

МЕХАНИКА ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ СТРУКТУРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ¹

© 2007 В.Н.Зимин²

Проведение наземной экспериментальной отработки, допускающей создание условий, полностью идентичных условиям эксплуатации в космосе крупногабаритных космических конструкций, является весьма дорогостоящим и не всегда возможным делом. Это определяет решающую роль математического моделирования и вычислительного эксперимента при разработке и создании таких конструкций.

Перспективным классом крупногабаритных космических конструкций являются раскрывающиеся (трансформируемые) структурные системы, используемые в качестве антенн космических аппаратов (рис. 1). Разрабатываемые структурные антенны представляют собой мнооэлементные системы, состоящие из десятков тысяч взаимосвязанных между собой отдельных элементов.

При исследовании раскрытия на орбите структурной конструкции с достаточно большим числом стержневых элементов необходимо составить уравнения движения системы и дать численное их решение при заданных начальных условиях и заданных возмущениях, которые могут иметь место в процессе раскрытия. Эта задача весьма сложная, так как связана с необходимостью получения системы дифференциальных уравнений достаточно большого порядка, описывающей движение отдельных его элементов. Анализ многочисленных работ в этой области показывает, что скольконибудь полный учет кинематики движения раскрывающихся структурных конструкций встречает пока огромные трудности как при получении самих уравнений движения, так и при их интегрировании. Сложная в прикладном плане задача математического моделирования динамики таких конструкций, очевидно, не может быть решена с помощью одной универсальной модели. На практике, как правило, динамическое поведение конструкции анализируют с помощью совокупности моделей, каждая из которых нацелена на решение конкретного технического вопроса либо направлена на

¹Представлена доктором физико-математических наук, профессором А.В.Манжировым.

²Зимин Владимир Николаевич (sm11@sm.bmstu.ru), кафедра космических аппаратов и ракет-носителей Московского государственного технического университета имени Н.Э.Баумана, 105005, Россия, г.Москва, ул. 2-я Бауманская, 5.

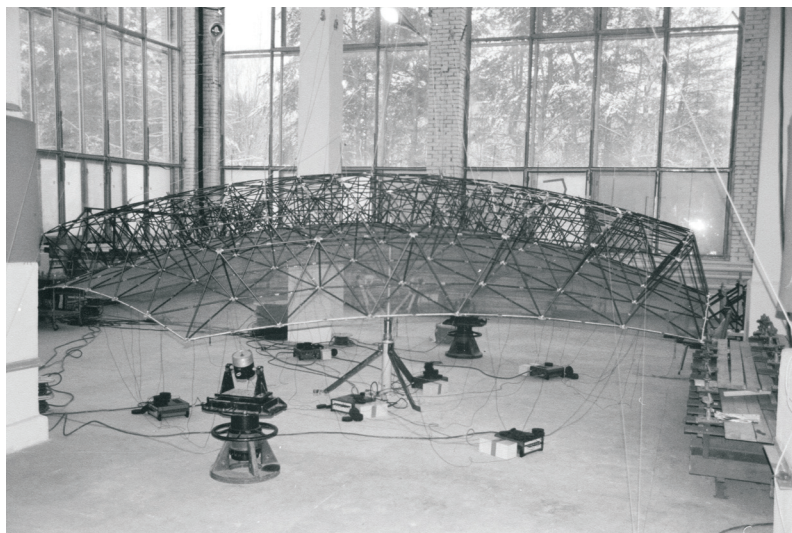


Рис. 1. Трансформируемая структурная космическая антенна

определение динамических характеристик конструкции, либо исследует динамику процесса раскрытия конструкции. Таким образом, говоря о модели динамики таких конструкций, будем иметь в виду не одну модель, а совокупность дополняющих и развивающих друг друга моделей — своего рода иерархию моделей. Поэтому изучение динамики раскрывающихся крупнобаритных структурных конструкций в том объеме, который необходим для решения технических вопросов, их проектирования и создания на основе частных (специализированных) моделей, можно рассматривать как регулярный метод.

Анализ показывает, что для плоских осесимметричных структурных конструкций можно использовать расчетную модель в виде цепочки последовательно соединенных пружин с массами.

