

УДК 539.3:629.7

- Зайцев Б. Ф.** доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела вибрационных и термочувствительных исследований, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, Украина, e-mail: b.zajtsev@gmail.com, +38057-3494743;
- Асаенок А. В.** кандидат технических наук, научный сотрудник отдела вибрационных и термочувствительных исследований, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, Украина, e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua, +38-057-3494755;
- Протасова Т. В.** кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела вибрационных и термочувствительных исследований, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина, e-mail: tatyprotasova@gmail.com, +38-057-3494755;
- Клименко Д. В.** кандидат технических наук, начальник отдела нагрузок и прочности, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепр, Украина, e-mail: KlymenkoDV@kbu.net, +38-0562-38-47-74;
- Акимов Д. В.** начальник сектора отдела нагрузок и прочности, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепр, Украина, e-mail: AkimovDV@kbu.net, +38-0562-38-47-74;
- Сиренко В. Н.** заместитель главного конструктора по системному проектированию ракет и ракетных комплексов - начальник расчетно-теоретического комплекса по проектированию и расчетам в части баллистики, аэродинамики, теплообмена, прочности, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепр, Украина, e-mail: sirenko@gmail.com

## ДИНАМИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОМПОЗИТНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ ПРИ ОТДЕЛЕНИИ ОТ РАКЕТЫ

*Построена расчетная модель определения НДС обтекателя составной конструкции с металлическими и композитными элементами при наборе скорости под действием импульсной нагрузки от пиротехнической системы отделения. Использованы МКЭ в трехмерной постановке для среды с криволинейной анизотропией и безусловно устойчивые конечно-разностные схемы решения начальной задачи. Численно рассмотрено влияние на НДС обтекателя аэродинамического сопротивления, учета анизотропии свойств стеклопластиковой обечайки и дана оценка прочности металлических и композитных элементов.*

**Ключевые слова:** обтекатель, ракета, композит, отделение, криволинейная анизотропия, импульсное нагружение, динамическая прочность.

### Введение

При отделении обтекателей выдвигается ряд требований, обусловленных необходимостью безопасного увода обтекателя или его компонентов с траектории движения ракеты. Их выполнение обусловлено реализацией кинематики отделяемых элементов с учетом аэродинамического воздействия, а также обеспечения цельности конструкций при отделении, определяемой выполнением условий прочности.

Применяемая система отделения для рассматриваемого в работе обтекателя относится к классу пиромеханических систем. Ее функционирование предполагает наращивание дополнительной по отношению к ракете скорости обтекателя за счет импульса от срабатывания пиротехнической системы отделения, конструктивно связанной с обтекателем [1]. При

ускорении обтекателя развиваются значительные динамические нагрузки, вызывающие нестационарные колебания и динамические напряжения, оценка которых необходима при проектировании.

Как правило, в конструкциях обтекателей, помимо композитных тонкостенных элементов, представлены и другие элементы в виде подкреплений или соединений. В связи с этим при расчетном проектировании целесообразно применение общих, трехмерных моделей, построенных на моделях среды с криволинейной анизотропией.

В расчетах прочности обтекателей в основном применяются модели квазистатического состояния без учета динамики процессов отделения [2, 3]. Исследованию динамических процессов деформирования при отделении

посвящены работы [1, 4, 5] для обтекателей, а в сходных задачах для адаптеров космических аппаратов и ракет-носителей – [6, 7].

**Расчетная модель и особенности методики расчета**

Обтекатель с элементами пиротехнической системы отделения представляет собой составную конструкцию, расчетная схема которой показана на рис. 1. В конструкции представлены металлические элементы – цилиндр, фланец и накладка, относящиеся к пиротехнической системе отделения. Элемент в виде накладки явно в исходной конструкции не представлен, а введен для связи стеклопластиковой обечайки с цилиндром взамен болтового соединения. Заполнитель, выполненный из материала ДСВ-2, не являясь силовым элементом, частично воспринимает действующую нагрузку, выполняя функцию поддерживающего основания. Теплозащитный слой не является несущим элементом и представлен в модели практически только массовыми характеристиками (поверхностная плотность 7,3 кг/м<sup>2</sup>).

