

Н. Г. Шульженко<sup>1</sup>, Б. Ф. Зайцев<sup>1</sup>, А. В. Асаенок<sup>1</sup>, Д. В. Клименко<sup>2</sup>, Т. Я. Батутина<sup>2</sup>, Б. В. Бурчаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков

<sup>2</sup> Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепропетровск

## ДИНАМИЧЕСКОЕ КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АДАПТЕРОВ КОСМИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ

*Моделируется динамический процесс в системе адаптеров ракеты-носителя и космического аппарата, вызванный ударно-импульсным воздействием от срабатывания пироприборов при разделении. Применяются трехмерные модели МКЭ и вводится по специальной методике поверхность раздела адаптеров, по которой моделируется односторонний контакт. Задача по времени решается конечно-разностным  $\theta$ -методом Вильсона. Приводятся результаты исследования кинематических характеристик адаптеров во времени и определяются спектры удара.*

**Ключевые слова:** космическая конструкция, адаптер, разделение, динамика, контакт, конечный элемент, акселерограмма, спектр удара.

### ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Системы разделения (СР) широко используются в ракетно-космической технике и предназначены для отделения пассивных элементов ракет от активных, в частности отработавших ступеней, головного обтекателя, космического аппарата (КА), а также для отсоединения коммуникаций. При этом они обеспечивают жесткое крепление частей летательного аппарата (ЛА), а разделение осуществляется с заданными характеристиками, включая защиту чувствительных органов ЛА от побочного действия пиромеханических элементов при срабатывании. Конструкции СР разнообразны, требования к которым и сравнительная оценка приведены в работах [7, 13]. В основном применяются СР пиромеханического и детонационного типа, причем первые получили наибольшее распространение [13]. Одной из проблем, возникающих при отделении КА от

ракеты-носителя (РН), являются пиковые перегрузки отклика прецизионного оборудования от срабатывания пироприборов. Определение нагрузок, возникающих при ударно-импульсном воздействии от пироприборов, и их влияние на движение (колебания) изделий ракетно-космической техники рассмотрено в работах [4, 6, 8]. Для характеристики ударных процессов используются разные параметры, в частности спектр удара (СУ) и спектр Фурье [4, 8, 14]. Спектр удара предпочтительно используется в высокочастотной области возбуждения в ближней и средней зонах от источника воздействия [14], что особенно проявляется при уменьшении массы элементов оборудования КА.

Применение численных методов к расчету динамики конструкций космического назначения, в том числе и для СР, рассматривалось в работах [15, 16, 18, 19].

В данной работе рассматривается одна из типовых конструкций системы разделения, принципиальная схема которой представлена на рис. 1, составленная из адаптеров РН и КА. Адаптеры

© Н. Г. ШУЛЬЖЕНКО, Б. Ф. ЗАЙЦЕВ, А. В. АСАЕНОК,  
Д. В. КЛИМЕНКО, Т. Я. БАТУТИНА, Б. В. БУРЧАКОВ, 2016

соединены пироустройствами, стыкуются между собой и составляют единую конструкцию. При срабатывании отдельных пироустройств возникают динамические явления, которые первоначально на небольшом промежутке времени носят волновой характер (фронт, запаздывание возмущения), а затем охватывают всю конструкцию и рассматриваются как колебательный процесс. Усложняющим обстоятельством при изучении динамической реакции системы является переменное во времени контактирование адаптеров по поверхности их раздела (рассматривается как математический разрез), которое существенно влияет на динамические реакции адаптеров при срабатывании пироустройств.

Выбор метода и построение алгоритмов, учитывающих контактирование по поверхности раздела (разреза), во многом определяет скорость сходимости решения нелинейной контактной задачи и объем вычислений. Решения контактных задач для тел со сквозными разрезами в различных постановках широко представлены в научной литературе, например в монографиях [5, 9–12, 21]. Для тел канонической формы традиционно применяются аналитические методы, позволяющие выявить качественные особенности решений. В задачах прикладной направленности, где не накладываются ограничения на форму тела, применяются численные методы расчета. Основной объем публикаций относится к задачам статики, а динамические контактные задачи представлены отдельными публикациями.

Модели деформирования адаптеров теоретически должны отражать возможность проявления волновых процессов, тем более что нагружение от срабатывания пироустройств близко к взрывному. Хотя конструкция адаптеров, в особенности адаптера РН, близка к составной оболочке вращения, применение теории тонких оболочек недопустимо по формальным причинам, так как не позволяет отразить волновые процессы. Более сложные теории типа теории Тимошенко, учитывающие сдвиги, хотя и являются волновыми, но не имеют в данном случае очевидных преимуществ по отношению к общей трехмерной модели.

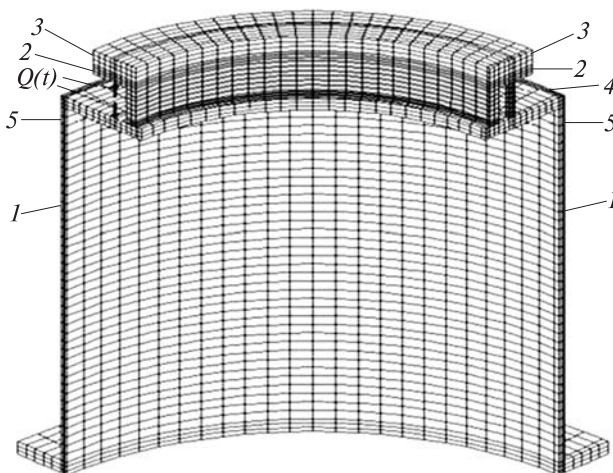


Рис. 1. Модель системы адаптеров (составная конструкция): 1 — адаптер РН, 2 — адаптер КА, 3 — макет КА, 4 — пироустройство (связь), 5 — контактный стык

В связи с изложенным задача о динамической реакции системы контактирующих адаптеров РН и КА ставится как динамическая контактная задача теории упругости для системы трехмерных тел, имеющих поверхность раздела (контакта) в виде плоского разреза.

#### ПРИМЕНЯЕМЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Система адаптеров (СА) моделируется как упругое трехмерное тело с плоским разрезом нулевой толщины, подчиняющееся уравнениям динамической теории упругости, дискретизация которых выполняется согласно МКЭ. Применяется топологически регулярная система дискретизации и полилинейный изопараметрический конечный элемент в виде шестигранника [1].

Уравнения динамического состояния первоначально цельного тела, т. е. до введения разреза, после применения процедуры МКЭ к функционалу Даламбера — Лагранжа в матричной форме представляются в виде

$$[M_0] \ddot{\mathbf{u}} + [C_0] \dot{\mathbf{u}} + [K_0] \mathbf{u} = \mathbf{F}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{u}$  — вектор узловых перемещений;  $[M_0]$ ,  $[C_0]$ ,  $[K_0]$  — матрицы масс, демпфирования и жесткости для тела без разреза;  $\mathbf{F}$  — вектор узловых сил от внешнего воздействия.

Задача состоит в построении по плоскости стыка адаптеров разреза, разделяющего тела

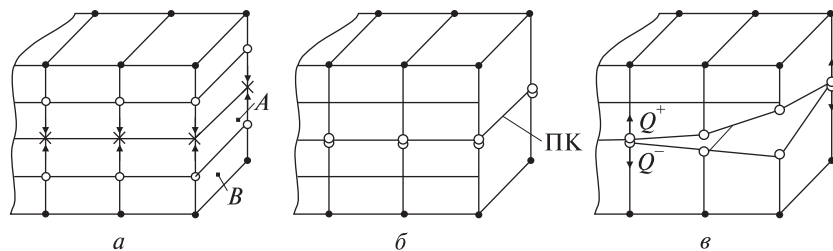


Рис. 2. Схема трансформации КЭ-сетки (а, б) и введения контактных сил (в): а — первоначальная сетка; б — полученная сетка с поверхностью контакта ПК; кружки, косые крестики и двойные кружки — смещаемые, исключаемые и двойные узлы; А, В — КЭ

адаптеров, у которых точки, выходящие на разрез, могут совершать независимые перемещения. Построение поверхности раздела выполняется согласно методике введения разрезов [2], применение которой для данного случая является более простым. Схема реализации методики представлена на рис. 2, а, б, где выполняется трансформация конечноэлементной сетки (КЭ-сетка) и вводимой поверхности разреза. Ближайшие к поверхности раздела о-узлы смещаются и занимают положение х-узлов. При этом конечные элементы А исчезают, а их х-узлы исключаются из рассмотрения. Элементы В изменяют только координаты своих узлов. Матрицы жесткости, масс и демпфирования трансформированных КЭ получают формализованными преобразованиями

$$\begin{aligned}
 [K_A] &= G \cdot \sum_j \mathbf{i}_j \mathbf{i}_j, \quad [M_A] = g \cdot \sum_j \mathbf{i}_j \mathbf{i}_j, \\
 [C_A] &= g \cdot \sum_j \mathbf{i}_j \mathbf{i}_j,
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где принята диадная форма представления матриц;  $\mathbf{i}_j$  — вектор, у которого только  $j$ -я составляющая отлична от нуля и равна единице;  $j$  — индекс, указывающий на х-узлы и компоненты перемещений в этих узлах;  $G \gg 1, g \ll 1$  — соответственно большое и малое числа.

Формулы (2) позволяют выполнить диагонализацию матриц элементов А относительно переменных х-узлов. При этом они формально есть в глобальных матрицах жесткости, масс и демпфирования, но не связаны с другими узловыми переменными, и соответственно, не влияют на их значения.

Результатом трансформации КЭ-сетки является создание на поверхности разреза двойных узлов (на рисунке помечены двойными кружочками), каждый из которых занимает одно и то же

положение, но принадлежит различным телам и варьируется независимо. Схема полученной КЭ-сетки представлена на рис. 2, б.

При колебаниях поверхности адаптеров, выходящие на ПК, могут входить в односторонний контакт, когда отрыв возможен, а взаимного проникновения тел нет. Рассматривается контактирование адаптеров только по нормали к ПК [17], т. е. допускается проскальзывание без трения. Учитывая характер приложения внешних нагрузок, ориентированных по оси адаптеров, значительных проскальзываний не следует ожидать, поэтому принятое предположение вполне оправданно.

Условие непроникновения тел адаптеров по ПК имеет вид

$$\delta_{in} = u_{in}^+ - u_{in}^- \geq 0, \tag{3}$$

где  $u_{in}^+, u_{in}^-$  — перемещения по нормали  $\bar{n}$  в  $i$ -м двойном узле на положительной и отрицательной поверхностях адаптеров,  $\delta_{in}$  — сближение по нормали в  $i$ -м двойном узле.

Знаку равенства в выражении (3) соответствует состояние контакта адаптеров, а неравенства — раскрытие поверхностей стыка адаптеров.

При контактировании адаптеров на ПК возникают переменные по величине и расположению неизвестные контактные силы, отличные от нуля в зонах контакта и равные нулю в зонах раскрытия. Для их учета, а соответственно выполнения условия (3), вводится система контактных сил  $Q_i \{Q_i^+, Q_i^-\}$ , приложенных в двойных узлах [17]. Пары сил  $Q_i^+, Q_i^-$  образуют диполи, составляющие которых равны между собой ( $Q_i^+ = Q_i^-$ ) и противоположны по направлению (рис. 2, в). Диполи  $Q_i$  подлежат определению, причем  $i = 1, \dots, m$ , где  $m$  — число двойных узлов на ПК.