Простейшая модель позволяет исследовать процесс раскрытия конструкции и определить необходимый запас потенциальной энергии упругих элементов. С помощью данной модели можно провести анализ различных вариантов распределения масс и жесткостей упругих элементов конструкции с целью выявления рационального соотношения масс и жесткостей, обеспечивающего надежное раскрытие конструкции, т.е. плавно, без волнообразований, приблизительно с одной скоростью всех элементов и осесимметрично относительно центра.

Данная модель является наиболее простой из возможных расчетных моделей раскрытия осесимметричных структурных конструкций. Модель построена на основе максимально возможного упрощения топологических свойств и кинематики конструкции. Предлагаемые упрощения представляются предельно допустимыми. Ее можно отнести к категории проектной или оценочной модели, необходимой на этапе разработки технических пред-

ложений при проектировании раскрывающихся структурных крупногабаритных конструкций. На этом этапе главным критерием выбора физической модели и разработки математической является быстрота получения численных результатов. Существенный недостаток данной модели — невозможность оценить возникающие динамические нагрузки в момент фиксации или установки на упоры раскрывающихся элементов конструкции.

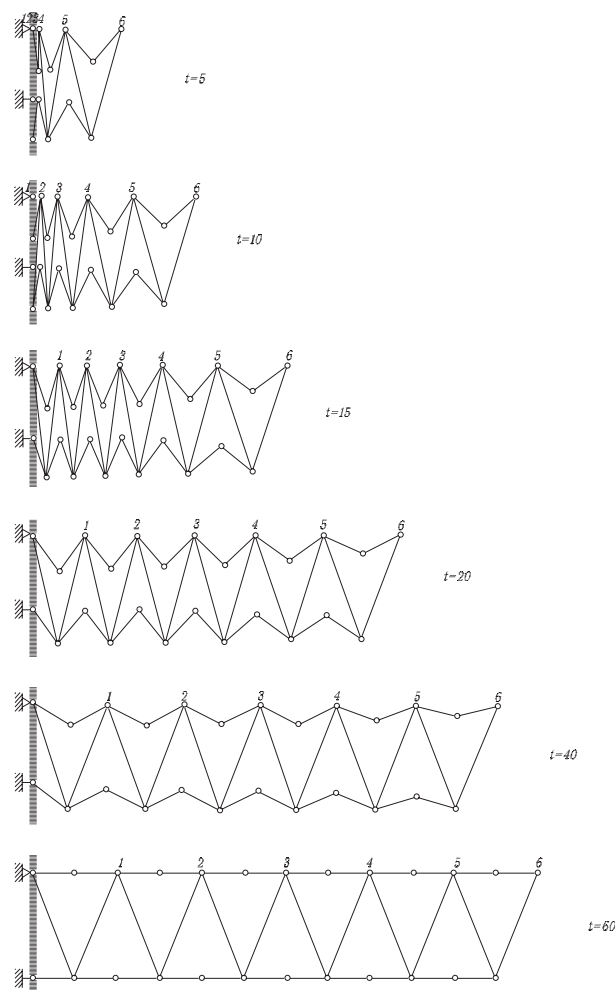


Рис. 2. Формы, принимаемые конструкцией при раскрытии

Более сложная расчетная модель — модель в виде цепочки складывающихся элементов конструкции (стержней).

Цепочка складывающихся стержней формируется на основе заданной геометрии первоначально плоской структурной конструкции. Модель основана на функциональном разделении элементов структурной конструкции: верхнего, нижнего и среднего поясов стержней. В качестве активного элемента конструкции принята верхняя цепочка складывающихся стержней.

При исследовании процесса раскрытия ряда структурных конструкций на основе данной модели при различных массовых характеристиках стержней и жесткостей пружин были получены следующие результаты.

При одинаковых массовых характеристиках стержней и жесткостей пружин процесс раскрытия происходит неравномерно, волнообразно, с большими изменениями углов и угловых скоростей между стержнями. Это может привести к большим динамическим нагрузкам в элементах конструкции в момент установки или фиксации складывающихся стержней. Однако за счет неравномерного распределения жесткостей пружин можно добиться равномерного раскрытия.

На рис. 2 представлены формы, принимаемые структурной конструкцией в различные моменты времени при раскрытии. На рис. 3 приведены соответствующие графики скоростей отдельных узлов конструкции.

