УДК 531.36

ВИБРОУДАРНЫЕ РЕЖИМЫ В СВОБОДНЫХ СИСТЕМАХ.

Н.В.Панкова.

Институт машиноведения РАН, Россия, Москва.

Данная работа посвящена рассмотрению некоторых вопросов разделения элементов конструкций баллистических ракет дальнего действия и ракетно-космических комплексов. Для этих объектов характерно отделение пассивных элементов конструкции, исчерпавших свой энергетический ресурс или закончивших свое функционирование (ступени ракет, разгонные блоки, двигательные установки систем обеспечения запуска, хвостовые и переходные отсеки, головные обтекатели, крышки люков научной аппаратуры, аварийные ситуации, связанные со спасением экипажа и т.п.). Отделение должно происходить достаточно быстро и без соударений с другими элементами конструкций, т.е. главной задачей ставится обеспечение отсутствия виброударов при разделении (рис.1).

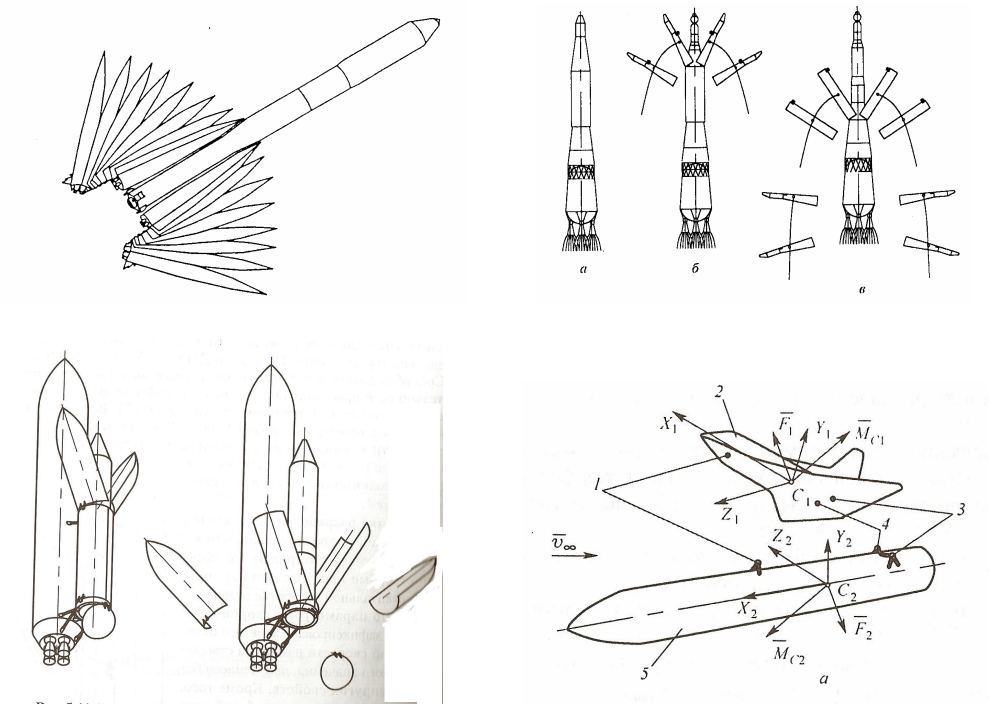


Рис. 1

Системы разделения и их составляющие проходят тщательную и всестороннюю экспериментальную отработку ввиду повышенных требований, предъявляемых к надежности функционирования.

На рис.2 представлены экспериментальные установки для отработки системы сброса верхнего обтекателя и установка для отработки отделения параблока ракеты-носителя «Энергия». Для более полной имитации натурных условий предпочтительнее использовать стенды вертикального типа, но высокая стоимость разработки и создания таких стендов практически исключает их реализацию.