После построения поверхности раздела ПК и представления системы адаптеров в виде состав-

ной конструкции, результатом которого является модификация матриц  $[M_0]$ ,  $[C_0]$ ,  $[K_0]$ , а также добавление к внешним силам  $F$  неизвестных контактных сил в виде системы диполей, уравнения колебаний приобретают вид

$$[M]\ddot{\mathbf{u}} + [C]\dot{\mathbf{u}} + [K]\mathbf{u} = \mathbf{F} + \mathbf{Q}(\mathbf{u}), \quad (4)$$

где  $[K]$ ,  $[M]$ ,  $[C]$  — модифицированные матрицы жесткости, масс и демпфирования.

Уравнения (4) нелинейные, так как распределение диполей  $\mathbf{Q}(\mathbf{u})$  зависит от состояния системы (вектора перемещений  $\mathbf{u}$ ), изменяется во времени и определяется из решения контактной задачи для контактирующих по ПК адаптеров до выполнения условий контакта (3).

Решение начальной задачи расчета колебаний системы адаптеров для уравнений (4) целесообразно выполнять прямым интегрированием с использованием двухслойной неявной конечно-разностной схемы  $\theta$ -метода Вильсона. Схема безусловно устойчива [3] и предпочтительно используется для матричных дифференциальных уравнений второго порядка. В задачах оценки перегрузок при импульсных нагружениях за критериальные параметры принимают ускорения, в связи с чем употребление схемы  $\theta$ -метода Вильсона, которая по ускорениям дает более надежные результаты, целесообразно.

Конечно-разностные соотношения по  $\theta$ -методу Вильсона для момента времени  $t + \theta\Delta t$  ( $\theta = 1.4$ ) представляются в виде

$$[\hat{K}]\mathbf{u}_{t+\theta\Delta t} = \hat{\mathbf{R}}_{t+\theta\Delta t}, \quad (5)$$

где  $[\hat{K}]$  — модифицированная матрица жесткости;  $\mathbf{u}_{t+\theta\Delta t}$ ,  $\hat{\mathbf{R}}_{t+\theta\Delta t}$  — вектор перемещений и модифицированная правая часть уравнений (4) в момент времени  $t + \theta\Delta t$ .

Модифицированный вектор правой части может быть представлен в виде

$$\hat{\mathbf{R}}_{t+\theta\Delta t} = \tilde{\mathbf{R}}_{t+\theta\Delta t} + \mathbf{Q}_{t+\theta\Delta t}, \quad (6)$$

где  $\tilde{\mathbf{R}}_{t+\theta\Delta t}$  соответствует известной части модифицированного вектора правой части;  $\mathbf{Q}_{t+\theta\Delta t}$  — наперед неизвестная часть, которая в момент времени  $t + \theta\Delta t$  должна быть такой, чтобы удовлетворялись условия контакта (3).

Перемещения  $\mathbf{u}_{t+\theta\Delta t}$  можно представить в виде

$$\mathbf{u}_{t+\theta\Delta t} = \tilde{\mathbf{u}}_{t+\theta\Delta t} + \bar{\mathbf{u}}_{t+\theta\Delta t},$$

где  $\tilde{\mathbf{u}}_{t+\theta\Delta t}$  — вектор перемещений, соответствующий известной (вычисленной) части выражения (6),  $\bar{\mathbf{u}}_{t+\theta\Delta t}$  — вектор дополнительных перемещений от контактных сил  $\mathbf{Q}_{t+\theta\Delta t}$ .

Перемещения  $\tilde{\mathbf{u}}_{t+\theta\Delta t}$  определяются при решении системы (5) с известной правой частью, а перемещения  $\bar{\mathbf{u}}_{t+\theta\Delta t}$  — после нахождения  $\mathbf{Q}_{t+\theta\Delta t}$  методом итераций до выполнения условий контактирования (3) в момент времени  $t + \theta\Delta t$ . После определения контактных усилий перемещения  $\bar{\mathbf{u}}_{t+\theta\Delta t}$  могут быть вычислены из выражения

$$\bar{\mathbf{u}}_{t+\theta\Delta t} = [\mathbf{B}]_{\theta\Delta t} \mathbf{Q}_{t+\theta\Delta t},$$

где  $[\mathbf{B}]_{\theta\Delta t}$  — матрица динамических коэффициентов влияния размерностью  $N \times m$  ( $N$  — число переменных в узлах). Элементы строк матрицы  $[\mathbf{B}]_{\theta\Delta t}$  вычисляются предварительно и равны динамическим смещениям в теле за промежуток времени  $\theta\Delta t$  от единичных диполей, приложенных поочередно в каждом из двойных узлов.

Перемещения  $\mathbf{u}_{t+\Delta t}$ , скорости  $\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$  и ускорения  $\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$  в конце шага (момент времени  $t + \Delta t$ ) определяются по конечно-разностным формулам, включающим значения  $\mathbf{u}$ ,  $\dot{\mathbf{u}}$ ,  $\ddot{\mathbf{u}}$  кинематических параметров с предыдущего шага и значения перемещения  $\mathbf{u}_{t+\theta\Delta t}$  [3].

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И ТЕСТОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Конечно-элементная модель составной конструкции системы адаптер РН-адаптер КА (РН-КА) представлена на рис. 1, где показаны составные элементы и система нагружения. Адаптеры контактируют по контактному стыку (привалочная поверхность) и соединяются между собой пиростройствами (четыре пиростройства), причем срабатывание пиростройств происходит не одновременно. Рассматривается фаза разделения, когда срабатывают два пиростройства, которые передают импульс на адаптеры РН и КА (показаны на рис. 1). Оставшиеся пиростройства связывают адаптеры в единую конструкцию. Расположение пиростройств таково, что с достаточной точностью расчетная модель может быть представлена четвертой частью конструкции с постановкой соответствующих условий симметрии. Влияние инерции КА, соединенного со своим адаптером, учтено макетом КА такой



