

УДК 629.7.054

**В.Н. Мельник, В.В. Карачун**

*Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев, Украина*

## **ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ОБОЛОЧЕЧНЫХ ФРАГМЕНТАХ**

*Оболочечные фрагменты в виде классического кругового цилиндра в акустической среде находятся в упруго-напряженном состоянии вследствие дифракционных эффектов. Наличие в оболочке носителя кинетического момента приводит к появлению Ейлеровых сил инерции существенно влияющих на динамику конструкции и требующих, таким образом, учета этих изменений. В работе раскрывается природа этих явлений и описывается механизм упругого взаимодействия акустического излучения высокой интенсивности с цилиндром, представленным механической системой с распределенными параметрами. Показана степень влияния координатных функций поверхности для жестких условий эксплуатационного функционирования, когда механические системы переходят в разряд импедансных. Обращено внимание на влияние маневрирования летательного аппарата для решения поставленных задач.*

***Гироскопический эффект, координатные функции, ускорение Кориолиса, оболочка***

### **Введение**

**Постановка проблемы и ее связь с научно-техническими задачами.** В режиме эксплуатационного использования летательных аппаратов, в первую очередь, перемещающихся в плотной акустической среде, возникает целый ряд особенностей состояния механических систем, подверженных совместному влиянию проникающего акустического излучения высокой интенсивности и кинематического возмущения со стороны фюзеляжа. Последнее особенно существенно для высокоманевренных аппаратов.

Проникающее акустическое излучение высокой интенсивности наблюдается при старте ЛА с поверхности носителя, из шахт, с установок мобильного базирования. Реверберационные эффекты наблюдаются также в достаточно полном объеме в режиме старта самолетов ТПА (тактической палубной авиации) и СБА (стратегической бомбардировочной авиации).

Ограничиваясь изучением только упругого взаимодействия оболочечных фрагментов с проникающим акустическим излучением, можно утверждать, что в условиях маневрирования оболочка подвергается дополнительно воздействию сил инерции Кориолиса. Если она содержит при этом носитель кинетического момента, моменты сил инерции вызовут прецессию оболочки со всеми вытекающими последствиями. В том числе резонансного типа. Речь идет об опасности проявления волнового совпадения.

Таким образом, раскрытие природы этого явления представляет не только самостоятельный интерес, но является актуальной научно-

технической задачей, неизменно интересной в приложениях.

**Обзор публикаций и выделение нерешенных задач.** Изучение свойств оболочечных конструкций имеет достаточно длительную историю [1, 2]. В гидроакустике этим вопросам уделялось, например, внимание в монографии [3]. В авиационном приборостроении – в монографиях [4, 5] и др.

Вместе с тем, в этих и других работах не раскрыт механизм и не описана природа одновременного воздействия на оболочечные конструкции с носителями кинетического момента двух факторов – качки фюзеляжа и проникающего акустического излучения. В то же время, построенные по этому принципу расчетные модели более полно отвечают реалиям натуральных условий.

**Постановка задачи данного исследования.** Расчетная модель предусматривает упруго-податливую поверхность круговой цилиндрической оболочки, находящейся под действием звуковой волны на качающемся основании. Для конкретности предполагается выполнение ЛА циркуляции.

Строится векторная модель явления, позволяющая раскрыть аналитическую сторону возмущенного движения цилиндра.

Полученные результаты могут быть использованы для многих функциональных элементов силовых устройств, комплектующих, пилотажно-навигационного оборудования и т.п.

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

Расчетную модель явления будем строить с позиций представления цилиндра как системы с распределенными параметрами. Акустическое из-

лучение приведет к упругим перемещениям поверхности оболочки в трех направлениях — вдоль ее протяженности, вдоль параллели и в радиальном направлении (в плоскости шпангоута). В условиях подвижного основания, например, при выполнении летательным аппаратом циркуляции с угловой скоростью  $\omega$ , поверхность поплавка будет испытывать действие Эйлеровых сил инерции (сил инерции Кориолиса), которые будут создавать возмущающие моменты, создающие упруго напряженное состояние поверхности (рис. 1, рис. 2).

Проанализируем природу явления и опишем аналитически механизм этого воздействия.

Выделим в плоскости среднего шпангоута два элементарных объема  $dz d\varphi dW$  массы  $dm$  (рис. 1). Под действием прошедшей акустической волны  $p$ , поверхность приобретет перемещения со скоростями  $\dot{U}_z, \dot{U}_\varphi, \dot{W}$  вдоль соответствующих направлений. В условиях маневрирования ЛА, например, циркуляции с угловой скоростью  $\omega_0$ , будут возникать ускорения Кориолиса  $\vec{W}_c$ , обусловленные наличием всех трех составляющих относительного движения:

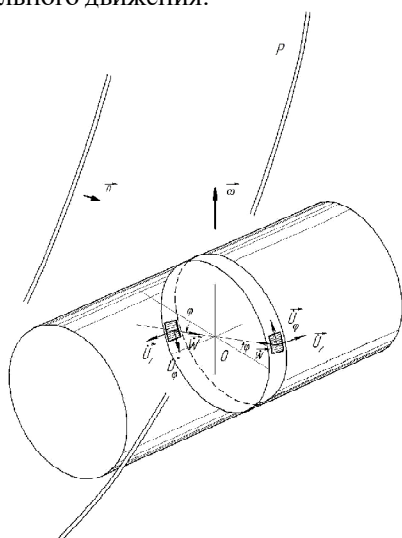


Рис.1. Дифракция звуковой волны на поплавковом подвесе гироскопа

— в направлении протяженности (рис. 2, а)

$$\vec{W}_{c1} = 2\vec{\omega} \times \vec{U}_z;$$

— в направлении параллели (рис. 2, б)

$$\vec{W}_{c2} = 2\vec{\omega} \times \vec{U}_\varphi;$$

— в плоскости шпангоута (рис. 2, в)

$$\vec{W}_{c3} = 2\vec{\omega} \times \vec{W}.$$

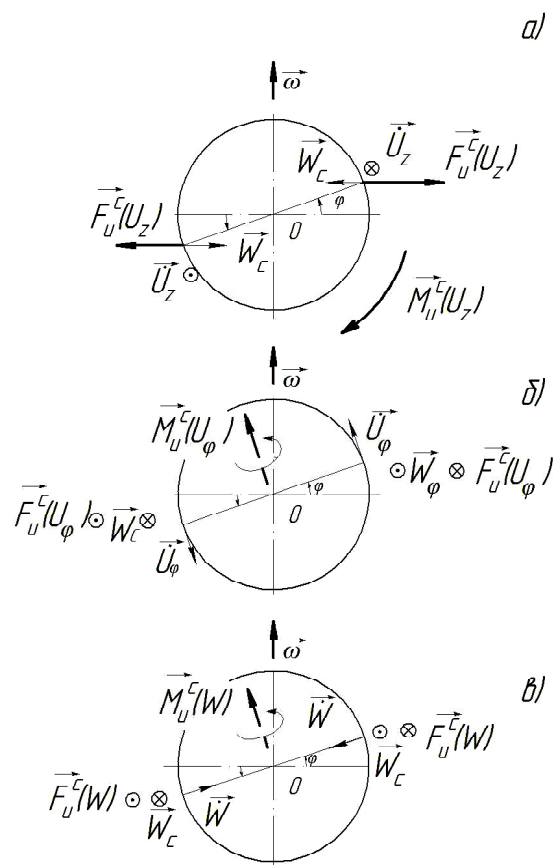


Рис. 2. Упругие перемещения поверхности в среднем шпангоуте:

- а)  $U_z$  — вдоль протяженности;
- б)  $U_\varphi$  — вдоль параллели;
- в)  $W$  — в плоскости шпангоута

Соответственно, будут возникать силы инерции Кориолиса —

$$d\vec{F}_u^c(U_z) = -dm\vec{W}_{c1};$$

$$d\vec{F}_u^c(U_\varphi) = -dm\vec{W}_{c2};$$

$$d\vec{F}_u^c(W) = -dm\vec{W}_{c3}$$

и моменты сил инерции Кориолиса —

$$dM_u^c(U_z) = 2R \sin \varphi W_{c1} dm;$$

$$dM_u^c(U_\varphi) = 2RW_{c2} dm;$$

$$dM_u^c(W) = 2RW_{c3} dm.$$

Принимая во внимание, что  $h \ll R$ , т.е. что толщина оболочки намного меньше ее радиуса, после интегрирования по всей поверхности получаем полные значения моментов сил инерции Кориолиса. Здесь через  $M$  обозначена масса подвижной части.

Таким образом, имеем:

$$M_u^c(U_z) = \int_0^{2\pi} \int_M 2R \sin \varphi W_{c1} dm d\varphi =$$

$$= \int_0^{2\pi} \frac{2W_{c1}}{R} \sin \varphi d\varphi \int_M R^2 dm = \frac{1}{R} 4I\omega_0 \dot{U}_z \sin \left( \vec{\omega}_0, \vec{U}_z \right) \times$$

$$\times \int_0^{2\pi} \sin \varphi d\varphi = \frac{1}{R} 4I\omega_0 \dot{U}_z \int_0^{2\pi} \sin \varphi d\varphi =$$

$$= \frac{4I\omega_0}{R} \dot{U}_z (-\cos \varphi)_0^{2\pi} = \frac{8I\omega_0}{R} \dot{U}_z; \quad (1)$$

$$M_u^c(U_\varphi) = \int_M 2RW_c dm = \frac{2W_c}{R} \int_M R^2 dm =$$

$$= \frac{1}{R} \cdot 4I\omega \dot{U}_\varphi \sin \left( \vec{\omega}, \vec{U}_\varphi \right) = \frac{1}{R} \cdot 4I\omega \dot{U}_\varphi \sin \varphi; \quad (2)$$

$$M_u^c(W) = \int_M 2RW_c dm = \frac{1}{R} \cdot 2W_c \int_M R^2 dm =$$

$$= \frac{1}{R} \cdot 4I\omega W \sin \left( \vec{\omega}, \vec{W} \right) = \frac{1}{R} 4I\omega \dot{W} \cos \varphi, \quad (3)$$

где  $I$  – момент инерции подвижной части подвеса относительно выходной оси.

Чтобы яснее представить механизм возникновения дополнительных погрешностей поплавкового гироскопа, спроектируем возмущающие моменты сил инерции Кориолиса на направление вектора входной величины  $\vec{\omega}$  и на вектор кинетического момента  $\vec{H}$  (рис. 3).

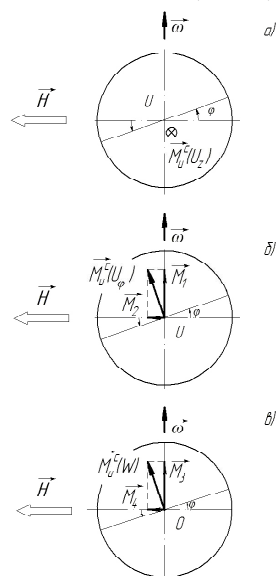


Рис. 3. Возмущающие моменты сил инерции Кориолиса

Перемещения поверхности поплавок вдоль его протяженности  $U_z(t)$ . Полное значение момента  $M_u^c(U_z)$  определяется выражением:

$$M_u^c(U_z) = \frac{1}{R} \cdot 2I\omega \dot{U}_z(t).$$

Как следует из рис. 3а, вектор момента  $M_u^c(U_z)$  направлен вдоль оси оболочки, за рисунок, и будет порождать дополнительную погрешность измерений вследствие дифракционных явлений в акустических полях. Обозначим этот момент через  $M^a$ , т.е.

$$M^a(t) = \frac{1}{R} \cdot 2I\omega \dot{U}_z(t). \quad (4)$$

Он будет содержать акустическое давление  $P_0$  и даст возможность оценить степень влияния проникающего излучения.

Перемещения поверхности поплавок вдоль параллели  $U_\varphi(t)$ . Представим вектор момента  $M_u^c(U_\varphi)$  в виде двух составляющих -  $M_1$  и  $M_2$ .

Проекции вектора момента  $\vec{M}_u^c(U_\varphi)$  сил инерции Кориолиса определяются соотношениями (рис. 3 б):

$$M_1(t) = \frac{1}{R} \cdot 4I\omega \dot{U}_\varphi(t) \sin \varphi \cos \varphi = M_\varphi \sin 2\varphi;$$

$$M_2(t) = \frac{1}{R} \cdot 4I\omega \dot{U}_\varphi(t) \sin \varphi \sin \varphi = 2M_\varphi \sin^2 \varphi, \quad (5)$$

которые после интегрирования преобразуются к виду:

$$M_1(t) = M_\varphi(t);$$

$$M_2(t) = \pi M_\varphi(t), \quad (6)$$

где  $M_\varphi(t) = \frac{1}{R} \cdot 2I\omega \dot{U}_\varphi(t)$ ;  $I$  – момент инерции подвеса.

Перемещения в плоскости шпангоута  $W(t)$ .

Проекции вектора момента  $\vec{M}_u^c(\vec{W})$  сил инерции Кориолиса на входную ось и на направление вектора  $\vec{H}$  определяется соотношениями (рис. 3 в):

$$M_3(t) = \frac{1}{R} \cdot 4I\omega \dot{W}(t) \cos \varphi \cos \varphi = 2M_W \cos^2 \varphi;$$

$$M_4(t) = \frac{1}{R} \cdot 4I\omega \dot{W}(t) \cos \varphi \sin \varphi = M_W \sin 2\varphi, \quad (7)$$

которые после интегрирования по углу  $\varphi$ , принимают следующую форму:

$$\begin{aligned} M_3(t) &= \pi M_W(t); \\ M_4(t) &= M_W(t), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $M_W(t) = \frac{1}{R} \cdot 2I\omega \dot{W}(t)$ .

Приведенные рассуждения убедительно доказывают, что наиболее опасными являются моменты – помехи  $M_1(t)$  и  $M_3(t)$ , так как вызывают прецессию оси фигуры. В то же время, моменты – помехи  $M_2(t)$  и  $M_4(t)$  не могут быть причиной девиации главной оси.

Таким образом, два возмущающих момента  $\bar{M}_1$  и  $\bar{M}_3$ , направленные в одну сторону, создают возмущающий фактор

$$\bar{M} = \bar{M}_1 + \bar{M}_3,$$

приводящий к повороту подвижной части относительно выходной оси с угловой скоростью  $\omega^a$ :

$$\begin{aligned} \bar{H} \times \bar{\omega}^a &= \bar{M}_1 + \bar{M}_3; \\ \omega^a(t) &= \frac{M_\varphi(t) + \pi M_W(t)}{H \sin\left(\hat{H}, \hat{\omega}^a\right)} = \\ &= \frac{\frac{1}{R} \cdot 2I\omega \dot{U}_\varphi(t) + \pi \cdot \frac{1}{R} \cdot 2I\omega \dot{W}(t)}{H} = \\ &= 2I\omega \frac{\dot{U}_\varphi(t) + \pi \dot{W}(t)}{HR}. \end{aligned} \quad (9)$$

Величины  $\dot{U}_\varphi(t)$  и  $\dot{W}(t)$  в качестве сомножителей будут содержать звуковое давление  $P_0$ , а также круговую частоту излучения и формула (9) эти особенности отобразит.

**Выводы и перспективы дальнейших исследований в данном направлении**

Приведенные результаты анализа убедительно подтверждают данные стендовых испытаний на промышленных образцах комплектующих.

Очевидно, что проникающее акустическое излучение высокой интенсивности служит весомым источником изменений динамических характеристик изделий. Описание механизма явления очерчивает круг задач борьбы с акустическим воздействием. Прежде всего это разработка методов шумогашения в самом источнике излучения. Во-вторых – на пути его трансляции. Тре-

ть – решение задач звукоизоляции на самом объекте.

В том случае, когда геометрические размеры цилиндра значительно превышают длину звуковой волны, в жидкости, разделяющей поплавков и корпус на некоторых поверхностях может наблюдаться явление акустики – концентрации энергии звукового излучения и, естественно, возрастание уровня звукового давления. Объяснение природы этого явления и иллюстративный материал экспериментальной проверки утверждения представлены целым рядом исследований.

Пусть на корпус больших волновых размеров, то есть  $k\alpha \gg 1$  ( $k$  – волновое число), падает плоская звуковая волна  $p$  (рис. 4). Эта волна генерирует в корпусе прибора колебания, которые распространяются по боковой поверхности цилиндра. В общем случае имеет место суперпозиция продольных и изгибных волн.

Остановимся вначале на продольных волнах. Для оболочки больших волновых размеров, а именно это мы и предполагаем, можно считать что отдельно взятый участок ее поверхности ведет себя в акустическом поле как плоская пластина. Скорость распространения продольных волн  $c_{пр}$  в оболочке совпадает со скоростью таких же волн в пластине.

Если наблюдается неравенство  $c_{пр} > c$ , то бегущая продольная волна будет излучать в подерживающую жидкость звуковую волну, причем направление ее распространения будет составлять угол  $\alpha$  с касательной к боковой поверхности корпуса. При этом выполняется соотношение.

$$c c_{пр}^{-1} = \sin \alpha.$$

Вследствие этого, значительная часть энергии акустического излучения сосредоточится вблизи окружности, касательной к лучам, определяющим направление распространения волны. Радиус этой окружности составляет (рис. 4)

$$r = R c_{пр} c^{-1}.$$

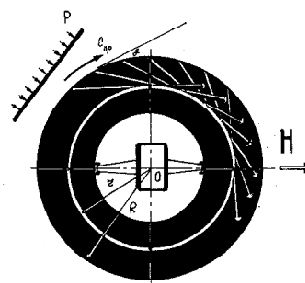


Рис. 4. Природа возникновения зон акустик

По этой же причине изгибная волна, генерируемая в корпусе, также приведет к концентрации энергии излучения вблизи окружности, но уже радиуса  $r_1$  :

$$r_1 = R c_{\text{изг}}^0 c^{-1},$$

где  $c_{\text{изг}}^0$  – скорость изгибных колебаний.

Поверхности, которые служат огибающими семейства лучей, называются каустическими поверхностями, или просто каустиками. Очевидно, что они будут возникать только в случае, когда скорость изгибных волн  $c_{\text{изг}}^0$  будет больше скорости звука в жидкости, то есть

$$c_{\text{изг}}^0 > c.$$

Расположив на этом радиусе элементы, с большим коэффициентом внутреннего поглощения можно существенно снизить опасность влияния

этих зон на поплавков гироскопа и, таким образом, на точность показаний.

### Перечень ссылок

1. Гринченко В.Т. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках: монография / В.Т. Гринченко, Н.В. Вовк. –К: Наук. думка. 1986. –238 с.
2. Гузь А.Н. Методы расчета оболочек: монография: в 5т / А.Н. Гузь, В.Д. Кубенко. –К.:Наук. думка. 1982. –400 с.
3. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики: монография / Е.Л. Шендеров. –Л.: Судостроение, 1972. –343 с.
4. Мельник В.М. Шуми і вібрація. Збурюючі чинники та їх характеристики: навч. посібник / В.М. Мельник. В.В. Карачун. –К.: Техніка, 2008. –352 с.
5. Карачун В.В. Линейно-упругий поплавок-вый подвес гироскопа: монография / В.В. Карачун, Я.Ф. Каюк, В.Н. Мельник. –К.: «Корнейчук», 2009. –240 с.

Поступила в редакцию 01.06.2010 г.

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

### THE GYROSCOPIC EFFECTS IN ENVELOPE ELEMENTS

*Оболонкові фрагменти у вигляді класичного колового циліндра в акустичному середовищі знаходяться в пружно-напруженому стані внаслідок дифракційних ефектів. Наявність в оболонці носія кінетичного моменту призводить до появи Ейлерових сил інерції суттєво впливаючих на динаміку конструкції і потребуючих, таким чином, врахування цих змін. В роботі розкривається природа цих явищ здійснюється опис механізму пружної взаємодії акустичного випромінювання високої інтенсивності з циліндром, який уявляється механічною системою з розподіленими параметрами. З'ясовано ступінь впливу координатних функцій поверхні в жорстких умовах експлуатаційного функціонування, коли механічні системи переходять до розряду імпедансних. Звернено увагу на вплив маневрування літального апарату для вирішення поставлених задач.*

#### **Гіроскопічний ефект, координатні функції, прискорення Кориоліса, оболонка**

*Shell fragments in a form of classical circular cylinder in acoustic environments appears in the elastic-stressed state due to diffraction effects. Appearance of kinetic momentum carrier in shell leads to Eulerian inertia forces appearance which significantly affect the dynamics of constructions and thus requires taking into account these changes. The nature of these phenomena is shown in this work and it is given the description of the mechanism of elastic interaction of acoustic radiation of high intensity with a cylinder, which is represented as a mechanical system with distributed parameters. It is clarified the influence of coordinate functions of surface in severe conditions of operating functioning when the mechanical system move to the impedance discharge. The attention is drawn on the impact of aircraft maneuvering for solving assigned tasks.*

#### **Gyroscopic effect, coordinate functions, Coriolis acceleration, shell**