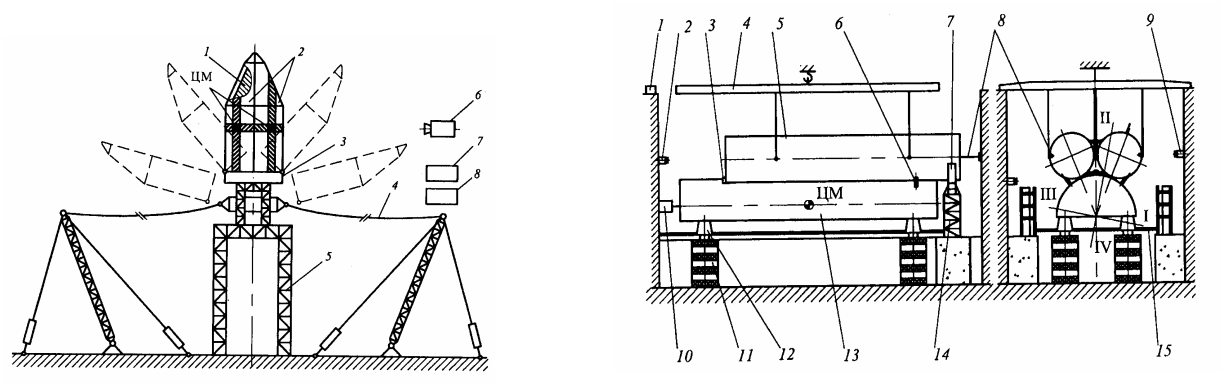


Рис.2

По рис.2 следует заметить, что поскольку испытания проходят, как правило, в закрытом помещении, включение в работу РДТТ (ракетного двигателя твердого топлива, который наиболее часто используется в реальных условиях) исключено. Наиболее часто в качестве средств отделения используются пружинные толкатели и РДТТ, последние для отделения объектов, имеющих большие габариты и массы.

Развитие ракетно-космической техники сопряжено с ростом ее габаритов с одновременной минимизацией массы конструкции и одновременным увеличением массы полезного груза. Поэтому становится особенно актуально математическое моделирование процессов разделения с учетом упругих свойств конструкции, позволяющее изучать процессы, происходящие под действием значительных сосредоточенных сил, создаваемых специальными средствами отделения, установленными в нескольких точках конструкции.

В разделяемых телах могут возникнуть колебания, в результате которых требуемая относительная скорость отделения, рассчитанная без учета упругих свойств, в реальном процессе окажется несколько меньшей (рис.3). Актуальной является не только прогнозируемая оценка уровня колебаний и величины потерь скорости отделения, но и задача рационального выбора мест установки средств отделения и их рабочих характеристик.

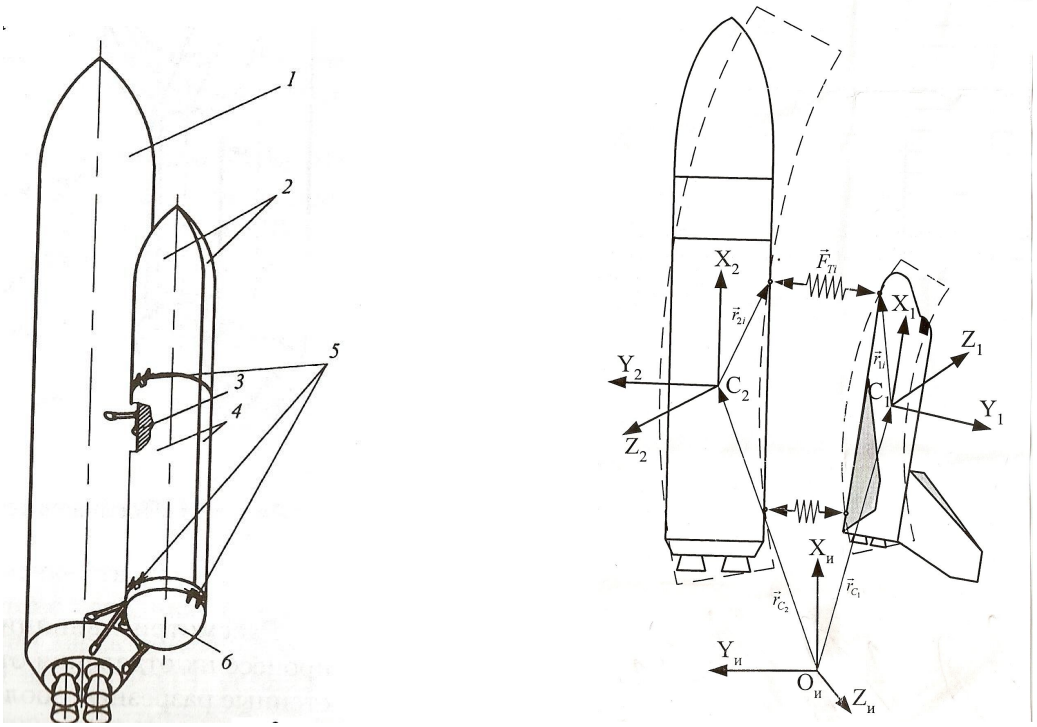


Рис.3

В самой общей постановке движения перемещения упругих конструкций описываются громоздкими «гибридными» системами, включающими уравнения в частных производных и обыкновенные дифференциальные уравнения. Это соответствует физической сути задачи разделения тел: на переносное движение механической системы в целом (поступательное и вращательное) накладываются относительные упругие перемещения отдельных элементов, представляющих сплошную среду. В переносном движении каждое тело обладает шестью степенями свободы, в относительном – бесконечным числом.

Исходя из конструктивных особенностей разделяемых тел и опыта технической реализации процессов разделения, предположим, что упругие деформации малы по сравнению с характерными размерами конструкции, а также предположим малой угловую скорость конструкции и ее производную в момент разделения, т.е. задачу об упругих деформациях будем решать в линейной постановке.

Для решения таких задач был использован подход, использующий разложение движения упругих систем на естественные составляющие: порождающее движение как условно твердого тела и малые упругие колебания около порождающего движения, представленные в модальном виде, т.е. в виде разложения по собственным формам колебаний [1,2].

В рамках сделанных допущений система уравнений поступательного и вращательного движения условно твердого тела и колебательные движения становятся как бы несвязанными [3]. Однако эта связь существует за счет членов, зависящих от координат, т.е. аэродинамических и гравитационных сил и сил средств отделения.

Только в их отсутствии система уравнений распадается по настоящему. Это может быть еще одним упрощающим предположением.

Обратимся к изучению процесса отделения отработавших ступеней. Под носителем будем понимать любой объект (ракету-носитель, орбитальный корабль, космическая платформа и т.п.), от которого отделяется какой-либо элемент конструкции. Такими элементами могут быть выработавшие топливо ускорители, створки обтекателей полезного груза, отстреливаемые крышки люков, антенны орбитальных телескопов, панели солнечных батарей, отделяемые перед укладкой спутника в отсек многоразового космического аппарата перед возвращением на землю и т.п. Конструкция носителя обладает определенной нежесткостью, но ее упругие свойства, как правило, значительно меньше выражены, чем упругие свойства отделяемого тела, поэтому упругими свойствами носителя в задачах разделения можно пренебречь и считать его абсолютно жестким. Будем считать также, что масса и инерционные характеристики носителя неизменны в процессе отделения в виду малости времени процесса.

Обратимся простейшей модельной задаче, к которой сводится ряд указанных выше технических задач по отведению свободного от связей упругого тела в заданную область. Нежелательным является выход отдельных частей упругого тела из этой области. Это явление назовем отдачей. Сформулируем четко постановку задачи.

Свободной от связей однородной упругой балке, первоначально недеформированной и неподвижной в некотором инерциальной системе координат, сообщается направленное поперечное движение при помощи двух импульсных воздействий, сосредоточенных в симметричных относительно середины балки точках (рис.4) [3].

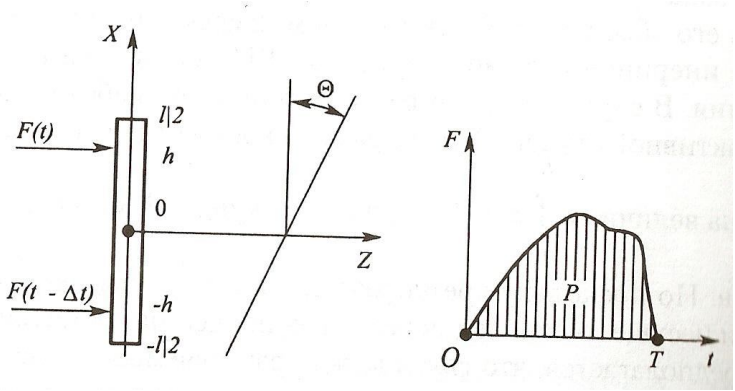


Рис.4

На рис.5 представлено разбиение плоскости параметров плеча импульсного воздействия а и задержки ключения второго импульса в. В области I (область малой отдачи) импульсы приложены вблизи узлов первой формы собственных колебаний балки и задержка мала, движение балки наболее сбалансированное. Области построены при форме постоянной силы на конечном временном отрезке.