Конструкция обтекателя близка к осесимметричной, если не учитывать наличие сопла, влияние которого имеет местный характер. В связи с этим, в модели представлена четвертая часть и введены условия симметрии по перемещениям.

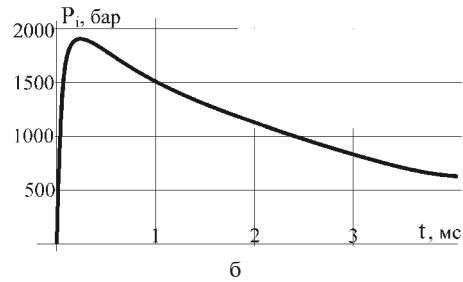
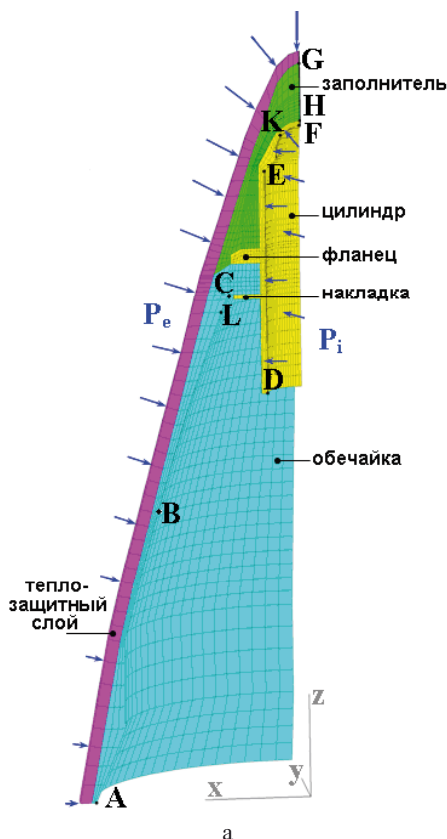


Рис. 1. Расчетная модель (а) и закон изменения давления P<sub>i</sub> (б)

Нагружение на обтекатель состоит из внутреннего P<sub>i</sub> и наружного P<sub>e</sub> давлений, вызванных в первом случае газами при сгорании пороховой навески, а во втором – аэродинамическим сопротивлением при движении. Давления известны и задаются таблично. График изменения давления P<sub>i</sub> в зависимости от времени приведен на рис. 1, б. Одной из особенностей задачи является свободное движение конструкции обтекателя под действием высокого внутреннего давления до достижения скорости, необходимой для срабатывания пиротехнической системы отделения обтекателя. Таким образом, в модели конструкции обтекателя отсутствуют осевые закрепления. На схеме показано расположение контрольных точек в цилиндре и обечайке, для которых приводятся результаты расчетов.

Методика расчета динамического НДС и движения обтекателя базируется на применении МКЭ в трехмерной постановке, где используется объемный полилинейный конечный элемент с топологически регулярной системой дискретизации. При моделировании материала конструктивных элементов допускается непрерывная неоднородность или кусочная однородность и наличие криволинейной анизотропии, что позволяет рассчитывать составные и комpositные конструкции.

Применение процедуры МКЭ, основанной на использовании кинестатического вариационного принципа Лагранжа – Даламбера, приводит к математической модели, представленной системой обыкновенных дифференциальных уравнений [8]:

$$[M]\ddot{u} + [D]\dot{u} + [K]u = F, \quad (1)$$

где u – вектор перемещения узлов конечно-элементной сетки; F – вектор заданной нагрузки (P<sub>i</sub> и P<sub>e</sub>), изменяющейся во времени; [M], [D], [K] – соответственно матрицы масс, демпфирования и жесткости.

Отметим, что в динамических задачах с импульсным воздействием, где исследуется процесс на относительно коротком промежутке времени влияние демпфирования незначитель-

но. Кроме этого, показатели демпфирования, как правило, неизвестны или определяются с небольшой точностью. Потому влияние демпфирования не учитывается ( $[D]=0$ ).