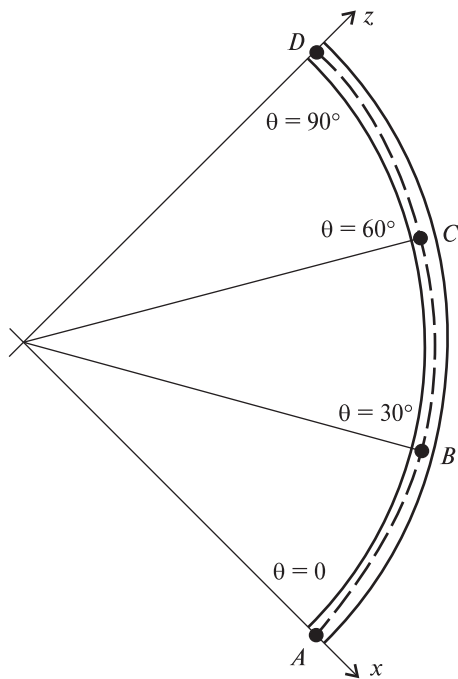


Рис. 3. Область контактирования: A, B, C, D — точки контроля

же массы. Введены закрепления для рассматриваемой конструкции по нижнему фланцу адаптера РН, присоединяемой к РН, масса которого обладает большой инерцией.

Импульсная нагрузка  $Q(t)$  от срабатывания пироприборов, действующая на интервале времени  $[0, T]$  представлялась в виде полусинусоиды

$$Q(t) = Q_0 \sin \pi(t/T) \text{ при } t \leq T,$$

$$Q(t) = 0 \text{ при } t > T,$$

где в основных расчетах принято  $T = 100$  мкс, а амплитуда  $Q_0$  определялась по задаваемой величине импульса. Область контактирования адаптеров представлена четвертью кольца (рис. 3), на которой по средней линии, отмеченной штриховой линией, указаны контрольные точки A, B, C, D, где вычислялись и анализировались кинематические параметры — перемещения, скорости и ускорения как функции времени.

Для оценки точности и сходимости получаемых результатов выполнен ряд численных экспериментов по исследованию влияния величины шага интегрирования, длительности и формы

импульса на кинематические характеристики динамической реакции, в особенности ускорения. Рассматривался изолированный адаптер РН при одновременном срабатывании всех пироприборов. При исследовании влияния формы импульса и длительности его действия величина импульса удерживалась постоянной.

Проведено сопоставление данных расчетов для двух вариантов форм импульса — полусинусоидальным и прямоугольным. На небольшом удалении (2–3 КЭ) от места приложения импульсной нагрузки результаты расчетов мало отличались.

Влияние шага интегрирования на сходимость решения изучалась для значений шага 10, 5 и 2 мкс. Общая тенденция с уменьшением шага сводится к следующему. Фазы достижения заданных значений уменьшаются, т. е. графики ускорений (скоростей и перемещений) для выбранных точек сжимаются по оси времени. Происходит уточнение экстремумов (обычно в сторону увеличения) кинематических величин, появление новых и уточнение имевшихся локальных экстремумов, т. е. проявляются высокочастотные составляющие. В целом сравнение результатов свидетельствует об устойчивости и сходимости вычислений. Например, для шагов интегрирования 10 и 2 мкс максимальные значения ускорений отличались на 5–7 %.

Наибольшее влияние на динамическую реакцию адаптера оказывает длительность импульса, которая является характеристикой процесса передачи усилия при срабатывании пироприбора, достоверность определения которой невелика. В численном эксперименте рассматривались длительности  $T$ , равные 100, 200 и 400 мкс. С увеличением  $T$  значительно уменьшаются экстремальные значения ускорений, динамическая реакция изменяет ударно-волновой характер и приобретает характер колебаний по собственной форме, период колебаний которой коррелирует с длительностью импульса.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Расчеты выполнялись с шагом интегрирования 5 мкс, а общая длительность изменяемого динамического процесса составляла 2 мс (при дли-

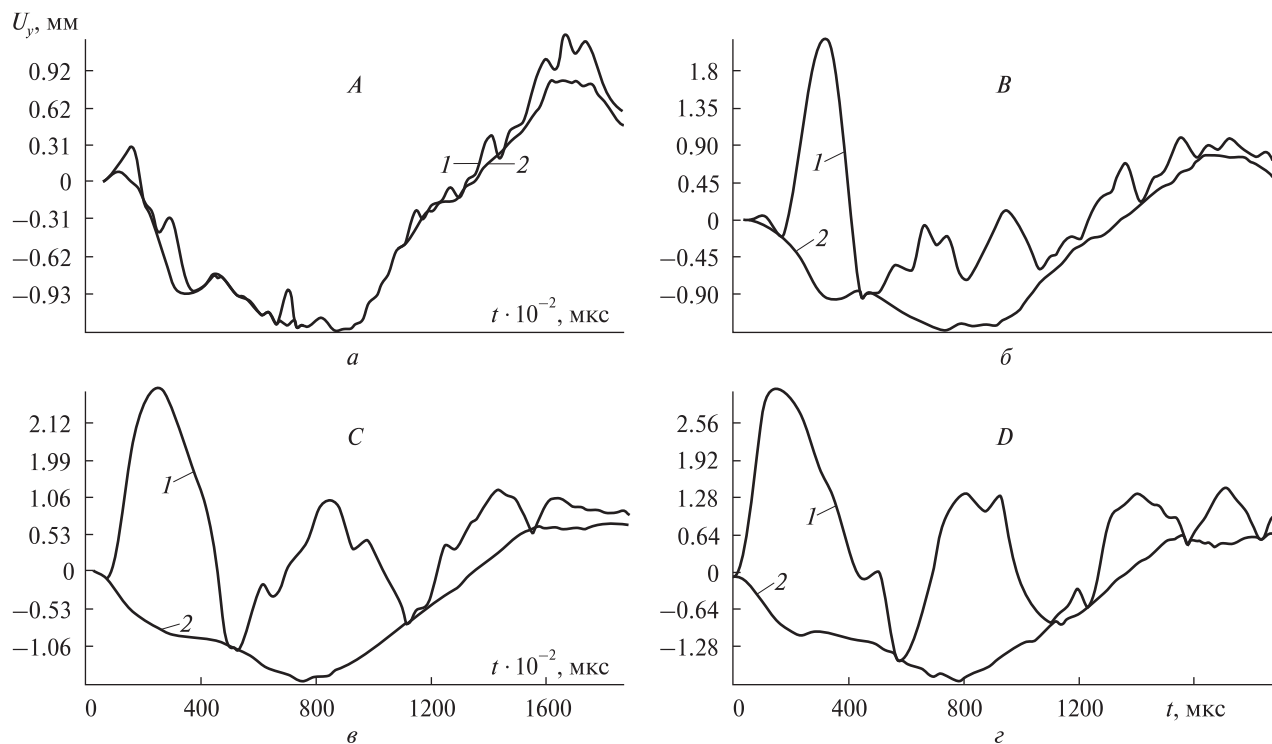


Рис. 4. Перемещения в адаптерах для контрольных точек A, B, C, D: 1 — адаптер РН, 2 — адаптер КА

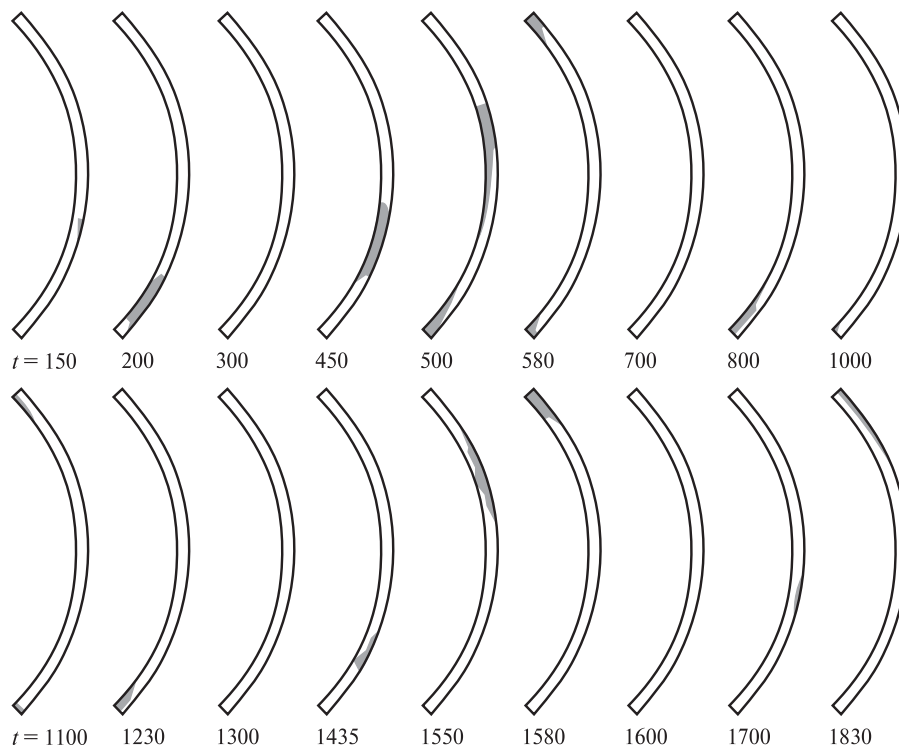


Рис. 5. Изменение зон контакта во времени: серая зона — контакт, белая — отрыв

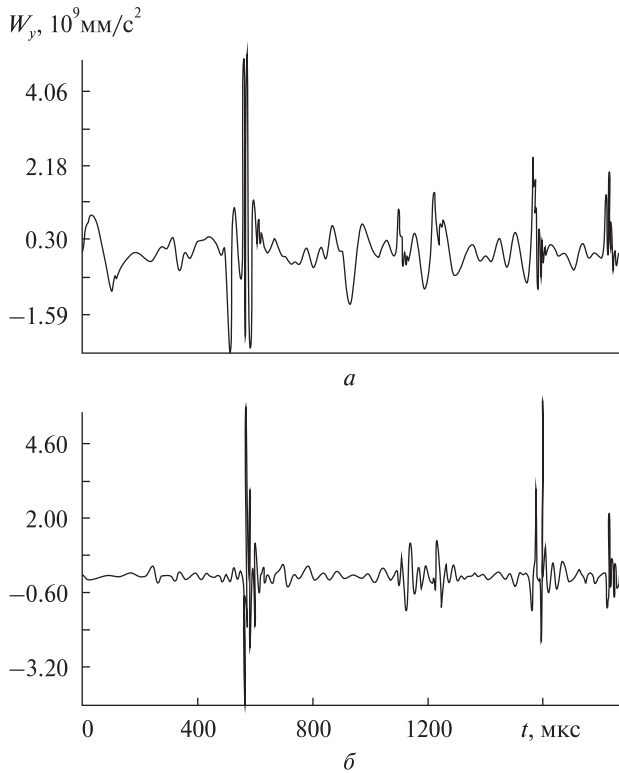


Рис. 6. Ускорение  $W_y$  в точке  $D$ :  $a$  — адаптер РН,  $b$  — адаптер КА

тельности импульса 100 мкс). Предметом исследования являлись условия контактирования, кинематические характеристики во времени и обобщенные характеристики кинематического воздействия — спектры удара.