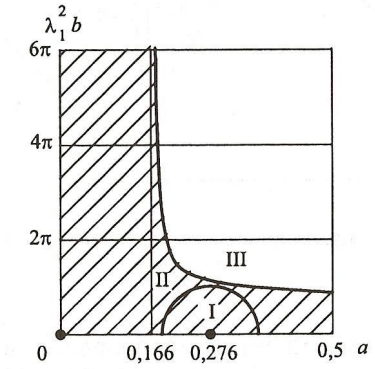
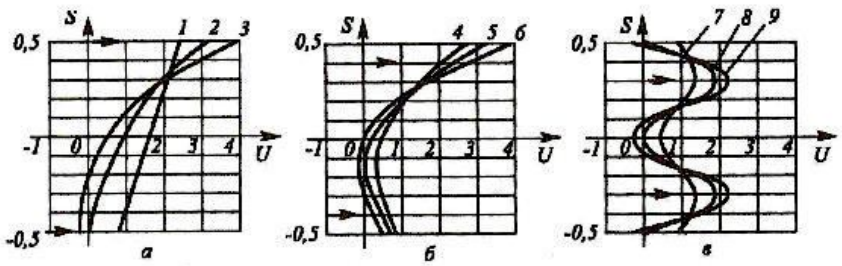


Рис.5

Величина отдачи существенно зависит от точек приложения импульсов, от задержки во включении одного из импульсов, от длительности и формы импульсов. При относительно малой длительности импульс любой формы воспрнимается как удар. И только при достаточно большой длительности импульса выбор его формы может существенно снизить отдачу. Было показано, что экспоненциальный разгон свободной балки при наличии неподвижных точек является при достаточной длительности импульсов наилучшим с точки зрения уменьшения отдачи разгоном, который следует дополнять кратковременным переходным процессом для подавления остаточных колебаний (рис.6,7)



Влияние интенсивности разгона на форму изгиба балки:
а – неподвижная точка на конце балки (*1* – $\gamma = 2,3$; *2* – $\gamma = 6,8$; *3* – $\gamma = 11,3$), $b = 0,04$; *б* – неподвижная точка в интервале $-0,5 \le s \le 0$ (*4* – $\gamma = 20,2$; *5* – $\gamma = 33,8$; *6* – $\gamma = 45$), $b = 0,04$; *в* – форма с тремя неподвижными точками (*7* – $\gamma = 67,8$; *8* – $\gamma = 124$; *9* – $\gamma = 169$), $b = 0$; стрелками на графиках показано направление движения

Рис.6

На рис.7 приведены результаты расчетов, учитывающие вклад первых 10 форм свободной балки. Над каждй линией указано значение некого параметра, связанного с интенсивностью экспоненциального разгонного импульса [3]. Глобальный максимум

интенсивности соответствует точке А узлу 1-й изгибной формы балки. Окрестность этой точки является областью относительно малой отдачи. Соответствующая форма изгиба при разгоне имеет 3 неподвижные точки и представляется наиболее сбалансированной для данной схемы приложения импульсов (рис.6 в, форма 8). Пунктирная кривая АВ на рис.7 делит полосу параметров *a,b* (*a*-точка приложения импульса, *b*-задержка включения 2-го импульса) на 2 части. Для области, лежащей ниже кривой АВ форма изгиба балки имеет неподвижную точку (рис.6б, форма 5).Для области слева и выше кривой АВ неподвижной точкой является конец балки (рис. 6а, форма 2). Как видно из рис.6 с ростом интенсивности разгона форма все более искривляется, потом повляются неподвижные точки формы – это соответствует критическому значению интенсивности разгона.

При значениях интенсивности разгона меньше критического значения отдачи практически нет, но время отделения увеличивается, а при интенсивности больше критической режим слишком интенсивен и порождает отдачу. На рис.7б I-область малой отдачи, II- область средней отдачи, III-область большой отдачи, где преобладает движение балки как твердого тела. Соответствующие формы движения в этих областях приведены на рис.7а.

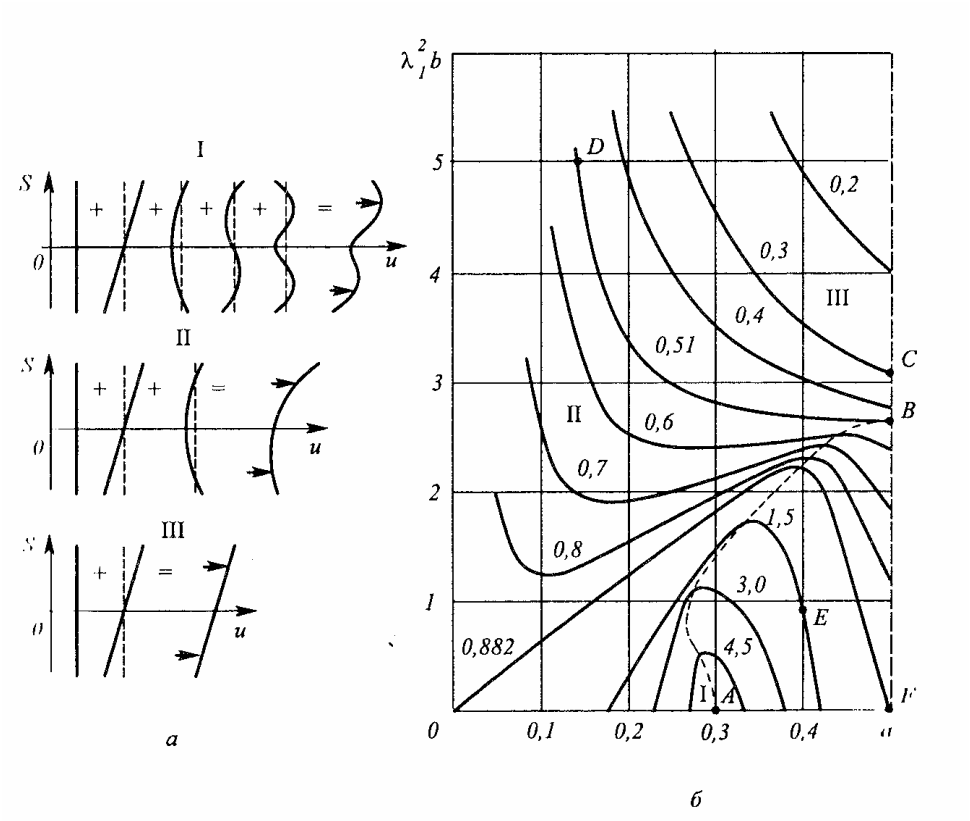


Рис.7

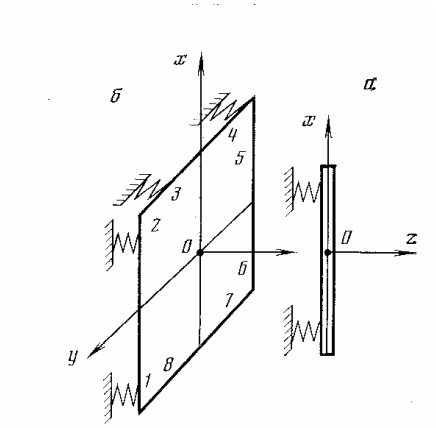


Рис.8

Далее рассмотрим проблему потери скорости при направленном перемещении свободной упругой балки и свободной пластины, отталкиваемых от неподвижной стенки с помощью пружин (это - модельная задача, где в роли средств отделения выступают пружинные толкатели, о которых говорилось выше)[4] (рис8).

При исследовании балки предполагалось, что в симметричных точках действуют два пружинных толкателя, а в случае квадратной пластины в симметричных точках расположены 8 толкателей (суммарные жесткости толкателей приняты одинаковыми для балки и пластины).

