

УДК 629.7.054

**В.В. КАРАЧУН, В.Н. МЕЛЬНИК***Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев, Украина***ЦИКЛИЧЕСКАЯ И ОСЕНЕСИММЕТРИЧНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ОБОЛОЧКИ  
В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

*Устанавливаются значения координатных функций оболочек, находящихся в режиме циклического нагружения акустическим излучением звуковой частоты. Проводится оценка координатных функций в случае антисимметричного воздействия плоской волны на упруго-податливую поверхность нулевой гауссовой кривизны. Оценивается степень влияния волнового вектора и физико-механических свойств материала на перемещения поверхности при угловом движении летательного аппарата, а также при маневрировании в виде программной циркуляции по траектории. Создано аналитическое обеспечение для установления влияния на поверхность подвеса диффузных звуковых полей, когда наблюдается равновероятностный перенос энергии проникающего излучения внутрь объема или полупространства.*

**Ключевые слова:** *циклическая деформация, координатные функции, акустическое излучение, гауссова кривизна.*

**Введение**

**Постановка проблемы и ее связь с научно-техническими задачами.** Летательные аппараты, базирующиеся на открытых стартовых позициях либо на платформах мобильного базирования, в момент старта и движения в плотных слоях атмосферы излучают в окружающее пространство акустические волны широкого спектра и случайной амплитуды. Главным источником акустического нагружения являются реактивные двигатели ЛА. В районе реактивной струи уровень звукового давления может превышать 180 дБ при ширине частотной полосы 0 – 10 кГц.

Акустическое излучение генерирует в поверхности элементной базы аппарата и его комплектующих множество форм колебаний, в том числе и резонансных. Изучение возмущенного движения плоских, оболочечных и других форм поверхностей представляет не только научный, но и практический интерес, т.к. позволяет четко очертить условия возникновения особенностей, а также сформулировать суть методов борьбы с резонансными проявлениями.

**Обзор публикаций и выделение нерешенных задач.** Вопросам рассеяния энергии в многослойных конструкциях, а также реализации путей звукоизоляции с помощью пористых пластин посвящены работы [1, 2]. Борьба с аэродинамическим шумом пассивными методами изучалась, например, в работе [3]. Рассеяние энергии в механических системах при акустическом нагружении – в работе [4].

Нерешенными здесь остались вопросы установления структуры возмущенного движения по-

верхности в акустических полях, ее аналитическое описание и оценка степени влияния колебательных процессов друг на друга.

**Постановка задачи данного исследования.** Для глубокого и фундаментального исследования динамики оболочек в акустических полях следует установить структуру их координатных функций, степень влияния колебательных процессов друг на друга и значения парциальных частот.

**Изложение основного материала  
с обоснованием полученных  
научных результатов**

В эксплуатационных условиях, как известно, в акустические колебания трансформируется  $10^{-4}$  мощности реактивных двигателей. Для одного самолета стратегической бомбардировочной авиации класса В-2А, например, она составляет 1 – 4 кВт мощности акустических колебаний.

Шум реактивной струи, обладая широким спектром частот и случайным характером изменения величины звукового давления, генерирует в материале конструкции ЛА множество форм колебаний, которые в той или иной мере влияют не только на динамические характеристики, но и могут стать причиной появления необратимых деформаций поверхности, со временем развивающихся в трещины. Причиной этого служат горизонтально (SH-волна) и вертикально (SV-волна) поляризованные волны, а также их суперпозиция – эллиптическая поляризация.

Часть звуковой энергии поглощается ребрами конструкции, часть – погонной массой. Причем,

полное сопротивление, например, для космических аппаратов, определяется суммой внутреннего и механического сопротивления конструкции и сопротивления излучению в виде потока энергии из конструкции в среду.

Известны два основных пути построения теории оболочек. Первый состоит в том, что оболочку рассматривают как трехмерное упругое тело, а решения соответствующих уравнений теории упругости осуществляется путем разложения всех величин в ряды, по степеням расстояния от рассматриваемой точки до срединной поверхности, либо по некоторой системе функций этой переменной. Помимо громоздкости, этот метод имеет и другой недостаток – до сих пор не установлена область его применимости и характер сходимости используемых рядов. Вместе с тем, в настоящее время он является наиболее точным.

Второй, приближенный, подход состоит в том, что трехмерную задачу сводят к более простой – задаче о равновесии и деформации срединной поверхности оболочки. Упрощение реализуется принятием соответствующих статико-геометрических гипотез. Этот, простейший, вариант теории основан на использовании гипотез Кирхгофа-Лява, которые подразумевают:

- перпендикулярность и прямоугольность волокон оболочки к срединной поверхности и после деформации, при неизменной их длине;
- пренебрежимо малые значения нормальных напряжений на площадках, параллельных срединной поверхности, по сравнению с напряжением на площадках, ей перпендикулярных.

Построенная на базе гипотез Кирхгофа приближенная теория именуется теорией тонких оболочек, а первая – теорией толстых оболочек. Одну и ту же оболочку можно рассчитать как первым методом, так и вторым. Результаты расчета на основании приближенной теории будут тем точнее, чем меньше относительная толщина оболочки  $\frac{h}{R}$  (здесь  $h$  – толщина оболочки,  $R$  – минимальный линейный размер срединной поверхности). В настоящее время считается, что теория Кирхгофа приводит к результатам, порядок погрешности которых не превышает отношения  $\frac{h}{R}$ . Таким образом, можно сформулировать критерий тонкостенности, задаваясь допустимой величиной погрешности. В.В. Новожилов, исходя из обычной для технических расчетов погрешности, предложил считать оболочку тонкой, если  $\frac{h}{R} < \frac{1}{20}$ . Конечно, эта цифра носит ориентировочный характер.

Оценка степени влияния акустического излучения на оболочечные конструкции не может быть

произведена на основании предельного перехода от пластин плоских к пластинам искривленным. Суть в том, что явления дифракции и интерференции звуковых волн, взаимодействующих с оболочкой, имеют целый ряд специфических особенностей, в том числе и резонансного характера. Поэтому они должны найти отражение уже в самом начале – на этапе выбора расчетной модели.

*Циклически деформированное состояние* ( $2 \leq k$ ). Примем звуковое давление в падающей волне равным (рис. 1)

$$P_1 = P_{10} \exp i [\omega t - \vec{k}_0 \vec{R}_0(z, \varphi)], \quad (1)$$

где  $P_{10}$  – давление в падающей волне;  $\vec{k}_0 = \vec{n} \frac{\omega}{c}$  – волновой вектор;  $c$  – скорость звука;  $\vec{n}$  – единичный вектор направления распространения волны;  $\vec{R}_0$  – радиус-вектор точки поверхности оболочки. Тогда звуковые давления в падающей, отраженной и прошедшей волнах будут описываться соотношениями:

$$P_1 = P_{10} \exp i \times \\ \times [\omega t - k_0 (x \cos \varepsilon_1 - y \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 - z \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2)] = \\ = P_{10} \exp i \times [\omega t - k_0 \times \\ \times (R \cos \varphi \cos \varepsilon_1 - R \sin \varphi \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 - z \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2)]; \quad (2)$$

$$P_2 = P_{20} \exp i \times \\ \times [\omega t - k_0 (-x \cos \varepsilon_1 - y \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 - z \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2)] = \\ = P_{20} \exp i [\omega t - k_0 \times \\ \times (-R \cos \varphi \cos \varepsilon_1 - R \cos \varphi \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 - z \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2)]; \quad (3)$$

$$P_3 = P_{30} \exp i \times \\ \times [\omega t - k_0 (x \cos \varepsilon_1 - y \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 - z \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2)] = \\ = P_{30} \exp i [\omega t - k_0 \times \\ \times (R \cos \varphi \cos \varepsilon_1 - R \cos \varphi \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 - z \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2)]. \quad (4)$$

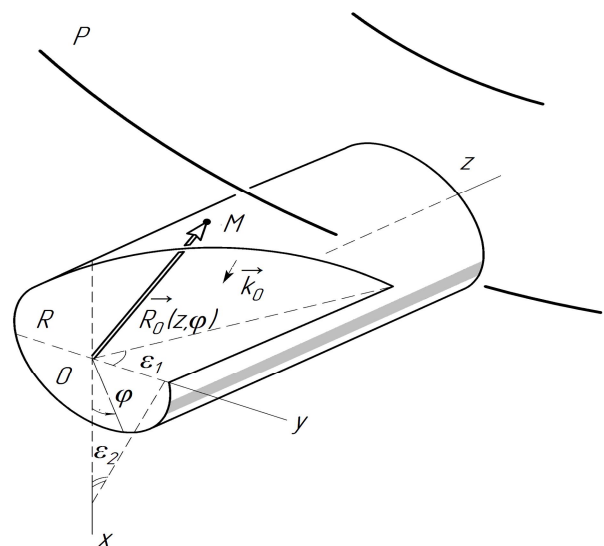


Рис. 1. Механизм воздействия проникающей акустической волны на оболочку

Внешнее динамическое воздействие на поверхность в осевом, окружном и поперечном направлениях будет определяться выражениями:

$$q_{1k}(t, z, \varphi) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} P_{10k} \times [(1+B+A) \times \exp i(\omega_k t + k_{0k} z \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2) \cos k\varphi + (1+B-A) \exp i(\omega_k t + k_{0k} z \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2) \sin k\varphi];$$

$$q_{2k}(t, z, \varphi) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} P_{10k} \times [(1+\hat{A}+\hat{\Delta}) \times \exp i(\omega_k t + k_{0k} R \sin \varphi \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2) \cos k\varphi + (1+B-A) \exp i(\omega_k t + k_{0k} z \sin \varphi \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2) \sin k\varphi];$$

$$q_{3k}(t, z, \varphi) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} P_{10k} \times [(1+B+A) \times \exp i(\omega_k t - k_{0k} R \cos \varphi \cos \varepsilon_1) \cos k\varphi + (1+B-A) \times \exp i(\omega_k t + k_{0k} R \sin k\varphi \cos \varphi \cos \varepsilon_1) \sin k\varphi],$$

а координатные функции будут строиться в виде:

$$U_z = \sum_{k=0}^{\infty} [a_k^{(1)}(t) z^2 (1-z)^2 \cos k\varphi \cos z + a_k^{(2)}(t) z^2 (1-z)^2 \sin k\varphi \sin z];$$

$$U_\varphi = \sum_{k=0}^{\infty} [b_k^{(1)}(t) z^2 (1-z)^2 \sin k\varphi \cos z + b_k^{(2)}(t) z^2 (1-z)^2 \cos k\varphi \sin z];$$

$$W = \sum_{k=0}^{\infty} [c_k^{(1)}(t) z^4 (1-z)^4 \cos k\varphi \cos z + c_k^{(2)}(t) z^4 (1-z)^4 \sin k\varphi \sin z],$$

здесь  $a_k^{(s)}, b_k^{(s)}, c_k^{(s)}$  ( $s=1, 2$ ) – коэффициенты.

Осенесимметричное деформированное состояние ( $k=1$ ). В этом случае возмущающие воздействия имеют вид:

$$q_{11}(t, z, \varphi) = 0,5 \cdot P_{10} \times [(1+B+A) \exp i(\omega_1 t + k_{01} z \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2) \cos \varphi + (1+B-A) \exp i(\omega_1 t + k_{01} z \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2) \sin \varphi];$$

$$q_{21}(t, z, \varphi) = 0,5 \cdot P_{10} \times [(1+B+A) \times \exp i(\omega_1 t + k_{01} R \sin \varphi \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2) \times \cos \varphi + (1+B-A) \exp i(\omega_1 t + k_{01} R \sin \varphi \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2) \sin \varphi];$$

$$q_{31}(t, z, \varphi) = 0,5 \cdot P_{10} \times [(1+B+A) \exp i(\omega_1 t - k_{01} R \cos \varphi \cos \varepsilon_1) \cos \varphi + (1+B-A) \exp i(\omega_1 t + k_{01} R \cos \varphi \cos \varepsilon_1) \sin \varphi],$$

а координатные функции имеют следующую структуру:

$$U_z(t, z, \varphi) = a_1^{(1)} \exp i\omega_1 t z^2 (1-z)^2 \cos \varphi \cos z + a_1^{(2)} \exp i\omega_1 t z^2 (1-z)^2 \sin \varphi \sin z;$$

$$U_\varphi(t, z, \varphi) = b_1^{(1)} \exp i\omega_1 t z^2 (1-z)^2 \sin \varphi \cos z + b_1^{(2)} \exp i\omega_1 t z^2 (1-z)^2 \cos \varphi \sin z;$$

$$W(t, z, \varphi) = c_1^{(1)} \exp i\omega_1 t z^4 (1-z)^4 \cos \varphi \cos z + c_1^{(2)} \exp i\omega_1 t z^4 (1-z)^4 \sin \varphi \sin z$$

с относительными скоростями (рис. 2):

$$\dot{U}_z(t, z, \varphi) = i\omega z^2 (1-z)^2 \times \exp i\omega_1 t (a_1^{(1)} \cos \varphi \cos z + a_1^{(2)} \sin \varphi \sin z) = i\omega U_z;$$

$$\dot{U}_\varphi(t, z, \varphi) = i\omega z^2 (1-z)^2 \times \exp i\omega_1 t (b_1^{(1)} \sin \varphi \cos z + b_1^{(2)} \cos \varphi \sin z) = i\omega U_\varphi;$$

$$\dot{W}(t, z, \varphi) = i\omega z^4 (1-z)^4 \times \exp i\omega_1 t (c_1^{(1)} \cos \varphi \cos z + c_1^{(2)} \sin \varphi \sin z) = i\omega W.$$

Выделив в плоскости шпангоута два элементарных объема  $\partial z \partial \varphi \partial W$  массы  $\partial m$ , можно построить схему возникновения Эйлеровых сил инерции, конкретнее – сил инерции Кориолиса, для двух режимов ЛА – циркуляции с угловой скоростью  $\omega_0$  и трехосной качки фюзеляжа.

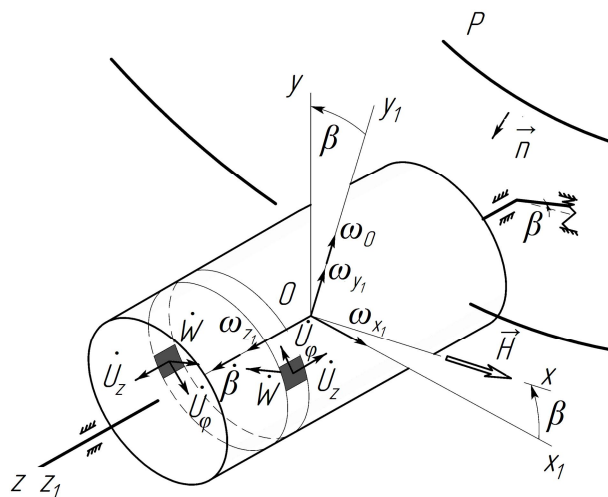


Рис. 2. Сложное движение оболочки

### Выводы и перспективы дальнейших исследований в данном направлении

В данной статье проведено глубокое и фундаментальное исследование динамики оболочек в акустических полях.

Установлены значения координатных функций оболочек, находящихся в режиме циклического на-

гружения акустическим излучением звуковой частоты. Проведена оценка координатных функций в случае антисимметричного воздействия плоской волны на упруго-податливую поверхность нулевой гауссовой кривизны.

Оценена степень влияния волнового вектора и физико-механических свойств материала на перемещения поверхности при угловом движении летательного аппарата, а также при маневрировании в виде программной циркуляции по траектории.

Предложено аналитическое обеспечение для установления влияния на поверхность подвеса диффузных звуковых полей в случае, когда наблюдается равновероятностный перенос энергии проникающего излучения внутрь объема или полупространства.

Наличие известных координатных функций позволит автоматизировать процедуру количественного и качественного анализа и, в итоге, решать множество задач оптимизации.

## Литература

1. Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения [Текст]: сб. научн. тр. – К.: ИПП АН УССР, 1989. – 174 с.

2. Дидковский, В.С. Проектирование ограждающих конструкций с оптимальными звуко- и виброизоляционными свойствами [Текст] / В.С. Дидковский, В.В. Карачун, В.И. Заборов. – К.: Будивельник, 1991. – 120 с.

3. К вопросу борьбы с акустическим шумом пассивными методами [Текст] / Ю.М. Голованев, В.В. Карачун, В.С. Дидковский, Н.Ф. Базарь, А.В. Боздуган // Пробл. прочности. – 1990. – № 9. – С. 92 – 94.

4. Рассеяние энергии в механических системах при акустическом нагружении [Текст]: сб. научн. тр. – К.: ИПП АН УССР, 1991. – 275 с.

Поступила в редакцию 15.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.М. Рыжков, Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев, Украина.

### ЦИКЛІЧНА І ОСЕНЕСИМЕТРИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ ОБОЛОНКИ В АКУСТИЧНОМУ ПОЛІ

*В.В. Карачун, В.М. Мельник*

Визначаються значення координатних функцій оболонок, що знаходяться в режимі циклічного навантаження акустичним випромінюванням звукової частоти. Здійснюється оцінка координатних функцій для антисимметричного впливу плоскої хвилі на пружно-податливу поверхню нульової гаусової кривизни. Окреслюється ступінь впливу хвильового вектора і фізико-механічних властивостей матеріалу на переміщення поверхні при кутовому русі літального апарата, а також при маневруванні у вигляді програмної циркуляції по траєкторії. Створено аналітичне забезпечення для встановлення впливу на поверхню підвісу дифузних звукових полів, коли спостерігається рівноймовірне перенесення енергії проникаючого випромінювання всередину об'єму або напівпростору.

**Ключові слова:** циклічна деформація, координатні функції, акустичне випромінювання, гаусова кривизна.

### CYCLIC AND AXIS NON-SYMMETRICAL COVER DEFORMATION IN THE ACOUSTIC FIELD

*V.V. Karachun, V.N. Mel'nick*

Values of co-ordinate functions of the covers which are in a mode cyclic loading with acoustic radiation of sound frequency are established. The estimation of co-ordinate functions in case of antisymmetric influence of a flat wave on an elastic-pliable surface zero gauss's curvature is spent. Degree of influence of a wave vector and physic mechanical properties of a material on surface movings is estimated at angular movement of a flying machine, and also at manoeuvring in the form of program circulation on a trajectory. The analytical providing is created for establishment of influence on the surface of suspension of the diffuse voice fields, when a equiprobable transfer of energy of penetrable radiation is into a volume or half-space.

**Key words:** cyclic deformation, coordinate functions, acoustic radiation, gauss's curvature.

**Карачун Владимир Владимирович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой биотехники и инженерии Национального технического университета Украины «КПИ», Киев, Украина, e-mail: karachun1@gala.net.

**Мельник Виктория Николаевна** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры биотехники и инженерии Национального технического университета Украины «КПИ», Киев, Украина, e-mail: karachun1@gala.net.