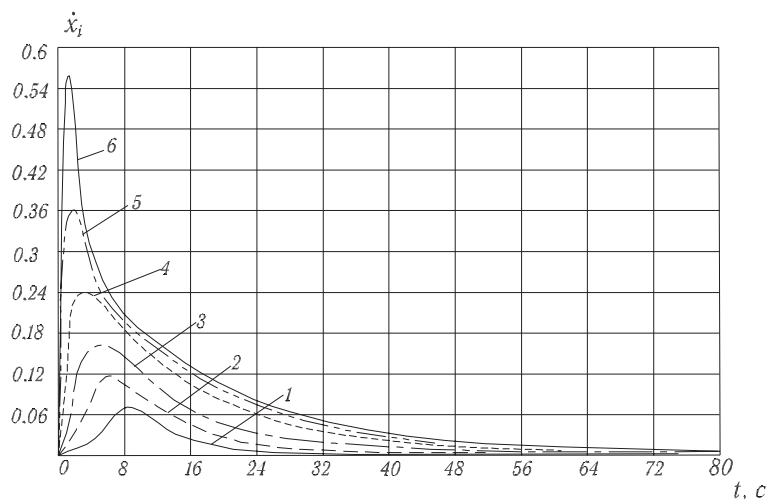


Рис. 3. Изменения линейных скоростей узлов конструкции. Нумерация узлов соответствует рис. 2

Полученные результаты дают новые возможности для оптимизации различных конструктивных решений при проектировании раскрывающихся структурных крупногабаритных конструкций. Данная модель может быть отнесена 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. Кроме того, с помощью данной модели можно оценить динамические нагрузки, возникающие в элементах конструкции в момент установки на упоры или фиксаторы складывающихся стержней.

В процессе исследования динамического поведения трансформируемой конструкции необходимо ответить на два вопроса: как учесть изменение структуры связей при раскрытии и какую модель принять для описания наложения связей на смежные элементы в процессе движения.

Установка элементов конструкции на упоры или фиксаторы может происходить как поэтапно в процессе ее раскрытия, 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. Реальные физические процессы, происходящие во время установки элементов трансформируемых конструкций на упоры или фиксаторы, весьма сложны. 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_d определяются зависимостями

$$M_y = k_y (\Delta\varphi_k - \Delta\varphi),$$

$$M_d = c_d \Delta\dot{\varphi},$$

где k_y , c_d — коэффициенты жесткости и вязкого трения упругого и демпфирующего элементов; $\Delta\varphi_k$ — 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

$$\Delta\varphi \geq \Delta\varphi_k. \quad (1)$$

Ограничение (1) выполняется за счет применения следующей логики проведения расчета. 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

$$\Delta\varphi_{k \min} \leq \Delta\varphi_k \leq \Delta\varphi_{k \max} \quad (2)$$

в конкретный шарнирный узел, где достигнуто ограничение (2), вводятся упругий и демпфирующий элементы. Если на следующем шаге интегрирования выясняется, что снова выполняется ограничение (1), то упругий и демпфирующий элементы исключаются из шарнирного узла. Если установка элементов конструкции происходит на фиксаторы, то на них накладываются ограничения типа (2). Это ограничение выполняется за счет применения следующей логики проведения расчета. 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, выби-

рается меньший шаг по времени, который используется до момента удара. Удар считается абсолютно неупругим, т.е. предполагается, что после удара

$$\Delta\dot{\varphi} = \Delta\ddot{\varphi} = 0. \quad (3)$$

Выполнение условия (3) обеспечивается с помощью демпфирующего элемента.

В большинстве практических случаев для определения характеристик упругого и вязкого элементов модели ударного взаимодействия проводят экспериментальные исследования раскрытия элементов трансформируемой конструкции. Значения коэффициентов жесткости и вязкого трения упругого и демпфирующего элементов подбираются путем сравнения экспериментальных и численных результатов для трансформируемых конструкций, состоящих из малого числа звеньев. При установке элементов конструкции на упоры или фиксаторы при различных соотношениях коэффициентов жесткости и вязкого трения возникают или осцилляционные режимы движения, или затухающие осцилляционные движения, или апериодические режимы движения элементов конструкции.

При исследовании раскрытия плоской структурной раскрывающейся крупногабаритной конструкции оказалось возможным использование уравнения Лагранжа второго рода, так как достаточно просто было получить выражения для кинетической и потенциальной энергий конструкции. Для структур, отличных от плоской, составить функцию Лагранжа и ее производные не представляется возможным из-за громоздких аналитических выкладок. Необходимо заметить, что в этом случае не могут даже помочь 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 [1].