Уравнение (1) отражают движение точек тела при его перемещении как твердого тела, а также при взаимных смещениях, то есть колебаниях, сопровождающихся деформациями. Вектор перемещений  $u$ , и, соответственно, сами уравнения относятся, обычно, к декартовой системе координат, которая является единой для всех конечных элементов, то есть глобальной системой координат. Особенностью данной задачи является наличие в конструкции обтекателя анизотропных элементов, которые удобно моделировать в системе локальных координат

$x', y', z'$ , в соответствии с главными осями анизотропии (рис. 2). При этом направление осей от элемента к элементу меняется. То есть, имеет место случай криволинейной анизотропии, который вносит сложности при определении и использовании матрицы жесткости. Необходимо вычислять матрицу жесткости в удобной локальной системе координат, но пользоваться ею в уравнениях общего вида (1), записанных в глобальной декартовой системе координат.

В локальной системе координат  $x', y', z'$  по определению может быть записано соотношение:

$$[K']u' = F', \quad (2)$$

где  $[K']$  – матрица жесткости;  $u'$  – вектор узловых перемещений;  $F'$  – вектор узловых сил в локальных координатах.

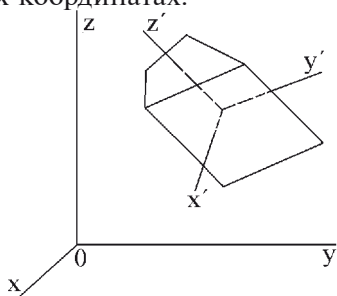


Рис. 2. Конструктивный элемент в локальной системе координат, связанной с главными осями анизотропии

Узловые перемещения и силы в локальной и глобальной системах координат связаны соотношением:

$$u' = [T]u, \quad F' = [T]F, \quad (3)$$

где  $[T]$  – матрица преобразования векторов из глобальной в локальную систему координат (матрица косинусов).

Внесем преобразования (3) в соотношение (2) и получим:

$$[K'] [T] u = [T] F, \quad (4)$$

а далее слева соотношение (4) умножим на матрицу  $[T]^{-1}$ , обратную к  $[T]$ , что приводит к следующему:

$$[T]^{-1} [K'] [T] u = [T]^{-1} [T] F. \quad (5)$$

Учитывая, что  $[T]^{-1} [T] = I$ , где  $I$  – единичная матрица, а матрица перехода  $[T]$  является ортогональной и соответственно  $[T]^{-1} = [T]^T$ , получим в окончательном виде:

$$[T]^T [K'] [T] u = F. \quad (6)$$

Соотношение (6) является зависимостью между векторами узловых перемещений и сил в глобальной системе координат, а матричное выражение в левой части составляет матрицу жесткости в глобальной системе координат:

$$[K] = [T]^T [K'] [T]. \quad (7)$$

Соотношение (7) позволяет использовать матрицы жесткости, полученные в локальных осях, которые относятся к главным осям анизотропии, для формирования основной системы уравнений (1).

Решение матричного уравнения (1) осуществляется по неявным конечно-разностными схемам Ньюмарка и Вильсона [8], которые являются безусловно устойчивыми второго порядка точности. Согласно этим схемам ускорение на шаге по времени  $\Delta t$  является линейной функцией, а уравнения (1) в схеме Ньюмарка записываются для момента времени  $t + \Delta t$ , а в схеме Вильсона – для момента времени  $t + \theta \Delta t$  ( $\theta = 1,4$ ). При этом нет ограничений на выбор шага  $\Delta t$ , который определяется в основном требованием точности и эффективности вычислений.

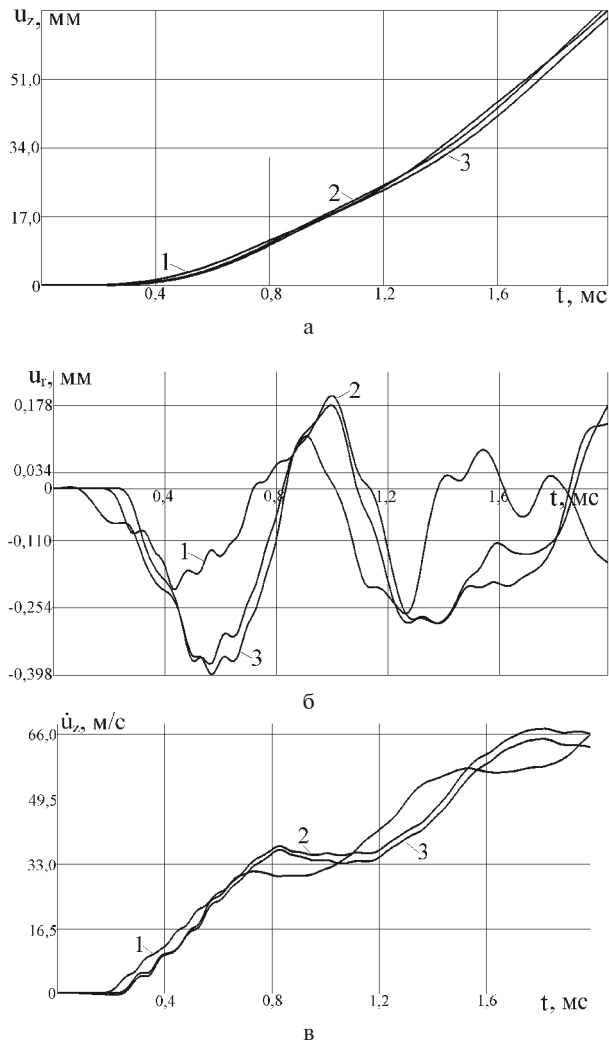
В задачах оценки перегрузок при импульсных нагружениях, где за критериальные параметры принимают ускорения, или при соударениях конструкций, где важно более точное определение скоростей, употребление схемы -метода Вильсона предпочтительнее.

### Результаты расчетных исследований

Расчетные исследования проводились для основного варианта с анизотропными характеристиками материала обечайки (стеклопластик) с учетом и без учета действия внешнего аэродинамического давления, а также, для сравнения, для варианта обечайки из изотропного материала с осредненными характеристиками. Характеристики для анизотропного материала, соответствующие механическим свойствам стеклопластика обечайки (по основе и утку), были приняты следующие:  $E_t = 18,3$  ГПа;  $E_\theta = E_n = 16,0$  ГПа;  $\nu_t = 0,15$ ;  $\nu_\theta = \nu_n = 0,1$ ;  $G_{t\theta} = G_{\theta n} = G_{tn} = 1,83$  ГПа. За осредненные характеристики приняты величины:  $E_t = E_\theta = E_n = 18,3$  ГПа;  $\nu_t = \nu_\theta = \nu_n = 0,3$ , где индексы  $t, \theta, n$  относятся соответственно

к меридиональному, окружному, нормальному направлениям в обечайке. Результаты расчетных исследований представляются в контрольных точках, расположение которых в обечайке и цилиндре показано на рис. 1, а.

Кинематические величины – осевые и радиальные перемещения, осевые скорости в точке А на краю обечайки приведены на рис. 3, где обозначено: 1 – изотропная обечайка; 2 – анизотропная обечайка без учета  $P_e$ ; 3 – анизотропная обечайка с учетом  $P_e$ .

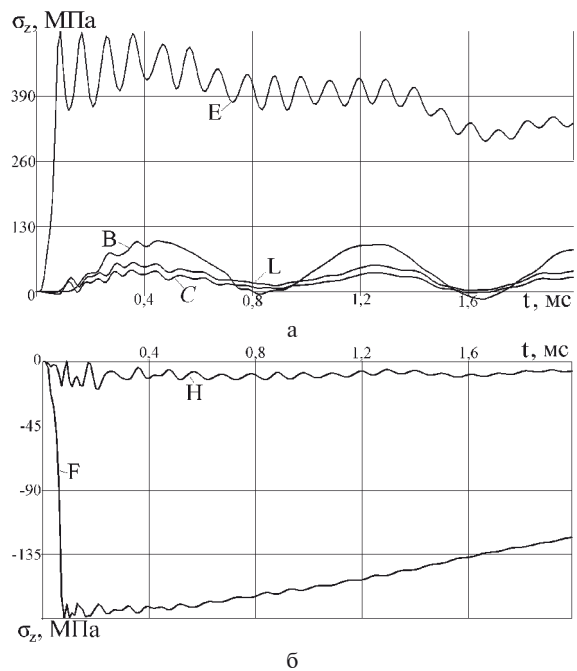


**Рис. 3.** Кинематические параметры в точке А обечайки:  
а – осевое перемещение;  
б – радиальное перемещение; в – осевая скорость

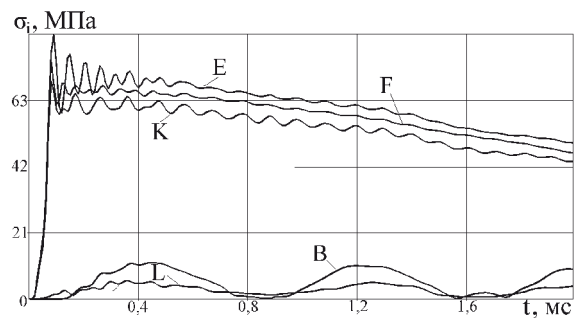
Закон изменения осевого перемещения (близкий к параболическому) и осевой скорости (близкий к линейному) отражает комбинацию движений, вызванных действием импульса давления  $P_i$ . Суммарное движение складывается из поступательного перемещения всей конструкции как твердого тела под действием силы, которая во времени после достижения

максимального значения плавно уменьшается (абсолютное движение), и колебательных процессов, связанных с деформированием (относительное движение), где проявляется динамический эффект. Наблюдается запаздывание реакции НДС в точке А на краю обечайки на действие импульсной нагрузки  $P_i$ , что связано с волновым характером распространения возмущения.

Данные расчета напряжений для обтекателя с упругими характеристиками анизотропного материала представлены на рис. 4–6, где приведены результаты для стального цилиндра и стеклопластиковой обечайки. Расчетные данные осевого напряжения в точках Е, Н цилиндра (рис. 4, б) соответствуют с достаточной точностью граничным значениям давления  $P_i$ , что является критерием достижения необходимой точности решения всей задачи. Значения напряжений в стальном цилиндре (точки Е, F, К) весьма умеренные и далеки от предельных значений ( $\sigma_T=1300$  МПа,  $\sigma_B=1600$  МПа).



**Рис. 4.** Осевые напряжения в контрольных точках



**Рис. 5.** Интенсивность напряжений в контрольных точках

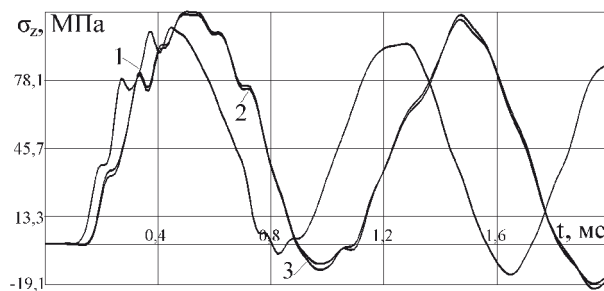


Рис. 6. Осевые напряжения в точке В(обечайка)

Сравнение расчетных данных для разных вариантов показывает, что учет внешнего аэродинамического сопротивления незначительно отражается на значениях определяемых кинематических и силовых характеристик. Анизотропия свойств в большей степени отражается на радиальных перемещениях и напряжениях в обечайке. Величина максимальных напряжений растяжения в стеклопластиковой обечайке (около 110 МПа) значительно меньше разрушающих напряжений (480 и 220 МПа соответственно по основе и утку), а максимальные значения касательных напряжений (скалывания, межслойного сдвига)  $\tau_{in}=4,5$  МПа, что также не превышает предел прочности на скалывание (13 МПа).

### Заключение

Разработанное методико-программное обеспечение, основанное на трехмерном конечно-элементном моделировании динамики конструкций с криволинейной анизотропией свойств, применено для построения расчетной модели композитного обтекателя, свободного от закреплений. В модели отражены основные металлические и композитные элементы составной конструкции обтекателя.

Результаты расчетных исследований динамического НДС отражают комбинирование движения обтекателя как твердого тела и колебаний, связанных с деформированием. Влияние аэродинамического сопротивления незначительное, а учет анизотропии свойств в большей степени отражается на НДС стеклопластиковой обечайки. Для исследованной конструкции обтекателя интенсивность напряжений для металлических элементов, растягивающие напряжения и напряжения скалывания для стеклопластиковой обечайки значительно ниже предельных.

### Литература

1. Шульженко Н.Г. Динамика элементов системы отделения обтекателя ракеты [Текст] / Н.Г. Шульженко, Б.Ф. Зайцев, А.В. Асаенко, Т.В. Протасова, Д.В. Клименко, И.Ф. Ларионов, Д.В. Акимов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2017 – 9/144. – С.5-13.
2. Моссаковский В.И. Прочность ракетных конструкций [Текст]: учеб. пособие / В.И. Моссаковский, А.Г. Макаренко, П.И. Никитин, Ю.И. Саввин; под ред. В.И. Моссаковского. – М.: Высш. школа, 1990. – 359 с.
3. Колесников К.С. Расчет и проектирование систем разделения ступеней ракет [Текст]: учеб. пособие / К.С. Колесников, В.В. Кокушкин, С.В. Борзых, Н.В. Панкова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 376 с.
4. Конюхов А.С. Определение жесткостных и инерционно-массовых характеристик ортотропной гладкооболочечной модели биконической секции створки головного обтекателя [Текст] / А.С. Конюхов // *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія машинобудування. – 2014. – №2 (71). – С. 39–46.
5. Цибенко А.С. Розробка адекватної математичної моделі дослідження динаміки ступок головного обтічника ракети-носія у процесі польоту і відділення [Текст] / А.С. Цибенко, Н.Г. Кришук, А.С. Конюхов, В.П. Коваль, А.В. Аксьоненко, А.В. Трубін // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2006. – №6. – С. 139–148.
6. Шульженко Н.Г. Динамическое контактное взаимодействие адаптеров космической конструкции при разделении [Текст] / Н.Г. Шульженко, Б.Ф. Зайцев, А.В. Асаенко, Д.В. Клименко, Т.Я. Батутина, Б.В. Бурчаков // *Космічна наука і технологія*. – 2016. – Т. 22, №2. – С. 12-21.
7. Шульженко М.Г. Оцінка динамічної реакції вузлів системи розділення космічного апарата та носія при імпульсних навантаженнях [Текст] / М.Г. Шульженко, Б.П. Зайцев, П.П. Гонтаровський, Т.В. Протасова, Т.Я. Батутина, І.В. Шеремет // *Космічна наука і технологія*, 2015. – Т. 21, № 1. – С. 15–19.
8. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов [Текст] / К. Бате, Е. Вильсон. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.

Поступила в редакцию 01.08.2018

**Б.П. Зайцев, О.В. Асайонок, Т.В. Протасова, Д.В. Клименко, Д.В. Акімов, В.Н. Сіренко. Динамічний напружено-деформований стан композитного обтічника при відділенні від ракети**

*Побудовано розрахункову модель визначення НДС обтічника складеної конструкції з металевими й композитними елементами при наборі швидкості під дією імпульсного навантаження від піротехнічної системи відділення. Використано МСЕ в тривимірній постановці для середовища з криволінійною анізотропією та безумовно стійкі скінченно-різницею схеми розв'язання початкової задачі. Чисельно розглянуто вплив на НДС обтічника аеродинамічного опору, врахування анізотропії властивостей склопластикової обичайки та дано оцінку міцності металевих й композитних елементів.*

**Ключові слова:** обтічник, ракета, композит, відділення, криволінійна анізотропія, імпульсне навантаження, динамічна міцність.

**B.F. Zajtsev, A.V. Asaenok, T.V. Protasova, D.V. Klimenko, D.V. Akimov, V. N. Sirenko. Dynamic stressed-deformed state of a composite dome when separating from a rocket**

*In this paper, we present a calculated model and the results of computational investigation of the dynamic stressed-deformed state and the motion of the assembled dome during acceleration.*

*A methodical-software based on three-dimensional finite element modeling of the dynamics of structures with curvilinear anisotropy of properties was developed. Unconditionally stable finite-difference schemes for solving the initial problem are used.*

*A computational model for determining the stressed-deformed state of the dome of a composite structure with a metal (cylinder, flange, lining) and composite (shell, filler, heat-insulating layer) elements is provided for acceleration under the action of an impulsive load from the pyrotechnic separation system.*

*The influence of aerodynamic resistance and taking into account the properties anisotropy of the fiberglass shell on the dome stressed-deformed state are considered numerically. The strength of metallic and composite elements is estimated. A problem specific is the absence of fixations, i.e. the dome moves freely along its axis (as a solid), while in it, due to impulse excitation, vibrations occur accompanied by deformation. The results of computational investigations reflect the combination of the motion of the dome as a solid and vibrations associated with deformation.*

*Calculation investigations were carried out for two shell variants: in one case, the shell was considered as a structural element of an isotropic material with averaged characteristics, and in the other case an anisotropic material with characteristics obtained on the basis of data for fiberglass. It is shown that taking into account the anisotropy of properties is more reflected in the stressed-deformed state of the fiberglass shell. The variants were considered separately with and without taking into account the effect of external aerodynamic pressure. It is shown that the effect of aerodynamic drag is insignificant. For the design of the dome, the stress intensity for metal elements, tensile stresses and shear stresses for a fiberglass shell are much lower than the limiting ones.*

**Key words:** dome, rocket, composite, separation, curvilinear anisotropy, impulse loading, dynamic strength.

## References

1. Shul'zhenko N.G., Zajtsev, B.F., Asaenok A.V., Protasova T.V., Klimenko D.V., Larionov I.F., Akimov D.V. Dinamika elementov sistemy otdeleniya obtekatelya rakety [Dynamics of components of the rocket cone separation system]. Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aerospace engineering and technology, 2017, no. 9/144, pp. 5–13.
2. Mossakovskii V.I., Makarenkov A.G., Nikitin P.I. i dr. Prochnost' raketnykh konstruksii: uchebnoe posobie pod red. Mossakovskogo V.I.

[Strength of missile structures: a training manual] — Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 359 p.

3. Kolesnikov K.S., Kokushkin V.V., Borzykh S.V., Pankova N.V. Raschet i proektirovanie sistem razdeleniya stupenei raket uchebnoe posobie [Calculation and design of systems for separation of stages of rockets] — Moscow, MG TU im. N.E. Baumana Publ., 2006. 376 p.

4. Konyukhov A.S. Opredelenie zhestkostnykh i inertsiionno-massovykh kharakteristik ortotropnoi gladkoobolochecnoi modeli bikonicheskoi sektsii stvorki golovnoogo obtekatelya [Determination of stiffness and inertial mass characteristics of an

orthotropic smooth-shell model of the biconic section of the head cowl wing]. *Visnyk NTUU «KPI». Seriya mashynobuduvannya – Bulletin of the NTUU “KPI”. Serya Machine-Building*, 2014, no. 2 (71), pp. 39–46.

5. Tsybenko A.S., Kryshchuk N.H., Konyukhov A.S., Koval' V.P., Aks'onenko A.V., Trubin, A.V. Rozrobka adekvatnoyi matematychnoyi modeli doslidzhennya dynamiky stulok holovnoho obtichnyka rakety-nosiya u protsesi pol'otu i vid-dilennya [Development of adequate mathematical models to study the dynamics of the main wings fairing launch vehicle during flight and separation]. *Naukovi visti NTUU «KPI» – Science news NTU “KPI”*, 2006, no. 6, pp. 139–148.

6. Shul'zhenko N.G., Zajcev B.F., Asaenok A.V., Klimenko D.V., Batutina T.Ja., Burchakov B.V. Dinamicheskoe kontaktnoe vzaimodejstvie adapterov

kosmicheskoy konstrukcii pri razdelenii [Dynamic contact interaction of space structure adapters during separation]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiya – Space science and technology*, 2016, vol. 22, no. 2, pp 12–21.

7. Shul'zhenko M.H., Zaytsev B.P., Hontarov'skyi P.P., Protasova T.V., Batutina T.Ya., Sheremet, I.V. Otsinka dynamichnoyi reaktsiyi vuzliv systemy rozdilennya kosmichnoho aparata ta nosiya pry impul'snykh navantazhennyakh [Evaluation of dynamic response system units separating the spacecraft and the carrier with impulse loads]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiya – Space science and technology*, 2015, vol. 21, no. 1, pp. 15–19.

8. Bate K. Vil'son, E. Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov [Numerical analysis methods and finite element method] – Moscow: