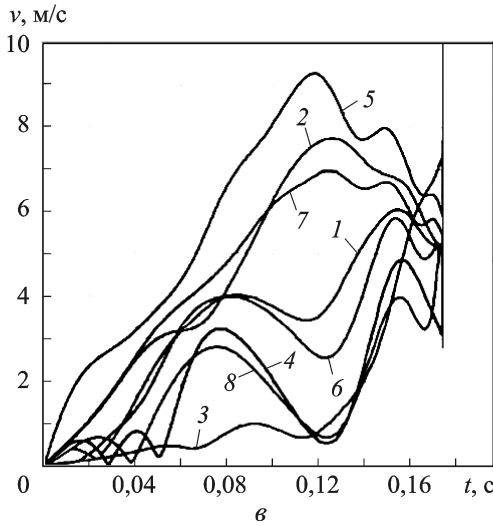
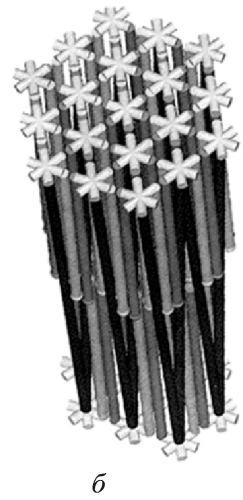
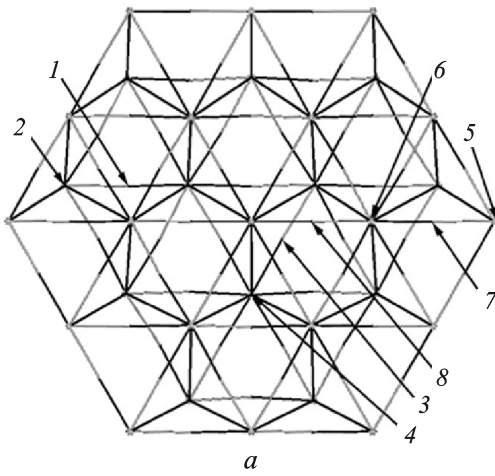
Для структур, отличных от плоских, составить функцию Лагранжа и ее производные не представляется возможным из-за громоздких аналитических выкладок. Следует отметить, что в этом случае не могут помочь даже такие мощные компьютерные системы символьной математики, как Maple и Mathematica. Целесообразно 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 плотноупакованное 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, б — 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 складывающемуся стержню. Ось  $OZ$  направлена вдоль стержня, а ось  $OY$  дополняет систему до правой системы координат и направлена перпендикулярно стержню. Угол  $\gamma_c$  определяет начальное положение трубчатого элемента складывающегося стержня относительно центральной штанги антенны, которая крепится к КА; угол  $\gamma_E$  определяет поворот узлового шарнира, обусловленный кривизной рабочей параболической поверхности антенны. При построении расчетной модели раскрытия конструкции антенны угол  $\gamma_E$  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  $\varphi_k$ , а значение теоретического угла раскрытия шарнира складывающегося стержня — как  $\varphi_c$ . Пружины кручения, расположенные в шарнире складывающегося стержня и узловом 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:

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



**Рис. 2. Модель ферменной конструкции:**

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

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

В нашем случае результирующий момент в узловом шарнире можно представить как

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

где  $M_{\text{упор}_k}$  — момент кручения пружины при раскрытии трубчатого элемента в узловом шарнире;  $c_k$  — коэффициент жесткости пружины узлового шарнира;  $\varphi_x$  — 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;  $\mu_k$  — коэффициент вязкого демпфирования диссипативного элемента, моделирующего упор;  $\omega_k$  — угловая скорость трубчатого элемента относительно узлового шарнира.

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

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

где  $M_{\text{упор}_c}$  — момент пружины кручения при раскрытии шарнира складывающегося стержня;  $c_B$  — коэффициент жесткости пружины шарнира 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;  $\mu_B$  — коэффициент вязкости демпфирования диссипативного элемента, моделирующего упор;  $\omega_c$  — 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  $\varphi_y$  — текущий угол поворота вокруг оси  $OY$ ;  $g_k$  — значение угла свободного хода;  $\omega_{k_y}$  — 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  $\varphi_z$  — текущий угол, соответствующий кручению стержня;  $\mu_z$  — коэффициент вязкости диссипативного элемента, моделирующий упор;  $\omega_{k_z}$  — 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.

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.



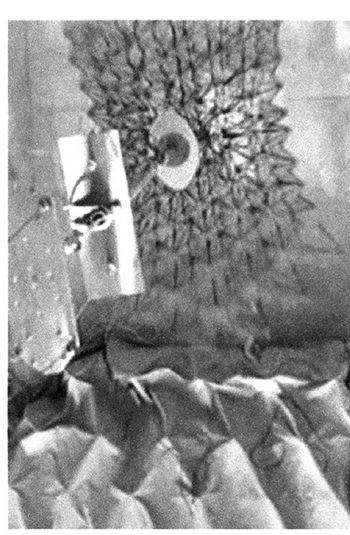
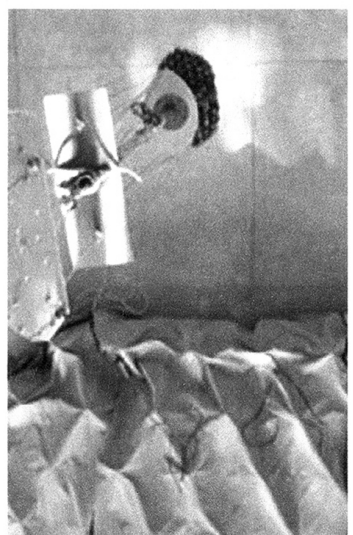
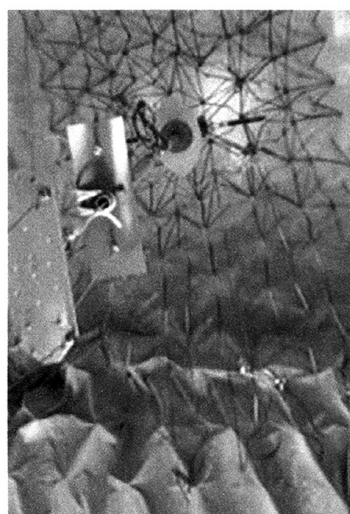
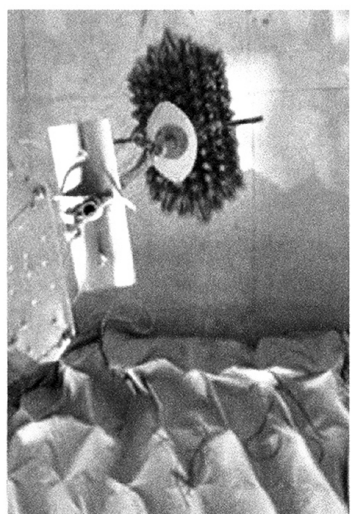
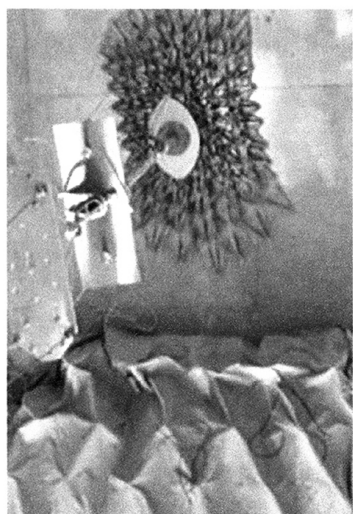
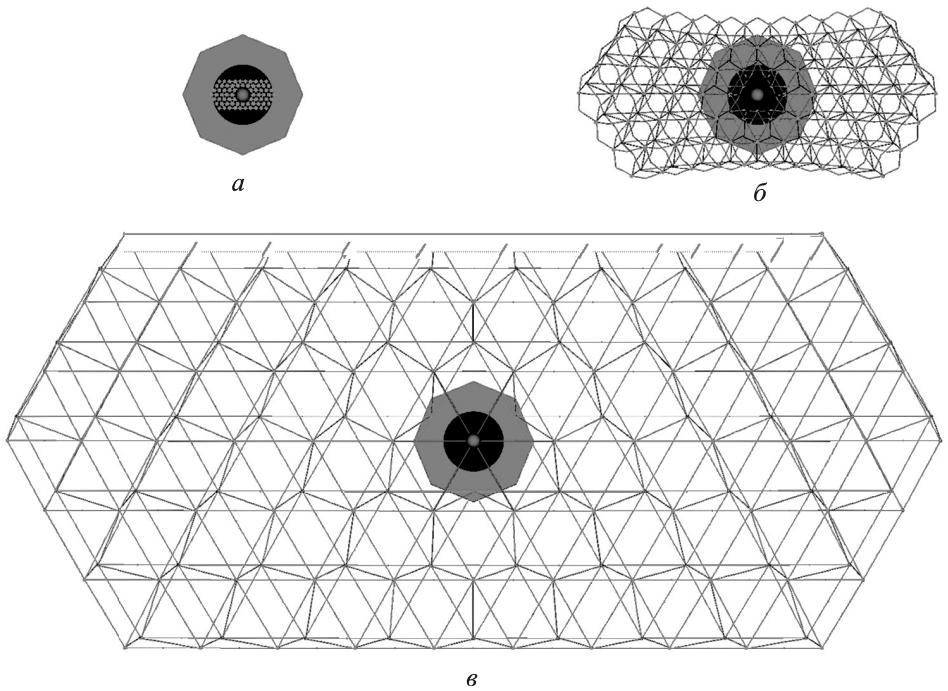


Рис. 3. Кинограмма раскрытия ферменной конструкции



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

$a - t = 0 \text{ с}$ ;  $b - t = 0,8 \text{ с}$ ;  $c - t = 1,8 \text{ с}$

*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.”*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. З и м и н 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. Б о й к о в В. Г. Моделирование динамики механических систем в программном комплексе EULER // САПР и графика. – 1998. – № 1. – С. 38–48.
4. Б о й к о в В. Г. Программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем EULER // САПР и графика. – 2000. – № 9. – С. 17–20.

Статья поступила в редакцию 15.05.2012