

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ЖИДКОСТЬЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА

При исследовании пространственных колебаний ракеты-носителя (РН), как правило, топливные баки РН рассматриваются как сложные оболочечные конструкции с жидкостью. Математическое моделирование пространственных колебаний оболочечных конструкций с жидкостью позволяет определить напряженно-деформированное состояние конструкции, характеристики собственных колебаний оболочечных конструкций с жидкостью, проводить оценки динамических нагрузок на конструкцию. Предложен подход к математическому моделированию пространственных колебаний оболочечных конструкций с жидкостью с использованием метода конечных элементов и средств компьютерного проектирования и анализа - CAD/CAE-систем. Разработано методическое обеспечение для решения различных задач динамики объектов ракетно-космической техники, имеющих сложную пространственную конфигурацию: расчета динамических характеристик конструкции корпуса РН в задаче о продольной устойчивости жидкостной РН, определения параметров продольных колебаний и динамических нагрузок на конструкцию верхней ступени, определения параметров колебаний свободной поверхности жидкого топлива при оценке работоспособности средств обеспечения сплошности компонентов топлива в баках верхних ступеней. С использованием предложенного подхода проведено математическое моделирование колебаний корпуса трехступенчатой РН, обусловленных колебаниями тяги жидкостной ракетной двигательной установки. Определены параметры пространственных колебаний перспективной верхней ступени РН во время работы маршевой жидкостной ракетной двигательной установки (ЖРДУ) первой ступени РН. Проведено математическое моделирование вынужденных колебаний конструкции верхней ступени РН и свободной поверхности жидкого топлива для оценки работоспособности средств обеспечения сплошности компонентов топлива в баках верхней ступени на участке работы ее маршевого двигателя. Предложенный подход может быть использован при разработке методического обеспечения для решения указанных задач динамики полета жидкостных РН различного назначения.

При дослідженні просторових коливань ракети-носія (РН), зазвичай, паливні баки РН розглядаються як складні оболонкові конструкції з рідиною. Математичне моделювання просторових коливань оболонкових конструкцій з рідиною дозволяє визначити напружено-деформований стан конструкції, характеристики власних коливань оболонкових конструкцій з рідиною, проводити оцінки динамічних навантажень на конструкцію. Запропоновано підхід до математичного моделювання просторових коливань оболонкових конструкцій з рідиною з використанням методу скінчених елементів та засобів комп'ютерного проектування та аналізу - CAD/CAE-систем. Розроблено методичне забезпечення для вирішення різних задач динаміки об'єктів ракетно-космічної техніки, що мають складну просторову конфігурацію: розрахунок динамічних характеристик конструкції корпусу РН в задачі про поздовжню стійкість рідинної РН, визначення параметрів поздовжніх коливань та динамічних навантажень на конструкцію верхнього ступеню, визначення параметрів коливань вільної поверхні рідкого палива при оцінці працездатності засобів забезпечення суцільності компонентів палива в баках верхніх ступенів. З використанням запропонованого підходу проведено математичне моделювання просторових коливань корпусу трьохступеневої РН, обумовлених коливаннями тяги рідинної ракетної двигунної установки. Визначені параметри просторових коливань перспективного верхнього ступеню РН під час роботи маршевої рідинної ракетної двигунної установки першого ступеню РН. Проведено математичне моделювання вимушених коливань конструкції верхнього ступеню РН та вільної поверхні рідкого палива для оцінки працездатності засобів забезпечення суцільності компонентів палива в баках верхнього ступеня на ділянці роботи маршевого двигуна ступеня. Запропонований підхід може бути використаний при розробці методичного забезпечення для вирішення вказаних задач динаміки польоту рідинних РН різного призначення.

In the study of 3-D oscillations of a launch vehicle (LV), as a rule, the LV propellant tanks are considered as complicated shell structures with the fluid. Mathematical modeling these structures may be applied to define the stressed-strained structural state, the characteristics of proper oscillations of the shell structures with the fluid, to estimate dynamical loads on the structure. An approach to mathematical modeling 3-D oscillations of the shell structures with the fluid is proposed using the finite-element method and aids of the computer design and analysis - CAD/CAE-systems. Methodic support for solution of various problems on the dynamics of rocket and space technology products with complicated 3-D configurations is developed to calculate the dynamical characteristics of the LV body structure for the problem of the longitudinal stability of a liquid rocket, to measure the parameters of longitudinal oscillations and dynamical loads on the upper stage structure as well as the parameters of oscillations of the liquid-propellant free surface in estimating the serviceability of means for providing continuity of the propellant components into the upper stages tanks. 3-D oscillations of the three-stage rocket due to oscillations of the liquid-rocket propulsion thrust are modeled mathematically using the approach proposed. Parameters of 3-D oscillations of the advanced rocket stage in operation of the cruise liquid rocket propulsion of the LV first stage are found. Forced oscillations of the LV upper stage structure and a free surface of the liquid

propellant are modeled mathematically to estimate the serviceability of means for providing continuity of the propellant components into the upper stage tanks in operation of its cruise engine. The approach proposed can be used in the design of methodic support to solve the abovementioned problems of the flight dynamics of various liquid rockets.

Использование современных компьютерных средств проектирования (CAD-систем – Computer Aided Design System) и конечно-элементного анализа (CAE-систем – Computer Aided Engineering System) играет в настоящее время ключевую роль в решении прикладных проблем математического и компьютерного моделирования пространственных колебаний оболочечных конструкций с жидкостью [1]. Поэтому разработка методического обеспечения, использующего CAD/CAE-системы, является актуальной для решения задач динамики объектов ракетно-космической техники.

Целью настоящей работы является математическое моделирование пространственных колебаний ракетных оболочечных конструкций с жидкостью с использованием метода конечных элементов и средств CAD/CAE-систем применительно к условиям динамического нагружения ракеты-носителя (РН) в полете.



Рис. 1

Основные этапы данного моделирования следующие.

1. Построение с помощью средств CAD-систем геометрической трехмерной модели сложных оболочечных конструкций с жидкостью (учитывающей взаимосвязь их геометрических параметров), которое включает:

– разбиение имеющихся в системе «оболочечная конструкция - жидкость» сложных объемов на простые объемы, представляющие собой пяти- и шестигранники, и разбиение сложных областей на плоские или пространственные трех- и четырехугольники, что позволяет в дальнейшем провести «направленную» схематизацию оболочечной конструкции с жидкостью конечными элементами, избежать несовершенств расчетной схемы, обусловленных дискретизацией сложных объемов (или областей), и обеспечить корректный учет граничных условий;

– выполнение эскизов (на плоскости) для формирования простых объемов и областей оболочечной конструкции с жидкостью в CAD-системе;

– построение деталей – пространственных геометрических моделей части (например, $\frac{1}{4}$ части, как показано на рис. 1) простых объемов и областей с помощью поворотов готовых эскизов на соответствующий угол (90 градусов) относительно оси симметрии;

– составление из полученных деталей геометрической модели части ($\frac{1}{4}$ части) системы «оболочечная конструкция - жидкость».

2. Импортирование в CAE-систему геометрической модели части ($\frac{1}{4}$ части) системы «оболочечная конструкция - жидкость», что позволяет получить информацию о линиях, образующих поверхности, ключевых точках, областях и объемах системы «оболочечной конструкции - жидкость».

3. Формирование модели всей конструкции в САЕ-системе путем пролонгирования (отображения нестроеной части оболочечной конструкции и жидкости с использованием свойств симметрии).

4. Проведение в САЕ-системе конечно-элементной дискретизации системы «оболочечная конструкция - жидкость» конечными элементами типа «упругая оболочка» и «трехмерная жидкость». Формулирование граничных условий, задание предполагаемых направлений движения, установление связей между конечными элементами системы, выбор типа задачи динамики системы «оболочечная конструкция - жидкость» и методов ее решения.

На основе математического и компьютерного моделирования пространственных колебаний оболочечных конструкций с жидкостью с использованием САЕ-систем представляется возможность решения следующих задач динамики жидкостных РН: расчета динамических характеристик конструкции корпуса в задаче о продольной устойчивости жидкостной РН [2]; определения параметров продольных колебаний и динамических нагрузок на конструкцию верхней ступени [3, 4]; определения параметров колебаний свободной поверхности жидкого топлива при оценке работоспособности средств обеспечения сплошности компонентов топлива в баках верхних ступеней [5].

Математическое моделирование свободных продольных колебаний

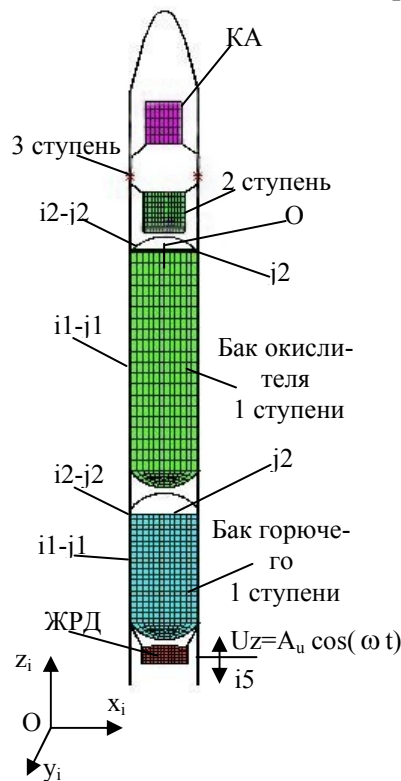


Рис. 2

корпуса трехступенчатой жидкостной РН. Одной из наиболее важных задач в теоретическом решении проблемы обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН является разработка математической модели продольных колебаний корпуса РН, на основе которой можно с достаточной для практики точностью определить параметры низших тонов его собственных продольных колебаний: собственные частоты, декременты и формы колебаний.

Традиционно используется схема прямого неоднородного стержня с упруго подвешенными грузами. Корпус жидкостных РН представляет собой сложную гидромеханическую систему с переменной толщиной стенок и различными силовыми элементами. Использование возможностей современных САЕ-систем, основанных на методе конечных элементов, позволяет в большинстве случаев учесть конструктивные особенности подобного типа технических объектов при математическом моделировании различных дина-

мических процессов.

С использованием САЕ-систем проведено математическое и компьютерное моделирование пространственных колебаний корпуса трехступенчатой РН как сложной оболочечной конструкции с жидкостью, обусловлен-

ных колебаниями тяги жидкостной ракетной двигательной установки (ЖРДУ).

Задача определения характеристик пространственных колебаний сложной оболочечной конструкции с жидкостью решалась в линейной постановке. При этом использовалось допущение, что жидкость однородная, идеальная и сжимаемая.

Силы поверхностного натяжения жидкостей не учитывались, так как их влияние на колебания жидкости и конструкции на активном участке полета РН пренебрежимо мало. Вязкость жидкости учитывалась введением в модель колебаний жидкости в баке соответствующих диссипативных членов.

Средствами САД-системы построена геометрическая трехмерная модель ¼ части системы “конструкция РН – жидкость в баках” (см. рис. 1). С учетом приведенных выше рекомендаций выполнена конечно-элементная дискретизация в САЕ-системе конструкции корпуса и жидкого заполнения топливных баков с помощью конечных элементов «оболочка» и «трехмерная жидкость». Вид продольного сечения указанной конструкции корпуса РН и жидкого заполнения топливных баков после конечно-элементной схематизации представлен на рис. 2.

Параметры вынужденных колебаний конструкции корпуса перспективной РН определяются в САЕ-системе на основании решения системы дифференциальных уравнений, описывающей пространственные колебания ступени с учетом диссипации энергии:

$$M \frac{d^2 X(t)}{dt^2} + C \frac{dX(t)}{dt} + KX = F, \quad (1)$$

где X – вектор перемещений порядка n ; n – количество узлов в модели динамической системы “конструкция РН – жидкость в баках”; K – матрица жесткости порядка $n \times n$; M – матрица масс порядка $n \times n$; t – текущее время; C – матрица коэффициентов демпфирования порядка $n \times n$; F – вектор сил, прикладываемых к конструкции корпуса РН, порядка n .

В расчетном случае силы $F_i^{z_i} = A \cos \omega t$ для гармонического возбуждения конструкции корпуса с частотой ω и амплитудой A в продольном направлении z_i приложены к узлам шпангоута $i5$ (см. рис. 2). При этом $F = [F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n]$ – вектор сил, прикладываемых к конструкции корпуса, порядка n , $F_i = [F_i^{x_i}, F_i^{y_i}, F_i^{z_i}]$, x_i, y_i, z_i – оси глобальной системы координат узлов (см. рис. 2).

Взаимодействие упругой конструкции корпуса с соответствующей жидкой средой на смоченной поверхности его оболочки, а также движение свободной поверхности жидкости в топливных баках учтено посредством соответствующих граничных условий. В частности, определено, что перемещения узлов, принадлежащих свободной поверхности жидкости, осуществляются по нормали к поверхности жидкости, находящейся в невозмущенном состоянии (в данном случае горизонтальной).

Ниже приведены граничные условия, использованные при моделировании пространственных колебаний конструкции корпуса и жидкости в топливных баках окислителя и горючего I ступени (расчетная схема представлена на рис. 2):

а) условия для узлов, расположенных на границе раздела сред «оболочка (i1) – жидкость (j1)»:

$$X_{i1}^{x_i} = X_{j1}^{x_i}, X_{i1}^{y_i} = X_{j1}^{y_i}, X_{i1}^{z_i} = X_{j1}^{z_i};$$

б) условия для узлов, расположенных на свободной поверхности (j2):

$$P_{j2}^{\text{над}} = \text{Const};$$

в) условия для узлов, расположенных на свободной поверхности и на границе раздела сред «оболочка (i2) – жидкость (j2)»:

$$X_{i2}^{x_i} = X_{j2}^{x_i}, X_{i2}^{y_i} = X_{j2}^{y_i},$$

где $X = [X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n]$ – вектор перемещений ($X_i = [X_i^{x_i}, X_i^{y_i}, X_i^{z_i}]$).

В результате перехода в частотную область система (1) с помощью средств САЕ-системы преобразовывается к системе алгебраических уравнений порядка n . Решение системы алгебраических уравнений проводится с использованием средств САЕ-системы методом Гаусса. Поскольку система (1) линейная и стационарная, полученные параметры колебаний соответствуют предельным значениям расчетных амплитуд колебаний при заданных амплитудах внешнего гармонического воздействия F .

Анализ параметров колебаний конструкции корпуса трехступенчатой жидкостной РН при «стартовом» уровне заполнения топливных баков выполнен для условия гармонического возбуждения силового шпангоута двигателя с амплитудой $A_u = 0,001$ м в частотном диапазоне от 0 до 50 Гц, в который попадают частоты собственных продольных колебаний автономных баков окислителя и горючего I ступени исследуемой РН, полученные без учета демпфирования колебаний с использованием методики [3]. Для упрощения анализа давление наддува в баке и влияние колебательного движения жидкости в питающей магистрали ЖРДУ на динамику системы «конструкция РН – жидкость в баках» не учитывались.

На рисунках 3, 4 приведены модули частотных характеристик $W_O(j\omega) = \delta u_{\text{Ю}} / \delta u_Z(j\omega)$ и $W_\Gamma(j\omega) = \delta u_{\text{БГ}} / \delta u_Z(j\omega)$ продольных перемещений соответственно днища бака окислителя и днища бака горючего по перемещению силового шпангоута двигателя системы «конструкция РН – жидкость в баках», рассчитанных при «стартовом» уровне заполнения топливных баков при относительном коэффициенте демпфирования колебаний жидкости, равном 2 % от критического (на рис.3, 4 обозначены цифрой 2), и без его учета (на рис.3, 4 обозначены цифрой 1).

Максимумы модулей частотных характеристик $W_O(j\omega)$ для бака окислителя в первой области резонансного возрастания оказались существенно больше, чем у частотных характеристик $W_\Gamma(j\omega)$ для бака горючего. Максимумы модулей частотных характеристик $W_O(j\omega)$, $W_\Gamma(j\omega)$ соответствуют резонансным частотам продольных колебаний автономных баков окислителя и горючего I ступени исследуемой РН, полученным с использованием методики [3].

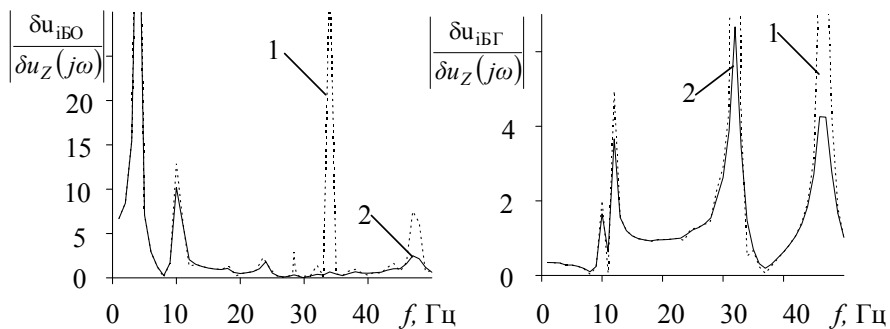


Рис. 3

Рис. 4

Таким образом, с использованием САД/САЕ-систем рассчитаны зависимости параметров колебаний конструкции и жидкого топлива в баках цилиндрической конфигурации первой ступени РН (при различных уровнях заполнения баков жидким топливом) от частоты продольного гармонического возмущения, действующего на конструкцию РН. Установлено заметное влияние демпфирования колебаний жидкости и конструкции РН на амплитуды колебаний давления жидкости на днище баков первой ступени (вблизи от входа в заборное устройство) на частотах, близких к частотам собственных продольных колебаний динамической системы «конструкция ракеты-носителя – жидкое топливо в баках». Полученные результаты могут быть использованы при теоретическом анализе продольных колебаний многоступенчатых жидкостных РН.

Математическое моделирование свободных продольных колебаний конструкции верхней ступени РН. Современные конструкции верхних ступеней многоступенчатых жидкостных РН, создаваемые на основе оригинальных

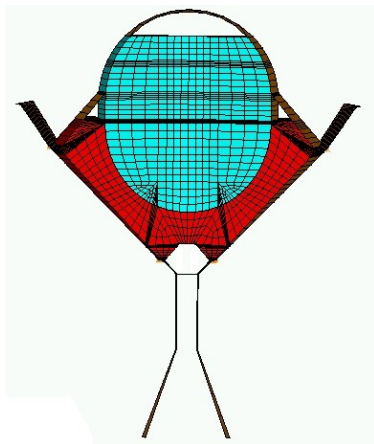


Рис. 5

технических решений, представляют собой сложные пространственные тонкостенные упругие конструкции с жидким заполнением. Применение традиционного подхода к теоретическому определению характеристик собственных колебаний таких конструкций верхних ступеней, основанного на расчете параметров осесимметричных колебаний автономных баков (окислителя и горючего) с жидким заполнением, становится невозможным. Экспериментальное определение динамических характеристик верхних ступеней РН связано со значительными материальными и финансовыми затратами.

Моделирование пространственных колебаний верхней ступени на активном участке траектории полета РН (во время работы ЖРДУ первой ступени) проведено с использованием САД/САЕ-систем и метода конечных элементов. На рис. 5 показано конечно-элементное представление исследуемого топливного отсека верхней ступени РН.

С использованием CAD/CAE-систем в работе [3] определены параметры собственных продольных колебаний конструкции верхней ступени РН с учетом особенностей конструкции ее топливного бака: сложной пространственной конфигурации, переменной толщины стенок баков по длине и наличия силовых шпангоутов. Результаты расчета параметров продольных колебаний исследуемой конструкции верхних ступени РН указали на наличие частот собственных колебаний ступени, попадающих в диапазон частот возможной продольной неустойчивости жидкостной РН. Показано, что реализация компоновочной схемы ступени с погружением одного топливного бака в другой приводит к динамическому взаимодействию сопряженных топливных баков, которое обуславливает понижение частот собственных продольных колебаний ступени и возрастание эффективных масс колебаний ступени. Разработанные на основе метода конечных элементов модели пространственных колебаний верхних ступеней РН могут быть использованы при оптимизации компоновочных схем и определении динамических нагрузок на конструкцию ступеней в полете.

Определение параметров колебаний свободной поверхности жидкого топлива при оценке работоспособности внутрибаковых устройств верхней ступени. Одной из актуальных задач, решаемых при проектировании систем питания маршевых ЖРДУ верхних ступеней РН, является задача обеспечения сплошности компонентов топлива с целью исключения возможности попадания в тракты питания двигателя газовых включений в количествах, недопустимых с точки зрения устойчивости работы двигателя.

С использованием CAD/CAE-систем проведено математическое и компьютерное моделирование вынужденных колебаний верхней ступени при малых уровнях заполнения баков топливом, соответствующих времени работы маршевого двигателя ступени.

В работе [5] определены параметры свободных колебаний ступени с жидким заполнением ее топливных баков. Рассчитаны максимальные амплитуды колебаний свободной поверхности жидкости в топливных баках верхней ступени при заданном уровне продольных колебаний верхней ступени с учетом демпфирования. Это позволило оценить возможный диапазон изменения амплитуд колебаний свободной поверхности жидкого топлива при различных режимах возбуждения. На основе этих результатов получены количественные оценки запасов работоспособности внутрибаковых устройств обеспечения сплошности компонентов топлива и сформированы предложения для сокращения объемов и сроков экспериментальной отработки систем питания ЖРДУ исследуемой верхней ступеней РН.

Выводы. Таким образом, проведено математическое и компьютерное моделирование пространственных колебаний оболочечных конструкций с жидкостью с использованием CAD/CAE-систем. На основе моделирования разработано методическое обеспечение для решения следующих задач динамики жидкостных РН различного назначения (в том числе имеющих сложную пространственную конфигурацию топливных баков): расчета динамических характеристик конструкции корпуса при анализе продольной устойчивости жидкостной РН; определения параметров продольных колебаний и динамических нагрузок на конструкцию верхней ступени; определения параметров колебаний свободной поверхности жидкого топлива при оценке рабо-

тоспособности средств обеспечения сплошности компонентов топлива в баках верхних ступеней.

1. *Ли К.* Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / *К. Ли.* – Санкт Петербург : Питер, 2004. – 560с.
2. *Блоха И. Д.* Математическое моделирование собственных продольных колебаний трехступенчатой жидкостной ракеты-носителя / *И. Д. Блоха* // V Міжнародна молодіжна науково-практична конференція “ЛЮДИНА І КОСМОС”: збірник тез. – Дніпропетровськ : НЦАОМУ, 2003. – С. 27.
3. *Блоха И. Д.* Определение параметров собственных продольных колебаний космических ступеней ракет-носителей со сложной пространственной конфигурацией отсеков / *И. Д. Блоха* // Вісник дніпропетровського університету. – 2005. – №8. – С. 106 – 113.
4. *Блоха И. Д.* Оценка динамической нагруженности конструкции космической ступени со сложной пространственной конфигурацией топливных баков при продольных колебаниях жидкостной ракеты-носителя / *И. Д. Блоха, А. Д. Николаев* // Вісник дніпропетровського університету. – 2006. – № 9/2. – С. 3 – 11.
5. Влияние продольных вибраций космической ступени РН на работоспособность внутрибаковых устройств обеспечения сплошности компонентов топлива в системе питания маршевого двигателя / *И. Д. Блоха, А. Н. Заволока, А. Д. Николаев, О. В. Пилипенко, Н. Ф. Свириденко, Б. А. Шевченко* // Техническая механика. – 2005. – № 2. – С. 65 – 74.

Институт технической механики
НАН Украины и ГКА Украины,
Днепропетровск

Получено 21.06.13,
в окончательном варианте 21.06.13