

Принципиально новым решением при разработке двигательной установки УРМ-2 РКН «Ангара-А5» является включение испытаний ДУ изделия-прототипа в объём наземной стендовой отработки. В 2006 году на базе ФКП «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности» (НИЦ РКП) были проведены холодные и огневые стендовые испытания ДУ 3-й ступени РКН «Союз-2-1б». ДУ 3-й ступени РКН «Союз-2-1б» и ДУ УРМ-2 имеют близкую размерность и создаются на базе унифицированных жидкостных ракетных двигателей. ГКНПЦ им. М.В. Хруничева получено разрешение ЦСКБ «Прогресс» на использование результатов испытаний РКН «Союз-2-1б».

Для проектирования ДУ УРМ-2 использован программно-аппаратный комплекс, настроенный по результатам холодных и огневых испытаний ДУ 3-й ступени РКН «Союз-2-1б». Рассматриваемые ДУ имеют общий комплект математических моделей, различия ограничиваются базами данных эмпирических коэффициентов математических моделей, конструктивных параметров ДУ и прогнозом параметров ДУ. В связи с этим в программу экспериментальной отработки УРМ-2 включено единственное стендовое изделие для комплексных «холодных» и огневых испытаний ДУ.

Получены следующие результаты численного моделирования процессов в ДУ УРМ-2 и огневых стендовых испытаний:

- Изменение давления в баках кислорода и керосина близко к результатам огневых стендовых испытаний (ОСИ). Максимальное различие в измеренных и вычис-

ленных давлениях не превышает 8% по окислителю и 15% по горючему.

- Динамика изменения среднемаксимальной температуры парогазовой смеси в газовой полости бака окислителя подтверждает обеспечение необходимого перемешивания газа наддува и паров кислорода.

- Расчётные значения расхода газа наддува примерно на (20...25)% превышают полученные в эксперименте. Это говорит о превышении фактической среднемаксимальной температуры в газовой полости бака относительно расчётной величины.

#### Библиографический список

1. Государственный космический научно-производственный Центр им. М.В. Хруничева [Электронный ресурс]: Официальный сайт / ГКНПЦ им. М.В. Хруничева. – 2005. - Электрон. дан. on-line. - Загл. с титул. экрана. URL: <http://www.khrunichev.ru> (Дата обращения 05.02.2011).

2. Гневашев, А.П. Минимизация затрат топлива на наддув баков и захолаживание магистралей в системе ПГСР водородной двигательной установки с многократным включением [Текст] / А.П. Гневашев, В.А. Гордеев, В.К. Завадский, [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. №3 (59). 2008. - С. 108...114.

3. Гордеев, В.А. Оптимизация процесса отработки ПГСР ракет и разгонных блоков [Текст] / В.А. Гордеев, В.П. Иванов, И.С. Партола, В.П. Фирсов // Научно-технические разработки КБ «Салют». 2006-2008 гг. Выпуск II. / М.: Машиностроение, 2010. - С. 284...292.

УДК 539.374

### ПЛАСТИЧЕСКАЯ ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ ТРУБЫ

Непершин Р.И.

Московский Государственный Технологический Университет «Станкин»

#### PLASTIC BUCKLING OF AXIALLY COMPRESSED TUBE

*Nepershin R.I. Plastic forming of circular buckling folds is considered for axially compressed tube. Initial stage of the buckling fold forming is calculated using membrane rigid-plastic shell model with Mises yield criterion and plastic work hardening effect. Final stage of the buckling fold form-*

ing is calculated using plastic bend model. Models predictions are reasonable correlated with experimental data.

Первые экспериментальные данные о локальной пластической потере устойчивости при осевом сжатии тонкостенных металлических труб в виде образования симметричных и несимметричных складок приведены в [1]. Расчетные модели для треугольных, квадратных и кольцевых складок, основанные на теории пластического шарнира, приведены в [2,3].

Экспериментальные исследования пластической потери устойчивости тонкостенных труб из алюминиевых сплавов применительно к проблеме защиты транспортных средств, приведены в [4-6].

Работа пластического формоизменения при осевом сжатии тонкостенных труб может использоваться в защитных конструкциях энергетических установок для гашения кинетической энергии при аварийных нагрузках.

В докладе рассматривается пластическое формоизменение металлических труб при осевом сжатии с относительно толстой стенкой, для которых преобладает осесимметричная форма локальной потери устойчивости в виде кольцевых складок с длиной волны, определяемой при локальной потере устойчивости упругой тонкостенной цилиндрической оболочки [1]. Пластической потере устойчивости предшествует однородная деформация осевого сжатия, которая повышает критическое напряжение потери устойчивости.

На начальной стадии после потери устойчивости кривизна складки  $\chi$  определяется интегрированием дифференциального уравнения для меридионального напряжения  $\sigma_\varphi$  при переменной толщине стенки  $h$

$$d\sigma_\varphi = -\sigma_\varphi \left[ (1-a) \frac{dr}{r} + \frac{dh}{h} \right]. \quad (1)$$

Правая часть уравнения (1) зависит от  $\chi$  по формулам, определяемым уравнением равновесия по нормали к образующей и условием пластичности Мизеса

$$a = \chi r / \cos \varphi, \quad (2)$$

$$\sigma_\varphi \sqrt{(a^2 - a + 1)} = \sigma_s, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – угол наклона касательной к образующей и  $\sigma_s$  – напряжение текучести с пластическим упрочнением.

Уравнение (1) решается численным методом Рунге-Кутты второго порядка и определяет распределение кривизны вдоль образующей срединной поверхности складки. Форма образующей складки находится интегрированием дифференциальных соотношений

$$d\varphi = \chi dl, \quad dr = dl \sin \varphi, \quad dz = dl \cos \varphi, \quad (4)$$

где  $dl$  – длина элемента дуги образующей.

Конечная стадия образования складки описывается моделью идеально пластического изгиба, для которой получена система алгебраических уравнений, определяющих геометрические параметры складки. Численное решение этой системы определяет форму складки и осевую силу в зависимости от перемещения инструмента.

Проведены эксперименты по осевому сжатию трубы из стали 3 с образованием кольцевых складок, которые показывают удовлетворительное соответствие с расчетной моделью.

Представленная модель позволяет более точно оценивать работу пластического формоизменения кольцевых складок с учетом деформационного упрочнения по сравнению с [4,5], что представляет практический интерес при конструировании демпфирующих защитных устройств машин при аварийных нагрузках.

Контролируемое пластическое образование кольцевых складок потери устойчивости по представленной модели может быть использовано в технологии пластического формообразования утолщений на заданном участке длины трубы.

#### Библиографический список

1. Тимошенко, С.П. Устойчивость упругих систем / С.П. Тимошенко. М: Гостехиздат. 1946. 532 с.
2. Pugsley, A. The large-scale crumpling of thin cylindrical columns / A. Pugsley, M. Maucalay // Quart. Journal Mech. and Applied Math. 1960. V. XIII. Pt.1. pp. 1–9.
3. Alexander, J.M. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading / J.M. Alexander // Quart.

Journal Mech. and Applied Math. 1960. V. XIII. Pt.1. pp. 10–15.

4. Andrews, K.R. Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading / K.R. Andrews, G.L. England, E.F. Ghani // Intern. Journ. of Mechanical Sciences. 1983. V. 25. pp. 687– 696.

5. Mamalis, A.G, The quasistatic crumpling of thin-walled circular cylinders and frusta un-

der axial compression / A.G. Mamalis, W. Johnson // Intern. Journ. of Mechanical Sciences. 1983. V. 25. pp. 713 – 732.

6. Meng, Q.S. Axial crushing of square tubes / Q.S. Meng, T.S. Al-Hassani, P.D. Soden // Intern. Journ. of Mechanical Sciences. 1983. V. 25. pp. 747 – 773.

УДК.629.7.036.34

## СТЕРЖНЕВОЙ ЛОПАТОЧНЫЙ ВОЛНОВОЙ КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Давыдов Д.П.

Самарский государственный аэрокосмический университет

### A BLADE BEAM WAVE FINITE ELEMENT

*Davydov D.P. The blade wave finite element was developed. The FORTRAN code program was developed for modal analysis of rotating nonuniform heated blades from the gas turbine engines. The natural modes of two compressor blades were explored.*

В подавляющем большинстве практически важных случаев рабочие колеса необходимо рассматривать как единые упругие системы. Это обусловлено широким использованием в конкретных конструкциях кольцевых связей между лопатками и применением рабочих колес, включая несущие диски, ажурных конструктивных форм.

Для специализированного комплекса программ, позволяющих исследовать колебательные процессы рабочих колес турбомашин, разработан лопаточный волновой конечный элемент. Который рассматривается, как кольцевой дискретный поворотносимметричный набор изолированных друг от друга однотипных участков лопаток, представляющих закрученные стержни переменного поперечного сечения, обладающие изгибно-крутильной связанностью деформаций в соответствии с моделью, предложенной Б.Ф. Шорром [1].

Рассматривая совместно уравнения равновесия элемента  $k$ -й лопатки в системе координат  $oxyz$  (рис. 1) и соотношения связывающие внутренние силы и моменты, получена определяющая система дифференци-

альных уравнений, которая описывает динамические свойства элементарного участка лопаточного кольцевого элемента. При этом представление лопатки, как компонента поворотносимметричной системы [2] и учет равномерно-дискретного гармонического закона окружного распределения волн усилий и перемещений, позволяет перейти к их амплитудам, которые представлены в комплексной форме:

$$\tilde{\chi} = \chi e^{i\frac{2\pi}{S}mk} e^{ipt}, \quad (1)$$

где  $\chi$  – комплексная амплитуда соответствующего компонента,  $i$  – мнимая единица,  $S$  – число лопаток рабочего колеса,  $m$  – число волн деформаций в окружном направлении,  $k$  – порядковый номер лопатки,  $p$  – собственная частота колебаний.

Такая форма записи позволяет учесть окружные сдвиги между волнами компонентов усилий и перемещений.

Для построения системы уравнений конечного элемента использовался метод Галлеркина. Интегрирование системы дает мат-