Перемещение  $U_y$  (по оси адаптеров) для адаптеров РН и КА во времени представлены на рис. 4, которые наглядно показывают процесс контактного взаимодействия адаптеров в контрольных точках. График перемещения  $U_y$  для адаптера РН выше или совпадает с соответствующим графиком для адаптера КА, что соответствует выполнению условий контакта (3). Слияние графиков соответствует контакту адаптеров в контрольных точках, а их несовпадение — отрыву. Контактное взаимодействие в основном занимает короткий промежуток времени (10–30 мкс) и характерно для контрольных точек  $B$ ,  $C$ ,  $D$ , удаленных от несрабатываемого пироприбора (связи), где наименьшие перемещения. При этом возникающие контактные усилия имеют

короткоимпульсный характер, что вызывает резкое изменение дифференциальных кинематических характеристик — скоростей и ускорений. В контрольной точке  $A$  вблизи связи, ограничивающей перемещения, наблюдается длительное контактирование адаптеров (до 300 мкс). При контакте скорости и ускорения адаптеров выравниваются, что соответствует слиянию графиков скоростей и ускорений. Максимальное раскрытие стыка достигается в точке  $D$  (вблизи приложения импульса) в момент времени 200 мкс и составляет около 3.5 мм.

Изменение зон контакта адаптеров по их стыку в различные моменты времени представлены на рис. 5. Зоны контакта расположены дискретно и изменяются вдоль дуговой координаты, а также в поперечном направлении. В отдельные моменты времени контакта между адаптерами нет, и силовое взаимодействие между ними осуществляется через соединение незадействованными пироприборами. Геометрическая картина контактирования в отдельные моменты времени и временные законы изменения перемещений в контрольных точках коррелируют между собой.

В рассматриваемой задаче по оценке перегрузок основной характеристикой являются ускорения, которые обычно фиксируются в экспериментах, и которые чувствительны к силовым факторам, носящим ударно-импульсный характер. В данном случае, помимо короткоимпульсного воздействия от срабатывания пироприборов, действуют короткоимпульсные контактные силы в промежутки времени наступления и прерывания контакта. Графики изменения ускорений в зависимости от времени в контрольной точке  $D$ , где они максимальны, представлены на рис. 6. Можно констатировать, что в моменты контакта возникают высокочастотные всплески ускорений, количество которых соответствует числу соприкосновений адаптеров РН и КА (рис. 6). Величины кратковременных всплесков значительны и почти в пять раз превышают максимальные значения ускорений при отсутствии контакта.

Полученные кинематические характеристики могут рассматриваться как кинематические

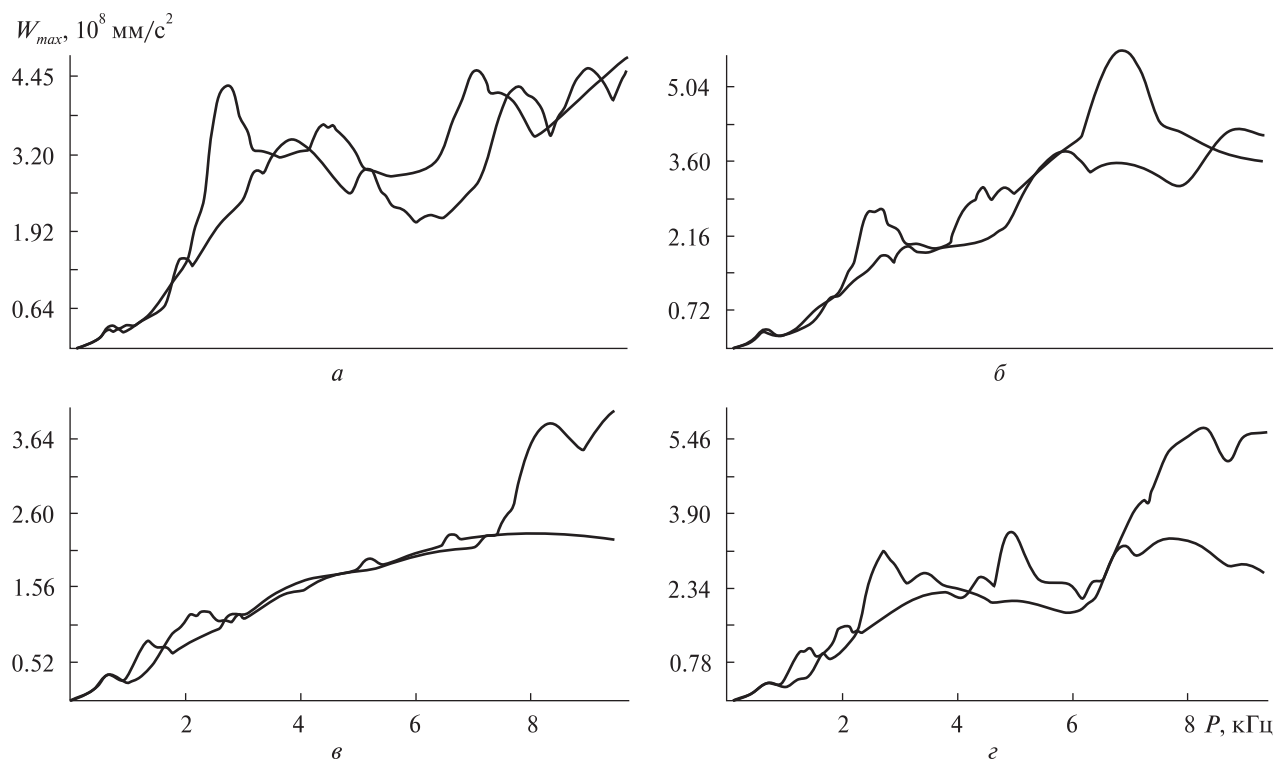


Рис. 7. Спектры отклика (ускорения) для точек *A, B, C, D* адаптера КА

возмущения для объектов, устанавливаемых в КА и чувствительных к перегрузкам. Для оценки перегрузок используются спектры удара [20], которые получены в диапазоне от нуля до  $10^4$  Гц по кинематическим данным для КА в контрольных точках. Графики спектров удара представлены на рис. 7, где для сравнения приведены также результаты для случая отсутствия контакта. Сравнение показывает, что в области малых и средних частот (до 6000 Гц) спектры удара для случаев учета контактирования и его отсутствия отличаются не очень сильно. Пики на графиках примерно одной величины смещены друг по отношению к другу. В области повышенных частот (более 6000 Гц) значения максимальных ускорений в случае контактирования адаптеров, главным образом выше, что объясняется наличием высокочастотных всплесков на исходных акселерограммах в моменты контактирования, что индуцирует повышенные отклики для элементов с высокими собственными частотами.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены модели учета контактного взаимодействия и методика расчета упругой динамической реакции адаптеров от импульсного нагружения при разделении космических конструкций.

Установлено, что зоны контакта между адаптерами переменны во времени и распределены дискретно, причем в отдельные промежутки времени контакт полностью исчезает. Контактные взаимодействия имеют, главным образом, небольшую длительность (10–30 мкс) и имеют характер толчков, сопровождающихся короткоимпульсным воздействием. Это приводит к высокочастотным всплескам ускорений, превышение которых над номинальными значениями достигает пяти раз.

Сравнение спектров удара, полученных по расчетным акселерограммам, показывает, что в случае контакта адаптеров максимальные ускорения в области высоких частот (выше 6 кГц) значительно больше, чем при его отсутствии.



1. Асаёнок А. В., Зайцев Б. Ф., Шульженко Н. Г. Расчет колебаний циклически симметричных конструкций трехмерными конечными элементами // Пробл. машиностроения. — 2000. — 3, № 3–4. — С. 22–28.
2. Асаёнок А. В., Зайцев Б. Ф., Шульженко Н. Г. Методика введения разрезов в схеме метода конечных элементов в задачах статики и собственных колебаний трехмерных конструкций // Пробл. машиностроения. — 2003. — 6, № 3. — С. 58–63.
3. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. — М.: Стройиздат, 1982. — 448 с.
4. Грабилин А. О., Зубренков Б. И., Пустобаев М. В. и др. К вопросу оценки нагрузок на аппаратуру космических аппаратов при воздействии кратковременных ударных импульсов // Вопросы электромеханики. — 2014. — 142. — С. 47–52.
5. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. — М.: Мир, 1989. — 510 с.
6. Кокушкин В. В., Петров Н. К., Борзых С. В. и др. Разработка и моделирование процессов отделения крупногабаритных ракетно-космических блоков // Космич. техника и технологии. — 2013. — № 1. — С. 44–55.
7. Колесников К. С., Кокушкин В. В., Борзых С. В. и др. Расчет и проектирование систем разделения ступеней ракет: Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 376 с.
8. Комаров И. С. Наземная экспериментальная обработка изделий ракетно-космической техники на ударное воздействие от пиротехнических средств разделения // Тр. МАИ. — 2013. — Вып. 71. — 22 с.
9. Люминарский И. Е. Расчет упругих систем с односторонними связями. — М.: Изд-во МГИУ, 2006. — 308 с.
10. Механика контактных взаимодействий / Под ред. И. И. Воровича, В. М. Александрова. — М.: Физматгиз, 2001. — 672 с.
11. Панагитопулос П. Неравенства в механике и их приложения. Выпуклые и невыпуклые функции энергии. — М.: Мир, 1989. — 494 с.
12. Подгорный А. Н., Гонтаровский П. П., Киркач Б. Н. и др. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций. — Киев: Наук. думка, 1989. — 232 с.
13. Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных исследований / Сост. В. В. Ефанов, И. Л. Шевалев; Под ред. В. В. Ефанова, К. М. Пичхадзе: В 2-х т. — М.: Изд-во МАИ, 2012. — Т. 1. — 526 с.
14. Пустобаев М. В. Методика испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов на стойкость к ударным воздействиям от срабатывания пиросредств: Дис. ... канд. техн. наук. — М., 2015. — 145 с.
15. Трякин В. П., Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П. и др. Оценка резонансных режимов колебаний космического аппарата // Космічна наука і технологія. — 2003. — 9, № 4. — С. 40–44.
16. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П. Реакция оболочечных элементов космических аппаратов на импульсное воздействие // Авиационно-космическая техника и технология. — 2013. — № 9 (106). — С. 53–58.
17. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Зайцев Б. Ф. Задачи термпрочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований): Монография. — Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Acad. Publ. GmbH & Co.KG, 2011. — 370 с.
18. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Протасова Т. В. Методика расчета переходных процессов в трехмерных осесимметричных конструкциях при импульсном нагружении // Авиационно-космическая техника и технология. — 2014. — № 8 (115). — С. 148–151.
19. Шульженко Н. Г., Зайцев Б. Ф., Асаенко А. В. Численное моделирование динамической реакции конструкций на импульсное воздействие // Авиационно-космическая техника и технология. — 2014. — № 9 (116). — С. 6–11.
20. ISO 18431-4:2007. Механическая вибрация и удар. Обработка сигналов. Ч. 4. Расчет спектра удара. — Опубликовано 2007-02-01. — 16 с.
21. Wriggers P., Nackenhorst U. Analysis and simulation of contact problems. — Berlin – Heidelberg: Springer, 2006. — 394 p.

Стаття надійшла до редакції 17.12.15

## REFERENCES

1. Aasaenok A. V., Zajitsev B. H., Shulzhenko N. G. Vibrational analysis of cyclically symmetrical constructions using the 3D finite elements method. *Problems in Mechanical Engineering*, 3 (3–4), 22–28 (2000) [in Russian].
2. Aasaenok A. V., Zajitsev B. H., Shulzhenko N. G. Methods of introducing cuts in the scheme of finite element method in problems of statics and natural vibrations of three-dimensional structures. *Problems in Mechanical Engineering*, 6 (3), P. 58–63 (2003) [in Russian].
3. Bathe K.-J., Wilson E.L. Numerical methods in finite element analysis, Transl. from Eng., 448 p. (Strojizdat, Moscow, 1982) [in Russian].
4. Grabilin A. O., Zubrenkov B. I., Pustobaev M. V., et al. Evaluation of loads on the SC (space craft) equipment by effect of shot shock pulses. *Voprosy jelectromehaniki*, 142, 47–52 (2014) [in Russian].
5. Johnson K. L. Contact mechanics, Transl. from Eng., 510 p. (Mir, Moscow, 1989) [in Russian].
6. Kokushkin V. V., Petrov N. K., Borzykh S. V., Yaskov V. V. Development and simulation of large space rocket stages separation processes. *Space Technique and Technology*, No.1, 44–55 (2013) [in Russian].

7. Kolesnikov K. S., Kokushkin V. V., Borzyh S. V. et al. Calculation and design of separation systems, rocket stages: Textbook, 376 p. (N.E. Bauman MSTU, Moscow, 2006) [in Russian].
  8. Komarov I. S. Surface treatment of the experimental rocket and space technology on the impact force of the pyrotechnic separation means. Trudy MAI, Is. 71, 22 p. (2013) [in Russian].
  9. Ljuminarskij I. E. Calculation of elastic systems with unilateral constraints, 308 p. (MSIU, Moscow, 2006) [in Russian].
  10. Contact Mechanics, Ed.by I. I. Vorovich, V. M. Alexandrov, 672 p. (Fizmatlit, Moscow, 2001) [in Russian].
  11. Panagiotopoulos P. D. Inequality Problems in Mechanics and Applications. Convex and Nonconvex Energy Functions, Transl. from Eng., 494 p. (Mir, Moscow, 1989) [in Russian].
  12. Podgornyj A. N., Gontarovskij P. P., Kirkach B. N. i dr. Tasks of contact interaction of structural elements, 232 p. (Nauk. dumka, Kiev, 1989) [in Russian].
  13. Design of unmanned spacecraft for fundamental research, Comp. by V. V. Efanov, I. L. Shevalev; Ed. by V. V. Efanov, K. M. Pichhadze, Vol. 1, 526 p. (Izd-vo MAI, Moscow, 2012) (Vols. 1-2; Vol. 1) [in Russian].
  14. Pustobaev M. V. Methods of testing onboard equipment of space vehicles for resistance to shock impacts on the operation of Unified pyrotechnic device. Doctor's thesis. 145 p. (Moscow, 2015) [in Russian].
  15. Triakin V. P., Shulzhenko N. G., Gontarovskii P. P., Matiukhin Yu. I. Estimating the resonance oscillation regimes in space vehicles. Kosm. nauka tehnol, 9 (4), 40—44 (2003) [in Russian].
  16. Shulzhenko N. G., Gontarovskiy P. P., Zajtsev B. H. Problems in thermal strength, vibration diagnostics and service life of power machinery (models, methods, investigation results): monograph, 370 p. (LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, Saarbrücken, Germany, 2011) [in Russian].
  17. Shulzhenko N. G., Gontarowsky P. P. Reaction of shell elements of space vehicles on the impulse action. *Aerospace technic and technology*, No. 9 (106), 53—58 (2013) [in Russian].
  18. Shulzhenko N. G., Gontarovskiy P. P., Protasova T. V. Calculation method for transient process in 3D axisymmetric constructions under impulse loading. *Aerospace technic and technology*, No. 8 (115), 148—151 (2014) [in Russian].
  19. Shulzhenko N. G., Zajtsev B. P., Asajenok A. V. Numerical simulation of dynamic response of structure under impulse impact. *Aerospace technic and technology*, No. 9 (116), 6—11 (2014) [in Russian].
  20. ISO 18431-4:2007. Mechanical vibration and shock. Signal processing. Part 4: Shock-response spectrum analysis, published 2007-02-01, 16 p. (2007) [in Russian].
  21. Wriggers P., Nackenhorst U. Analysis and simulation of contact problems, 394 p. (Springer, Berlin; Heidelberg, 2006)
- М. Г. Шульженко*<sup>1</sup>, *Б. П. Зайцев*<sup>1</sup>, *О. В. Асайонок*<sup>1</sup>,  
*Д. В. Клименко*<sup>2</sup>, *Т. Я. Батутина*<sup>2</sup>, *Б. В. Бурчаков*<sup>2</sup>
- <sup>1</sup> Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, Харків  
<sup>2</sup> Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ
- ДИНАМІЧНА КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ АДАПТЕРІВ КОСМІЧНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРИ РОЗДІЛЕННІ**
- Моделюється динамічний процес в системі адаптерів ракети-носія та космічного апарата, що викликаний ударно-імпульсною дією внаслідок спрацювання піропристроїв під час розділення. Застосовуються тривимірні моделі МСЕ та вводиться за спеціальною методикою поверхня розділення адаптерів, на якій моделюється одnobічний контакт. Наводяться результати дослідження кінематичних характеристик адаптерів за часом та визначаються спектри удару.
- Ключові слова:** космічна конструкція, адаптер, розділення, динаміка, контакт, скінченний елемент, акселерограма, спектр удару.
- N. G. Shulzhenko, B. F. Zaytsev, A. V. Asaenok, D. V. Klimenko, T. Ya. Batutina, B. V. Burchakov*
- <sup>1</sup> A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv  
<sup>2</sup> Yangel Yuzhnoye State Design Office, Dnipropetrovsk
- DYNAMIC IMPACT INTERACTION OF SPACE CONSTRUCTION'S ADAPTERS DURING SEPARATION**
- We model dynamic process in the system of adapters of a launch vehicle and spacecraft, caused by the impulse effect of activation of electroexplosive devices during separation stage. We used three-dimensional "finite element method" models and a special method to account for a surface of adapter separation, needed to model the unilateral contact. Time modeling is done using finite difference Wilson  $\theta$ -method. We also show the obtained results of adapters' kinematic characteristics and the impact spectra.
- Key words:** space design, adapter, separation, dynamics, contact, finite element, accelerograms, range strike.