

УДК 629.7.023:620.178.3

Р. В. Мормуль, инженер-конструктор 2-й категории
Ю. В. Глузов, ведущий конструктор
 ПАО «Научно-производственное объединение „Искра“»
М. Ю. Егоров, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Высшая математика»
 ФГБОУ ВПО «ПНИПУ»
В. С. Федулов, инженер-конструктор 2-й категории
 ПАО «Научно-производственное объединение „Искра“»

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЫХОДНОГО БЛОКА РДТТ ПРИ РАЗДВИЖКЕ СОПЛА

Определены параметры напряженно-деформированного состояния выходного (соплового) блока перспективного ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ) при ударных нагрузках в процессе раздвижки сопла с использованием дискретно-массового подхода. Исследована динамика упругих волновых процессов при прямом и обратном ударном вибродинамическом нагружении сопла. В рамках численного эксперимента получены оценки по распределению минимальных коэффициентов запаса прочности конструкции выходного блока РДТТ.

Ключевые слова: твердотопливный ракетный двигатель, унос масс, тепломассоперенос, композиты, теплозащитное покрытие, сопловой блок, напряженно-деформированное состояние, теплопроводность, численное моделирование, метод конечных элементов.

Конструктивное исполнение выходного блока

В данной статье исследуются вибродинамические процессы раздвижного, поворотного-управляющего сопла (ПУС), конструктивное исполнение которого представлено на рис. 1. Удержание поворотной части сопла в «нулевом положении» осуществляется тремя фиксаторами, входящими в состав корпуса силового. Отклонение поворотной части на максимальный угол производится двумя рулевыми машинами. Направляющее сдвиговое устройство (НСУ) состоит из толкателя, основания и двух направляющих элементов из шпангоутов, цилиндра внутреннего, цилиндра наружного. С помощью направляющих, в конструкции которых предусмотрены тяговые и упорные ле-

пестки, и замковых колец НСУ соединяется с внутренним и наружным выдвигными насадками (ВВН и НВН). НСУ удерживается на корпусе с помощью бандажа, установленного на направляющем элементе ВВН. Необходимое натяжение бандажной ленты обеспечивается стяжным замком, совмещенным с приводом замка. В приводе стяжного замка установлено специальное устройство для расфиксации сложенного положения ПУС. Опорная база НСУ по мере выдвигания насадков увеличивается, обеспечивая при этом бесперекусное выдвигание насадков. В выдвинутом положении насадки фиксируются цапгами, при этом герметизация разъемов профиля обеспечивается амортизаторами.

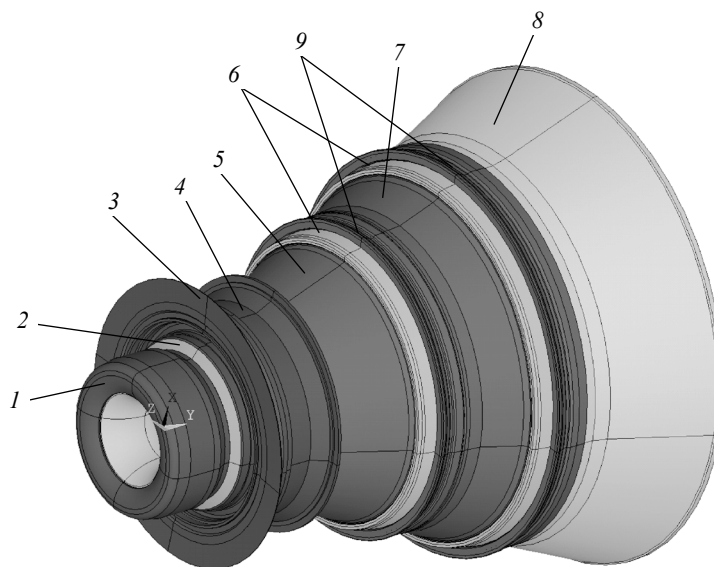


Рис. 1. Поворотное-управляющее сопло (ПУС): 1 – входная часть сопла; 2 – эластично-опорный шарнир (ЭОШ); 3 – фланец; 4 – силовой корпус; 5 – раструб поворотный (РП); 6 – цапги; 7 – внутренний выдвигной насадок (ВВН); 8 – наружный выдвигной насадок (НВН); 9 – шпангоут

Раздвижка насадков происходит под действием давления воздуха на поперечное сечение толкателя. Сначала в выдвинутом положении фиксируется ВВН и при срабатывании замкового кольца внутреннего насадка НСУ с НВН отсоединяется от ВВН. Далее выдвигание НВН совместно с НСУ осуществляется до момента фиксации НВН в выдвинутом положе-

нии, после чего НСУ отсоединяется от ПУС и направленно удаляется из внутренней полости сопла.

Расчет нагрузок на сопло при фиксации выдвигаемых насадков

При раздвижке сопла на его элементы действуют ударные нагрузки при фиксации внутреннего и наружного телескопических насадков. В момент касания

ВВН с раструбом поворотным (РП) скорость подвижных частей сопла составляет 2,19 м/с, в момент касания НВН с ВВН скорость подвижных частей сопла – 3,58 м/с. Для определения нагрузок в качестве расчетной схемы принята дискретно-массовая модель выходного блока, представленная на рис. 2.

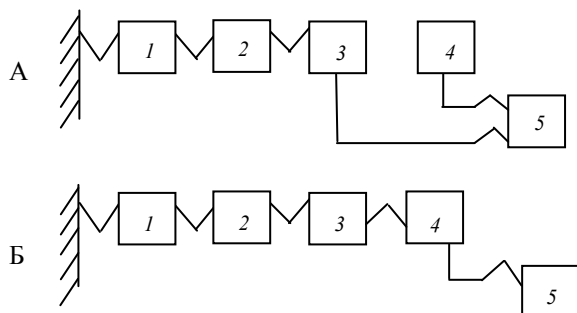


Рис. 2. Дискретно-массовая модель сопла для расчета ударных нагрузок при фиксации: А – ВВН; Б – НВН

В рамках данной модели элементы конструкции в первом приближении рассматриваются как дискретные твердые массы, соединенные между собой упругими связями. Элементы модели представляют отдельные конструктивные элементы, массы которых

определены по проектным чертежам. Жесткостные и демпфирующие характеристики связей модели приняты с учетом изделий-прототипов. Движение элементов дискретно-массовой модели в продольном направлении описывается системой дифференциальных уравнений [1] с начальными условиями:

$$m_i \ddot{x}_i = N_i - \sum_{i \neq j}^n C_{ij} (x_j - x_i) - \sum_{i \neq j}^n h_{ij} (\dot{x}_j - \dot{x}_i); \quad (1)$$

$$x_i(0) = 0, \quad \dot{x}_1(0) = \dot{x}_2(0) = 0; \quad (2)$$

$$\dot{x}_3(0) = \dot{x}_4(0) = \dot{x}_5(0) = 2,19 \text{ м/с};$$

$$x_i(0) = 0, \quad \dot{x}_1(0) = \dot{x}_2(0) = \dot{x}_3(0) = 0; \quad (3)$$

$$\dot{x}_4(0) = \dot{x}_5(0) = 3,58 \text{ м/с}.$$

В соотношениях (1)–(3) введены обозначения: $m_i, x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i, N_i$ – масса, перемещение, скорость, ускорение и внешнее осевое усилие соответствующего i -го элемента модели; n, C_{ij}, h_{ij} – количество связей и коэффициенты жесткости, демпфирования в связях соответственно. Параметры модели представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Параметры динамической модели при посадке ВВН

Наименование элемента	Относительная масса	Связь, $i-j$	Коэффициент жесткости, Н/м	Коэффициент демпфирования, Н с/м
НЧ сопла + фланец + часть днища	1,00	0-1	$0,65 \cdot 10^7$	$0,29 \cdot 10^4$
РП сопла	0,64	1-2*	$0,11 \cdot 10^8 / 0,11 \cdot 10^9$	$0,31 \cdot 10^4 / 0,98 \cdot 10^4$
		1-2**	$0 / 0,93 \cdot 10^8$	$0 / 0,90 \cdot 10^4$
ВВН сопла	0,28	2-3	$0,14 \cdot 10^8 / 0,42 \cdot 10^8$	$0,22 \cdot 10^4 / 0,38 \cdot 10^4$
НВН сопла	0,16	3-4	$0,24 \cdot 10^{10}$	$0,24 \cdot 10^5$
НСУ	0,16	4-5	$0,30 \cdot 10^{10}$	$0,27 \cdot 10^5$

Примечание: связи 0-1, 1-2*, 1-2**, 2-3, 3-5 и 4-5 соответствуют заднему днищу, ЭОШ, фиксаторам, амортизатору ВВН, цапгам РП, элементам НСУ ВВН и элементам НСУ НВН соответственно; жесткостные и демпфирующие характеристики в числителе соответствуют растяжению связи модели, в знаменателе – сжатию.

Система дифференциальных уравнений (1)–(3) интегрировалась численно методом Рунге – Кутты с учетом отсоединения НСУ от ВВН при поджатии амортизатора на 1,2 мм и поджатия амортизатора

после фиксации ВВН на величину 1,8 мм. Начальные условия (2) соответствуют расчету ударных нагрузок при фиксации ВВН, (3) – НВН.

Таблица 2. Параметры динамической модели при посадке НВН

Наименование элемента	Относительная масса	Связь, $i-j$	Коэффициент жесткости, Н/м	Коэффициент демпфирования, Н с/м
НЧ сопла + фланец + часть днища	1,00	0-1	$0,65 \cdot 10^7$	$0,29 \cdot 10^4$
РП сопла	0,64	1-2*	$0,11 \cdot 10^8 / 0,11 \cdot 10^9$	$0,31 \cdot 10^4 / 0,98 \cdot 10^4$
		1-2**	$0 / 0,93 \cdot 10^8$	$0 / 0,90 \cdot 10^4$
ВВН сопла	0,28	2-3	$0,14 \cdot 10^8 / 0,42 \cdot 10^8$	$0,22 \cdot 10^4 / 0,38 \cdot 10^4$
НВН сопла	0,16	3-4	$0,35 \cdot 10^8 / 0,43 \cdot 10^8$	$0,26 \cdot 10^4$
НСУ	0,16	4-5	$0,30 \cdot 10^{10}$	$0,27 \cdot 10^5$

Примечание: связи 0-1, 1-2*, 1-2**, 2-3, 3-5 и 4-5 соответствуют заднему днищу, ЭОШ, фиксаторам, амортизатору ВВН, цапгам РП, элементам НСУ ВВН и элементам НСУ НВН, соответственно; жесткостные и демпфирующие характеристики в числителе соответствуют растяжению связи модели, в знаменателе – сжатию.

Характер изменения усилий и ускорений по времени приведен на рис. 3–4.

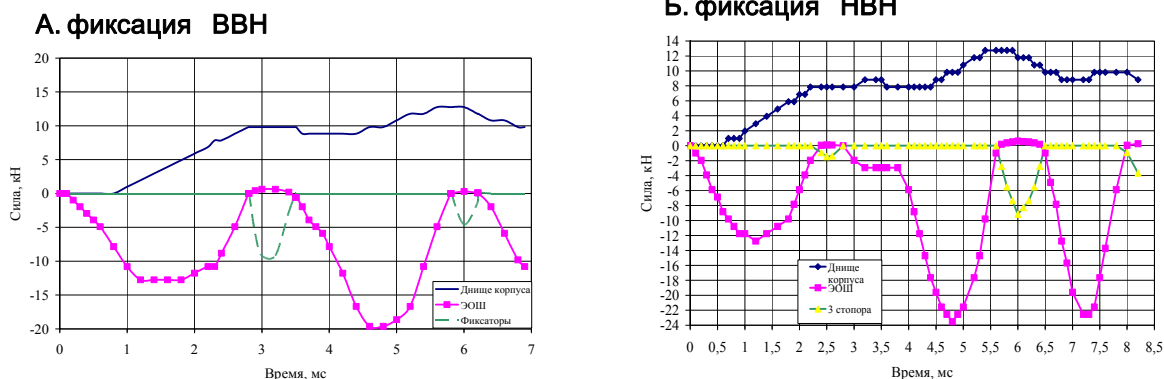


Рис. 3. Нагрузка на заднее днище, ЭОШ и фиксатор

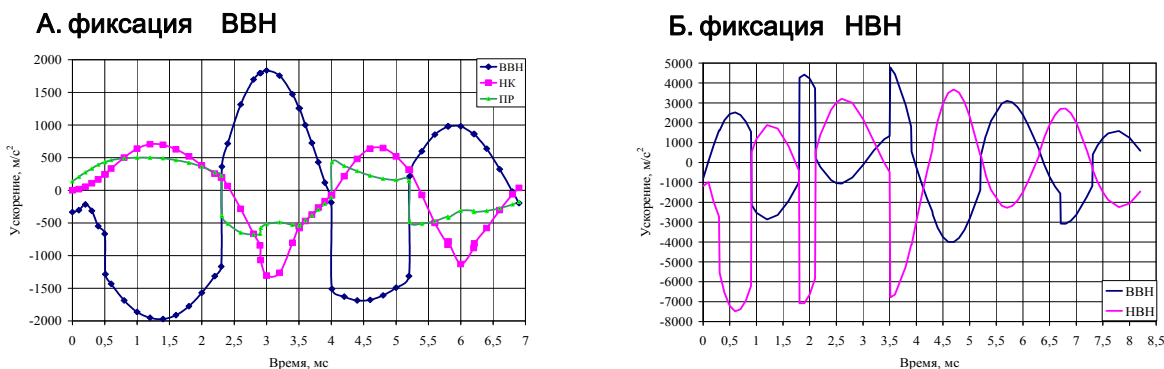


Рис. 4. Ускорение на НВН, ВВН, НК и ПР сопла (положительное направление ускорения – в сторону среза сопла)

На рис. 3 и 4 показано, что деформация растяжения ЭОШ и нагрузка на фиксаторах возникают при работе цанг РП.

Определение параметров НДС

Уравнение равновесия сплошной среды с учетом влияния инерционно-массовых сил [2] запишем в виде:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{\sigma} + \rho \vec{N} &= \rho \vec{u} \ddot{}, \\ \vec{n} \cdot \vec{\sigma} \Big|_{\Gamma_F} &= \vec{F}. \end{aligned} \tag{4}$$

Геометрические соотношения, описывающие нелинейную динамику НДС углеродных и углерод-углеродных композиционных материалов (УКМ и УУКМ) тепловой защиты сопла, определены следующим образом:

$$\vec{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\vec{\nabla} \vec{u} + \vec{\nabla} \vec{u}^T) + \vec{\nabla} \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u}^T. \tag{5}$$

В уравнениях (4)–(5) введены следующие обозначения: $\vec{\sigma}, \vec{\varepsilon}, \vec{\nabla} \vec{u}$ – тензор напряжений, деформаций и дисторсии; $\vec{n}, \vec{N}, \vec{u}, \vec{u}, \vec{F}$ – вектор нормали, массовой силы, перемещений и ускорений, поверхностной силы, соответственно, $\vec{\nabla} = \vec{e}^i \frac{\partial}{\partial x^i}$ – оператор Гамильтона.

Для решения контактной упругой граничной задачи использовался метод конечных элементов (МКЭ) в объемной постановке [3].

Нелинейная динамика волнового упругого поведения выходного блока РДТТ также обусловлена наличием диаграмм деформирования УКМ и УУКМ в кольцевом и осевом направлениях и стыком материалов конструкции с различными физико-механическими характеристиками (ФМХ).

На рис. 5–6 представлена карта перемещений и напряжений при прямом и обратном ударном вибродинамическом воздействиях.

Анализ результатов численного моделирования показал, что максимальные растягивающие напряжения при прямом ударе реализуются на поверхности шпангоута, при обратном – на поверхности цанг.

Критерий прочности несущих деталей конструкции определяется соотношением:

$$\eta_{\min} = \frac{\sigma_b}{\sigma_{\max}} > 1, \tag{6}$$

где η_{\min} – минимальный коэффициент запаса прочности; σ_b – предел прочности материалов конструкции; $\sigma_{\max} = \max\{\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z\}$ – максимум среди расчетных напряжений; $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ – радиальные, кольцевые и осевые напряжения соответственно.

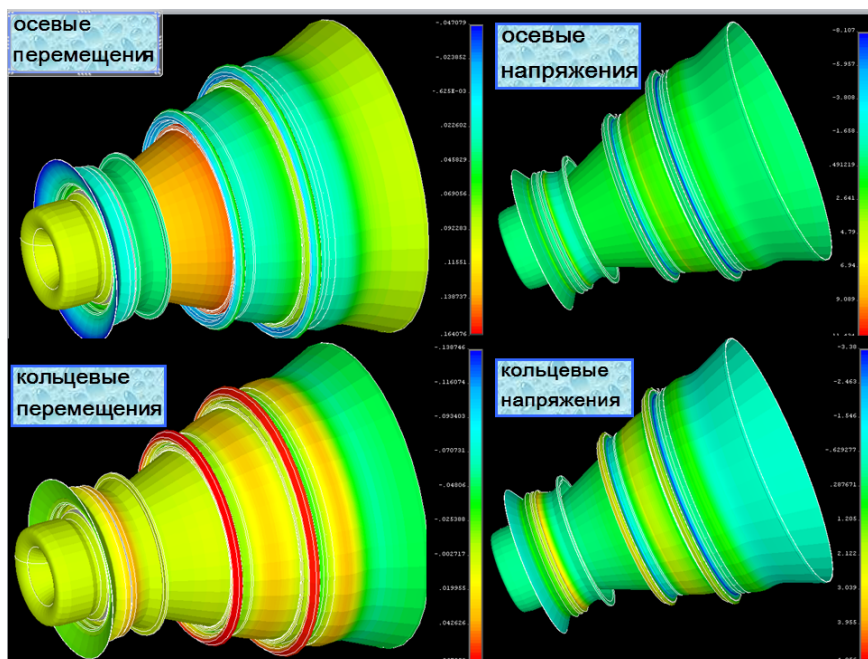


Рис. 5. Карта напряжений (кгс/мм²) и перемещений (мм) при прямом ударном воздействии масштаб деформирования (1:300)

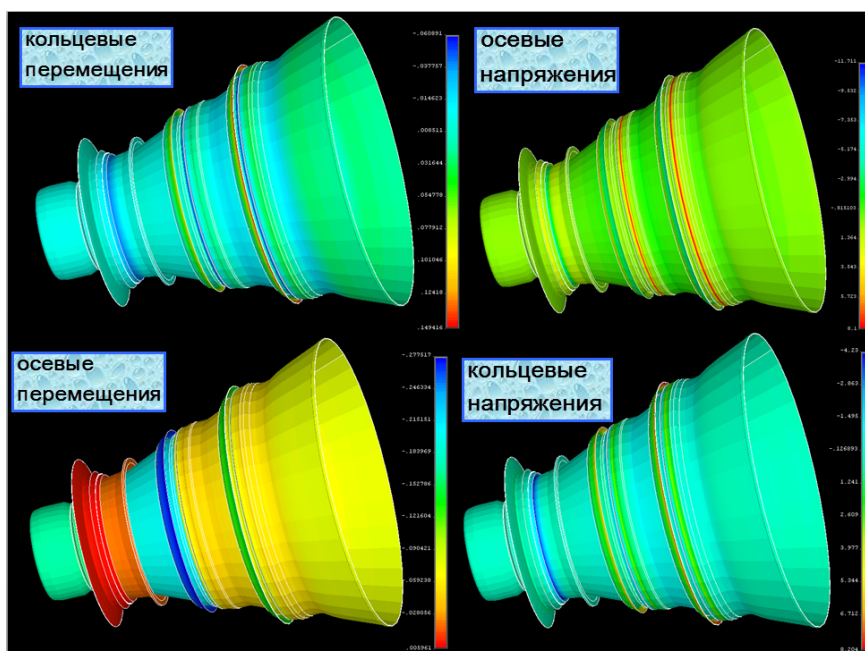


Рис. 6. Карта напряжений (кгс/мм²) и перемещений (мм) при обратном ударном воздействии

В табл. 3 приведены численные оценки по распределению минимального коэффициента запаса прочности наиболее нагруженных деталей конструкции.

Амплитудно-частотные характеристики в максимально нагруженных узлах конструкции показаны на рис. 7.

Таблица 3

Деталь	Коэффициент запаса прочности при прямом ударе	Коэффициент запаса прочности при обратном ударе
Раструб поворотный	>10	>10
ВВН	6,16	7,27
НВН	7,73	7,93
Шпангоут	4,87	7,25
Цанги	6,28	4,21

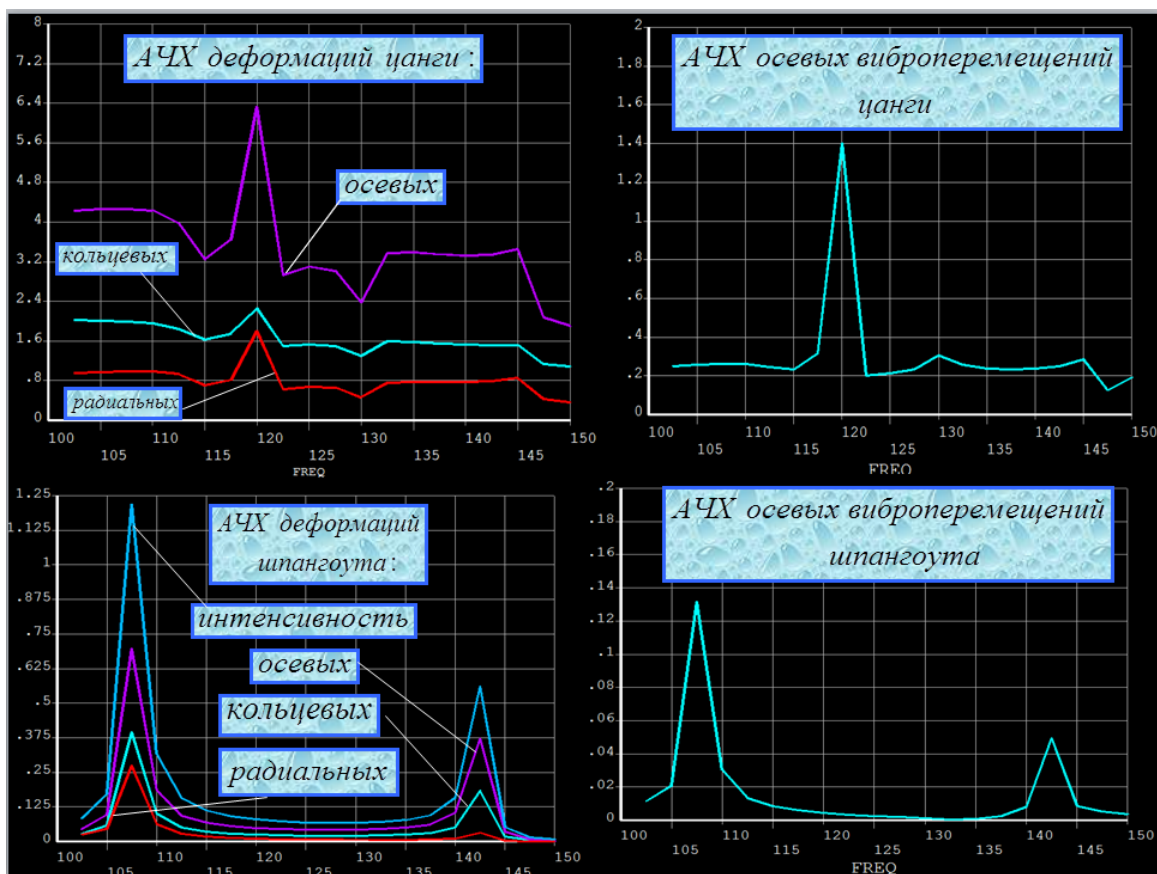


Рис. 8. АЧХ в максимально нагруженных узлах конструкции

Заключение

В заключение следует отметить, что разработанный автоматизированный алгоритм позволяет адекватно исследовать динамику упругого поведения выходного блока РДТТ при вибродинамических ударных воздействиях, происходящих при раздвижке сопла.

Данная методика численного моделирования с применением дискретно-массового подхода на этапе эскизного и конструкторского проектирования по-

зволяет приблизительно в 4 раза сократить время выполнения расчета вибродинамической прочности.

Библиографические ссылки

1. Победра Б. Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1986. – 264 с.
2. Рекач В. Г. Руководство по решению задач упругости. – М. : Высш. шк., 1987. – 216 с.
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М. : Мир, 1979. – 392 с.

R.V. Mornul, Design Engineer, Post-graduate, PJSC Research and Production Association "Iskra", Perm;

Yu. I. Glumov, Leading Engineer, PJSC Research and Production Association "Iskra", Perm;

M.Yu. Egorov, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Perm National Research Polytechnic University;

V.S. Fedulov, Design Engineer, Post-graduate, PJSC Research and Production Association "Iskra", Perm

Numerical simulation of stress-strain state of the output unit of SPRE during nozzle separation

Parameters of stress-strain state of the output (nozzle) unit of the progressive solid-propellant rocket engine (SPRE) are determined for impact loads during nozzle separation by means of discrete mass approach. Dynamics of elastic wave processes is investigated for direct and inverse impact vibrodynamic loading of the nozzle. Numerical experiment allowed obtaining assessment of distribution of minimal strength safety factors of the SPRE output unit structure.

Keywords: solid propellant rocket motor, mass-loss, heat mass transfer, composites, thermal barrier coating, nozzle block, stress-strain state, conductivity, numerical modeling, method of finite elements.

Получено: 21.08.15