Коэффициент потери скорости центра масс отделяемого объекта зависит от относительной жесткости пружин и положения точек их приложения. Уравнения исследования колебаний балки и пластины, по сути, аналогичны и отличаются для пластины только большим разнообразием форм колебаний и, следовательно, большими возможностями для перераспределения энергии. Результаты представлены на рис.9.

По вертикальной оси отложены параметры $\gamma=kl^3/c$ ($\gamma_1=k_1\ l^2/D$) , прямо пропорциональный жесткости толкателей и обратно пропорциональный изгибной жесткости балки (пластины). Здесь k-жесткость толкателей балки, l-длина балки (линейный размер квадратной пластины), c-изгибная жесткость балки, k_1 –жесткость толкателей пластины, D-цилиндрическая жесткость пластины, a – координаты точек контакта балки (пластины) с толкателями.

Если бы упругие колебаниям не возбуждались, скорость движения центра масс балки после завершения работы толкателей (пластины) были бы одинаковыми, поэтому на рис.9 для балки отложена величина γ, а для пластины $4\gamma_1$.

Результаты расчетов потерь скорости отделяемых объектов с учетом 20 форм колебаний представлены в виде линий уровня в долях от 1. Видно, что с увеличением относительной жесткости толкателей потери скорости растут и могут достигать внушительных размеров.

В случае отделения балки с увеличением жесткости пружин до определенного момента потери скорости отделения сначала невелики (до 0.03, т.е.3%), т.к. упругие колебания всех форм возбуждаются слабо. Далее с ростом жесткости активно возбуждается первая форма упругих колебаний при относительно слабом возбуждении высших форм, но потери скорости могут быть незначительными, если толкатели расположены вблизи узлов первой формы (a=0.276), и заметно возрастают (до 30-50%) при смещении пружин к середине балки (a=0) или к концам балки (a=0.5). На конце балки после первого схода балки с пружин в результате отмашки концов балки назад происходит повторное взаимодействие пружинами и скорость движения центра масс дополнительно увеличивается. Этим объясняется поворот линий уровня вблизи a=0.5. При дальнейшем увеличении жесткости пружин взаимодействие с балкой носит ударный характер, возбуждается значительное число форм колебаний независимо от расположения пружин.

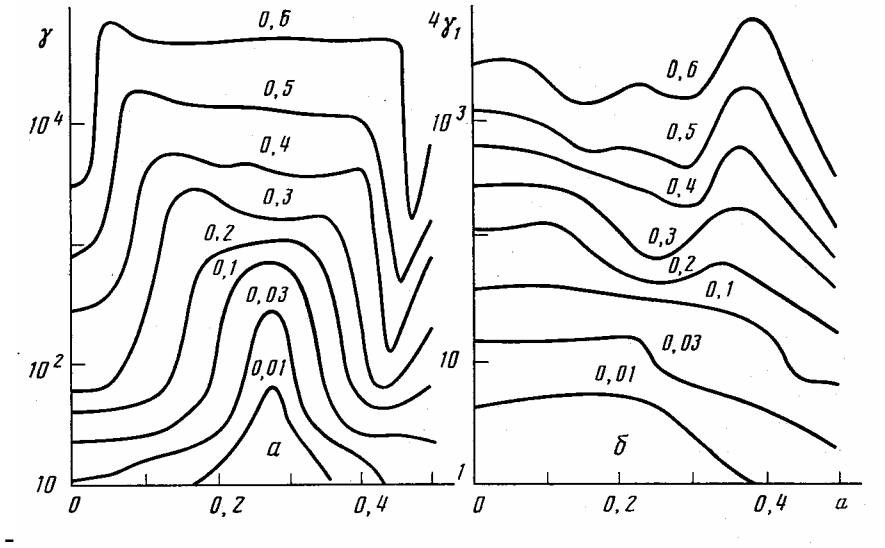


Рис.9

Следовательно, при перемещении упругого тела в заданном направлении с помощью сжатых пружин возбуждение упругих колебаний тела приводит к уменьшению скорости его поступательного движения. Потери скорости можно снизить, уменьшая относительную жесткость пружин и располагая их ближе к узлам и узловым линиям низшей формы упругих колебаний.

Однако в реальных объектах это не всегда возможно, т.к. часто схема компоновки уже принята, поэтому, применяя математическое моделирование и расчеты с помощью современных конечно-элементных комплексов, можно хотя бы спрогнозировать нежелательные результаты или помочь в проведении работ по доводке таких объектов. На рис.10 представлены результаты расчетов с помощью конечно-элементных комплексов двух низших симметричных изгибных форм колебаний головного обтекателя и среднего обтекателя, которые сначала совершают поворот и затем отделяются окончательно. Видно, что для головного обтекателя наибольшую амплитуду имеют «нижние» точки обтекателя, расположенные на его цилиндрической поверхности в районе плоскости, делящей головной обтекатель на створки. Именно эти области створок будут наиболее откликаться на внешние воздействия и иметь

наибольшие деформации в направлении так называемой зоны расположения полезного груза.

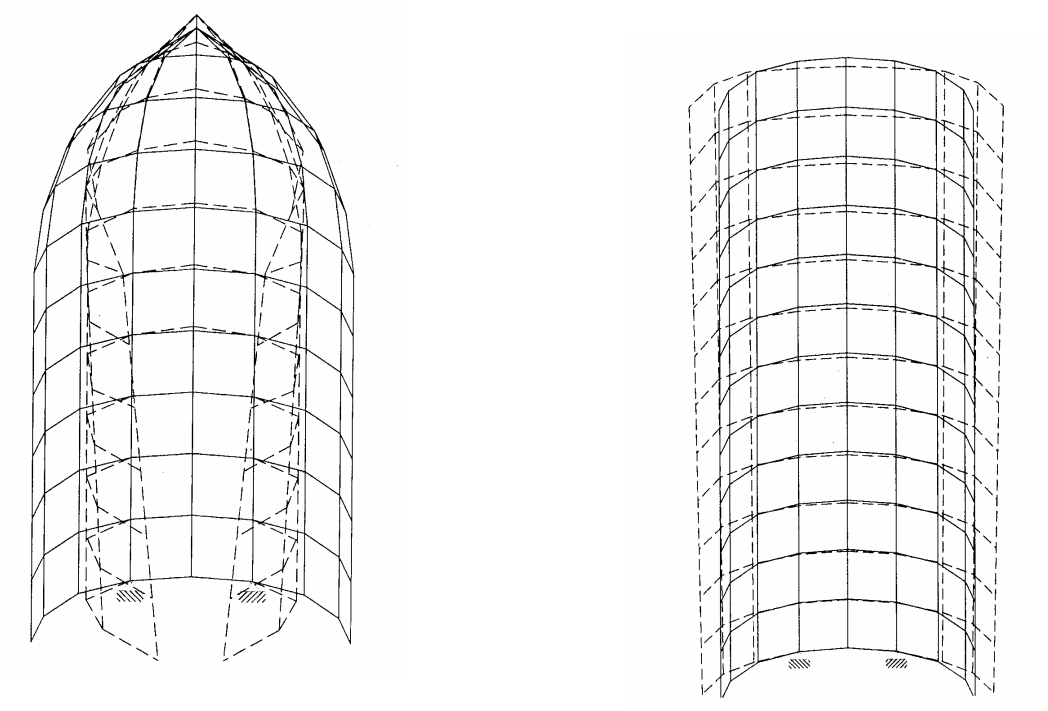


Рис.10

Проведя необходимые расчеты при различных средствах разделения (как по типу, так и по направлению) можно определять величину необходимых зазоров между обтекателями и полезным грузом, варьировать параметрами отделяемых частей и т.п., что приведет к снижению общей массы конструкции и увеличению массы полезного груза , что может снизить стоимость запуска.

Литература

1 Докучаев Л.В. Нелинейная динамика летательных аппаратов с деформируемыми элементами. М. Машиностроение, 1987г.231с.
1. Галлагер Р. Метод конечных элементов М.: Мир, 1984г.428с.
2. Колесников К.С., Кокушкин В.В., Борзых С.В., Панкова Н.В. Расчет и проектирование систем разделения ступеней ракет. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006г.,376с.
3. Левин Е.М., Панкова Н.В. Потери скорости при направленном перемещении свободной упругой балки и пластины М Ан СССР, Машиноведение1985, №6, с.38-43.

Поступила: 06.06.09.