В данном программном комплексе были построены модели и проведен численный анализ динамики раскрытия плоской и параболической структурных конструкций.

В качестве модели установки элементов конструкции на упоры или фиксаторы использовалась модель в виде упругого и демпфирующих элементов.

В результате проведения численного эксперимента выявлены следующие закономерности:

- рост коэффициента жесткости пружин существенно увеличивает максимальные скорости элементов конструкции в момент принятия ею рабочего положения и, соответственно, уменьшает время раскрытия; при этом возрастают ударные нагрузки на элементы конструкции;
- увеличение коэффициента жесткости упругого элемента при неизменном коэффициенте вязкого трения демпфирующего элемента приводит к увеличению ударных нагрузок на элементы конструкции;
- уменьшение коэффициента вязкого трения демпфирующего элемента при неизменном коэффициенте жесткости упругого элемента приводит к резкому увеличению ударных нагрузок на элементы конструкции;
- при отсутствии демпфирования раскрытие трансформируемой конструкции сопровождается абсолютно упругим ударом. Расчеты при нулевом коэффициенте вязкого трения демпфирующего элемента можно использовать лишь для оценки сверху динамической нагруженности элементов конструкции.

Заключительный процесс раскрытия структурной конструкции характеризуется резкой остановкой складывающихся стержней и появлением колебаний около состояния равновесия, определяемого относительным углом между трубчатыми элементами складывающихся стержней $\Delta\varphi_k$, 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 затухающими колебаниями относительно состояния, определяемого углом $\Delta\varphi_k$. При большом коэффициенте вязкого трения демпфирующего элемента процесс раскрытия конструкции заканчивается апериодическим режимом движения трубчатых элементов складывающихся стержней.

Преимуществом модели установки элементов конструкции на упоры или фиксаторы в виде упругого и демпфирующего элементов являются значительная простота, физическая наглядность и близость результатов расчета к экспериментальным данным для реальных конструкций. Недостатком данной модели является большая трудоемкость в подборе коэффициентов жесткости и вязкого трения упругого и демпфирующего элементов из экспериментов для трансформируемых конструкций. Кроме того, в системе обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих процесс раскрытия структурной конструкции, при некоторых коэффициентах модели установки элементов конструкции на упоры и фиксаторы может происходить резкое возрастание "жесткости". Связано это с 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

устойчивости процесса решения и применения специальных приемов численного интегрирования.

Представленная модель относится к категории поверочных моделей, предназначенных для уточнения применимости оценочных и рабочих моделей, а также оценки достоверности получаемых с их помощью результатов. Эта модель может использоваться на стадии рабочего проектирования, а также в процессе экспериментальной отработки раскрытия крупногабаритных структурных конструкций для моделирования различных нештатных ситуаций.

Структурные конструкции доставляются на космические орбиты в сложенном плотноупакованном состоянии, и дальнейшее приведение их в рабочее положение связано с реализацией процесса раскрытия. Работоспособность конструкций такого типа, в первую очередь, определяется тем, насколько велики возникающие динамические нагрузки на элементы конструкции в процессе их раскрытия из транспортного плотноупакованного состояния в рабочее положение. Поэтому без разработки комбинированных моделей, позволяющих провести расчет кинематики процесса раскрытия конструкции и прочности ее элементов, невозможно обеспечить высокие показатели надежности проектируемых перспективных изделий.

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, полученных в результате интегрирования уравнений движения. 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. При этом производится согласование расчетной модели раскрытия с конечно-элементной моделью конструкции в раскрытом рабочем состоянии.

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 [2]. Он должен составлять долю от наименьшего периода (наибольшей частоты собственных колебаний конструкции).

Прочностной расчет проводился с использованием программного комплекса MSC/NASTRAN.

На рис. 4 показано расположение узлов и соответствующих им складывающихся стержней верхнего пояса, в которых достигаются максимальные

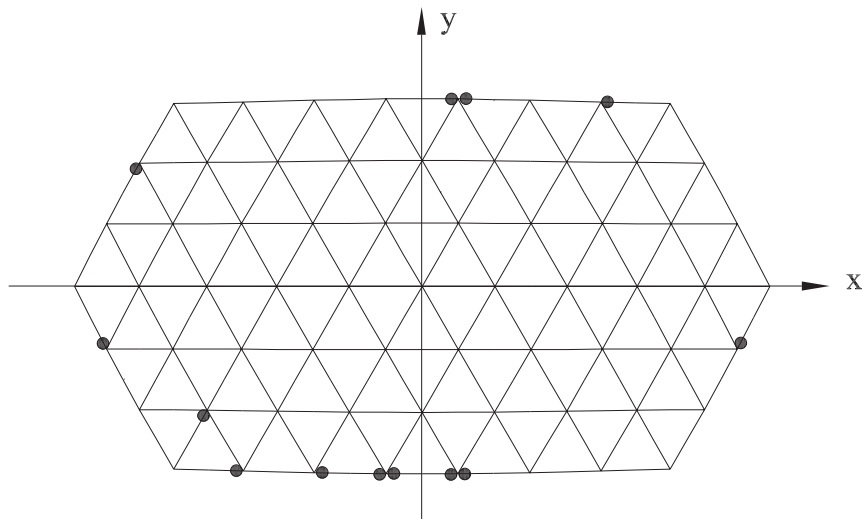


Рис. 4. Наиболее нагруженные стержни структурной конструкции

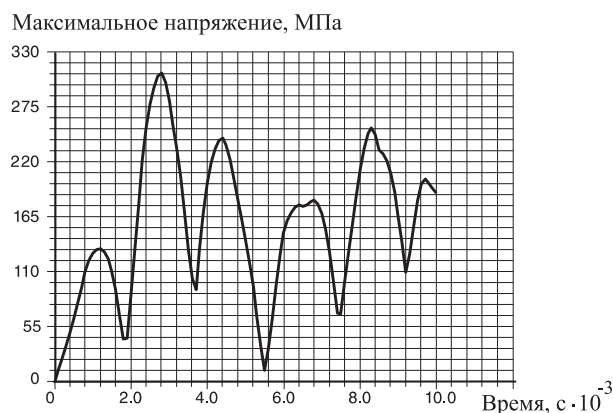


Рис. 5. Изменение максимальных напряжений в элементе структурной конструкции

значения напряжений. Из рис. 4 следует, что 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. Несимметричность распределения по поясам максимальных и минимальных напряжений объясняется несимметричностью самой конструкции рефлектора, обусловленной конструктивным выполнением нижнего пояса.

На рис. 5 приведено изменение во времени максимальных напряжений для наиболее нагруженного элемента структурной конструкции.

Проведенный анализ напряженно-деформированного состояния трубчатых упругих стержней структурной конструкции показал, что наибольшие

напряжения в стержнях определяются уровнем первоначальной потенциальной энергии пружин, обеспечивающих раскрытие конструкции из транспортного плотноупакованного состояния в рабочее и поддержание требуемой формы при эксплуатации на орбите. Уменьшение уровня первоначальной потенциальной энергии пружин соответственно уменьшает угловые скорости стержней в момент установки их на упоры, т.е. уменьшает величины начальных скоростей, определяющих величину ударного импульса, действующего на структурную конструкцию при раскрытии.

Конкретная структурная конструкция антенны была выбрана, главным образом, потому что для нее уже существуют реальные опытные образцы, а также получены экспериментальные данные, позволившие проверить применимость моделей и алгоритмов расчета, представленных выше.

Литература

- [1] Бойков, В.Г. Программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем EULER / В.Г.Бойков // САПР и графика. — 2000. — № 9. — С. 17-20.
- [2] Зимин, В.Н. Особенности расчета динамических характеристик раскрываемой ферменной космической конструкции / В.Н.Зимин, И.М.Колосков, В.Е.Мешковский // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2001. — №2. — С. 12-15.

Поступила в редакцию 15/V/2007;
в окончательном варианте — 15/V/2007.

MECHANICS OF TRANSFORMABLE SPACE STRUCTURES³

© 2007 V.N. Zimin⁴

Ground tests of the large space structures under conditions simulating properly the space environment are very expensive and sometimes they can not be carried out at all. That is the reason why mathematical modeling and numerical experiments are so important for development and construction of such structures.

Paper received 15/V/2007.
Paper accepted 15/V/2007.

³Communicated by Dr. Sci. (Phys. & Math.) Prof. A.V. Manzhurov.

⁴Zimin Vladimir Nikolaevich (sm11@sm.bmstu.ru), Dept. of Spacecrafts and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia.