

И. Ф. Киричок¹, Т. В. Карнаухова²

**ВЫНУЖДЕННЫЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ
И РАЗОГРЕВ ТЕРМОВЯЗКОУПРУГИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ОБОЛОЧЕК С ПЬЕЗОАКТУАТОРАМИ**

¹ *Институт механики им. С.П.Тимошенко НАНУ,
ул. Нестерова, 3, 03057, Киев, Украина; e-mail: TEPM @ inmech.kiev.ua*

² *Национальный технический университет «КПИ»,
пр. Победы, 37, 03056, Киев, Украина; e-mail: karn@inmech.kiev.ua.*

Abstract: The coupled problem is solved on forced axisymmetric vibrations and dissipative heating of electrothermoviscoelastic cylindrical shells with piezoceramic actuators under monoharmonic electromechanical loading. The temperature dependence of complex characteristics of passive and piezoactive materials is taken into account. A coupled problem of electrothermomechanics is solved by the step-by-step in time integration with use on each iteration of the method of discrete orthogonalization for integration of equations of mechanics and the explicit scheme of the finite difference method for solving the heat conductivity equations. An effect of conditions of mechanical fastening the shell faces, geometrical sizes of piezoactuator and dissipative heating temperature on active damping of forced vibrations of cylindrical shell and actuator indication is studied for the case of uniform transverse monoharmonic pressure.

Key words: forced vibrations, piezoactuator, dissipative heating, temperature, active damping, cylindrical shell.

Введение.

Цилиндрические оболочки являются одним из наиболее распространенных конструктивных элементов современной техники. В процессе эксплуатации они часто подвергаются воздействию гармонически изменяющихся во времени нагрузок и сопровождаются разогревом из-за гистерезисных потерь в материале. При этом особенно опасными являются нагрузки с частотой колебаний, совпадающей с собственной частотой оболочки. В связи с этим возникает задача демпфирования стационарных колебаний таких объектов. Для демпфирования вынужденных колебаний весьма эффективными являются активные методы, когда в структуру пассивного (без пьезоэффекта) элемента вводятся включения (актуаторы) из пьезоэлектрических материалов, к которым подводится разность электрических потенциалов определенной амплитуды и фазы для нейтрализации воздействия механического возмущения [10]. Эффективность активного демпфирования зависит от типа механических граничных условий, геометрических параметров оболочки, размеров и расположения актуаторов, электромеханических свойств пассивного и пьезоактивного материалов, уровня диссипативного разогрева. Достижения в области активного демпфирования вынужденных колебаний тонкостенных элементов конструкций в изотермической постановке задачи отображены в ряде монографий [10, 19, 20 и др.] Исследование влияния температуры диссипативного разогрева на эффективность работы актуаторов и сенсоров при контроле колебаний тонкостенных пластинок содержится в статьях [5, 11 – 16 и др.] Более подробный обзор работ этого направления дан в статье [4]. В статьях [6, 7] на основании полученных методом Бубнова – Галеркина аналитических решений исследу-

довано влияние температуры виброразогрева на активное демпфирование вынужденных осесимметричных колебаний цилиндрической оболочки с помощью пьезоактуаторов. При этом толщина актуаторов в жесткостных характеристиках, вязкоупругие свойства пьезоматериала и продольные силы инерции не учитывались.

В данной статье связанная задача о резонансных осесимметричных колебаниях и диссипативном разогреве цилиндрических оболочек с пьезоактуаторами решается численным методом. Здесь учитываются вязкоупругие свойства пьезоактивного и пассивного материалов и их зависимость от температуры, толщина пьезослоев в жесткостных модулях и продольные силы инерции.

1. Постановка задачи.

Рассмотрим цилиндрическую оболочку, состоящую из пассивного вязкоупругого изотропного слоя толщины h_0 и жестко скрепленных с его внутренней и внешней поверхностями пьезоэлектрических слоев одинаковой толщины h_1 . Оболочка длины L отнесена к цилиндрической системе координат α, θ, z с началом толщинной координаты $z = 0$ на срединной поверхности радиуса R . Пьезослой (актуаторы) изготовлены из противоположно поляризованной по толщине вязкоупругой пьезокерамики с одинаковыми свойствами, за исключением пьезоконстант, которые имеют противоположные знаки. Для конкретности принимается, что внутренний пьезослой характеризуется пьезомодулем $+d_{31}$, а внешний $-d_{31}$.

Рассмотрим два типа конструкции актуаторов. Первый, когда актуаторы выполнены в виде кольцевых электродированных накладок с координатами α_1, α_2 , которые частично покрывают цилиндрические поверхности пассивного слоя оболочки ($0 \leq \alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2 \leq L$). При этом оболочка вдоль образующей будет конструктивно неоднородной. В другом типе пьезоактуаторов пьезослой полностью покрывают цилиндрические поверхности пассивного слоя. На поверхности пьезослоев нанесены сплошные электроды, которые бесконечно тонкими разрезами с координатами α_1, α_2 разделены на электродированные участки. Электроды, контактирующие с поверхностями пассивного слоя, поддерживаются при нулевом потенциале.

Оболочка нагружена поверхностным давлением $\hat{q}_z = q_z(\alpha) \cos \omega t$, гармонически изменяющемся во времени t с круговой частотой ω , близкой к резонансной. Для компенсации этой нагрузки к внешним электродам актуатора с той же частотой в противоположной фазе подводится разность электрических потенциалов $\varphi(h_0/2 + h_1) - \varphi(-h_0/2 - h_1) = \text{Re}(2V_A e^{i\omega t})$ с амплитудой V_A , которую необходимо определить. Для моделирования вязкоупругого поведения пассивного и пьезоактивного материалов используется концепция комплексных характеристик, составляющие которых зависят от температуры диссипативного разогрева [3].

Для вышерассмотренной трехслойной оболочки принимается, что для механических переменных справедливы по всему пакету слоев гипотезы Кирхгофа – Лява. Для электрических полевых величин принято, что в пьезоактивных слоях составляющими векторов индукции D_α, D_θ и напряженности E_α, E_θ электрического поля можно пренебречь. Тогда из уравнений электростатики вытекает, что нормальные составляющие векторов индукции не зависят от толщинной координаты ($D_z = \text{const}$). В виду малой относительной толщины пьезонакладок и большой теплопроводности их материала по сравнению с материалом пассивного слоя температура диссипативного разогрева принимается постоянной по толщине пакета.

На основании принятых предположений относительно электротермомеханических величин задача об электромеханических гармонических колебаниях рассматриваемой оболочки относительно комплексных амплитудных величин сводится к решению: уравнений движения (множитель $e^{i\omega t}$ опускается) [3]:

$$\frac{dT}{d\alpha} + \hat{\rho}\omega^2 u = 0; \quad \frac{dM_1}{d\alpha} - Q_1 = 0; \quad \frac{dQ_1}{d\alpha} - \frac{T_2}{R} + \hat{\rho}\omega^2 w + q = 0; \quad (1)$$

определяющих соотношений между усилиями, моментами и параметрами деформаций

$$\begin{aligned} T_1 &= C_{11}\varepsilon_\alpha + C_{12}\varepsilon_\theta; & T_2 &= C_{12}\varepsilon_\alpha + C_{11}\varepsilon_\theta; \\ M_1 &= D_{11}\kappa_\alpha + M_E; & M_2 &= D_{12}\kappa_\alpha + M_E; \end{aligned} \quad (2)$$

выражений параметров деформаций через амплитуды перемещений

$$\varepsilon_\alpha = \frac{du}{d\alpha}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{w}{R}; \quad \kappa_\alpha = \frac{d\vartheta_1}{d\alpha}; \quad \vartheta_1 = -\frac{dw}{d\alpha}. \quad (3)$$

В уравнениях (1) – (3) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} C_{1k} &= h_0(c_{1k} + 2c_{1k}^E \delta_1); & D_{1k} &= \frac{h_0^3}{12}[c_{1k} + 2c_{1k}^E(4\delta_1^3 + 6\delta_1^2 + 3\delta_1) + 2\gamma_{33}\delta_1^3]; \\ c_{11}^E &= \frac{1}{s_{11}^E(1-\nu_E^2)}; & \nu_E &= -\frac{s_{12}^E}{s_{11}^E}; & c_{12}^E &= \nu_E c_{12}^E; & c_{11} &= \frac{E}{1-\nu^2}; & c_{12} &= \nu E; \\ b_{31} &= \frac{d_{31}}{s_{11}^E(1-\nu_E)}; & k_p^2 &= \frac{2d_{31}^2}{s_{11}^E \varepsilon_{33}^T(1-\nu_E)}; & b_{33} &= \varepsilon_{33}^T(1-k_p^2); & \gamma_{33} &= \frac{b_{31}^2}{b_{33}}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$M_E = -h_0(1+\delta_1)b_{31}V_A; \quad \delta_1 = h_1/h_0; \quad \hat{\rho} = 2\rho_*h_1 + \rho h_0;$$

$s_{1k}^E = s'_{1k}(1-i\delta_{1k}^s)$, $d_{31} = d'_{31}(1-i\delta_{31}^d)$, $\varepsilon_{33}^T = \varepsilon'_{33}(1-i\delta_{33}^e)$ – соответственно, зависящие от температуры комплексные податливости, пьезомодуль и диэлектрическая проницаемость в пьезоэлектрике ($k = 1, 2$); $E = E' + iE''$ – зависящий от температуры коэффициент вязкоупругости и $\nu = \text{const}$ коэффициент Пуассона пассивного материала; $w = w' + iw''$, $u = u' + iu''$ – комплексные амплитуды прогиба и осевого перемещения, соответственно; ρ, ρ_* – удельные плотности пассивного и пьезоактивного материалов. Здесь и далее применяются стандартные обозначения комплексных величин: $a = a' + ia''$, $|a| = (a'^2 + a''^2)^{1/2}$, $i = \sqrt{-1}$.

Для решения краевой задачи к уравнениям (1) – (3) необходимо присоединить механические граничные условия. Ниже рассмотрим случай свободного смещения оболочки в продольном направлении при жестком и жестко – шарнирном закреплении ее торцов в поперечном направлении. Соответственно, граничные условия имеют следующий вид:

$$T_1 = 0; \quad w = 0; \quad \vartheta_1 = 0 \quad \text{при} \quad \alpha = 0, \quad \alpha = L; \quad (5)$$

$$T_1 = 0; \quad w = 0; \quad \vartheta_1 = 0 \quad \text{при} \quad \alpha = 0; \quad T_1 = 0; \quad w = 0; \quad M_1 = 0 \quad \text{при} \quad \alpha = L. \quad (6)$$

При учете гистерезисных потерь в пассивном и пьезоактивном материалах уравнения гармонических колебаний оболочки (1) – (6) необходимо дополнить уравнением энергии для расчета температуры диссипативного разогрева. Для рассматриваемой оболочки усредненное по толщине пакета и за период колебаний нестационарное уравнение энергии имеет вид

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial \alpha^2} - \frac{2\alpha_n}{\lambda h} (T - T_s) + \frac{1}{\lambda h} \bar{W}, \quad (7)$$

где $h = 2h_1 + h_0$; α_n – коэффициент теплообмена на внешних поверхностях $z = \pm(h_0/2 + h_1)$; λ – усредненный коэффициент теплопроводности; a – коэффициент температуропроводности; T_s – температура внешней среды.

Диссипативная функция для составной вязкоупругой оболочки с пьезоэлектрическим актуатором определяется по формуле [3]

$$\bar{W} = \frac{\omega}{2} [C_{11}''(e_\alpha'^2 + e_\alpha''^2 + e_\theta'^2 + e_\theta''^2) + 2C_{12}''(e_\alpha' e_\theta' + e_\alpha'' e_\theta'') + D_{11}''(\kappa_\alpha'^2 + \kappa_\alpha''^2) - 2^1 b_{31}''(h_0 + h_1)(V_A' \kappa_\alpha' + V_A'' \kappa_\alpha'') + 2b_{33}''(V_A'^2 + V_A''^2)/h_1], \quad (8)$$

где C_{11}'' , C_{12}'' , D_{11}'' , b_{31}'' , b_{33}'' – мнимые составляющие жесткостных модулей (4).

Граничные условия на контурах $\alpha = 0$, $\alpha = L$ и начальное условие для уравнения теплопроводности (7), (8) таковы:

$$\frac{\partial T}{\partial \alpha} = \pm \frac{\alpha_{0,L}}{\lambda} (T - T_s) \quad (\alpha = 0, L); \quad T = T_0 \quad (t = 0), \quad (9)$$

где α_0 , α_L – коэффициенты теплообмена на торцевых поверхностях оболочки.

2. Построение решения задачи.

Для численного решения поставленной задачи уравнения гармонических колебаний (1) – (3) после некоторых преобразований представим в форме обыкновенных дифференциальных уравнений нормального вида относительно комплексных искомым величин T_1 , Q_1 , M_1 , u , w , ϑ_1 в таком виде:

$$\begin{aligned} \frac{dT_1}{d\alpha} &= -\hat{\rho}\omega^2 u; \quad \frac{dQ_1}{d\alpha} = \frac{v_c}{R} T_1 + \left(\frac{1-v_c^2}{R^2} C_{11} - \hat{\rho}\omega^2 \right) w - q_z; \\ \frac{dM_1}{d\alpha} &= Q_1; \quad \frac{du}{d\alpha} = J_c T_1 - \frac{v_c}{R} w; \\ \frac{dw}{d\alpha} &= -\vartheta_1; \quad \frac{d\vartheta_1}{d\alpha} = J_D M_1 - J_D M_E, \end{aligned} \quad (10)$$

где $J_c = 1/C_{11}$; $J_D = 1/D_{11}$; $v_c = C_{12}/C_{11}$.

При учете температурной зависимости свойств материалов данной оболочки уравнения электромеханики (10) с граничными условиями (5), (6) и уравнение теплопроводности (7) – (9) являются взаимосвязанными и нелинейными. Для их решения используется метод пошагового интегрирования во времени [3]. При этом на каждом временном шаге Δt комплекснозначная система уравнений электромеханики (10) при граничных условиях (5), (6) интегрируется численным методом дискретной ортогонализации [2] с использованием типовой программы для решения обыкновенных дифференциальных уравнений [9]. На первом шаге решается задача при изотермических электромеханических характеристиках материалов. После вычисления диссипативной функции (8) задача теплопроводности (7) – (9) решается методом конечных разностей с использованием явной схемы. Затем, в зависимости от распределения температуры, вычисляются жесткостные характеристики (4) и процесс повторяется на следующем временном интервале. При численной реализации данного подхода использованы безразмерные параметры пространственной $x = \alpha/L$ и временной $\tau = at/L^2$ координат, а также параметры теплообмена $\gamma_{n,0,L} = \alpha_{n,0,L}L/\lambda$.

Рассмотрены три способа возбуждения вынужденных колебаний оболочки. Согласно первому оболочка нагружена равномерным поверхностным давлением $q_z = q_0$.

При втором способе к электродам актуатора подводится разность электрических потенциалов с амплитудой $\pm V_A$. При третьем комбинированном способе нагружения оболочка находится под воздействием гармонического давления q_0 и с целью его компенсации с той же частотой в противофазе к внешним электродам актуатора подводится разность потенциалов $2V_A$.

С целью определения значения V_A для компенсации механической нагрузки q_0 зависимость между ними выбирается в виде линейного закона

$$V_A = k_A(\Delta)q_0, \quad (11)$$

в котором k_A – коэффициент управления; $\Delta = (\alpha_2 - \alpha_1) / L$ – безразмерная ширина актуатора.

Коэффициент k_A , по аналогии с работами [5, 17], определяется как отношение рассчитанных на частоте линейного резонанса максимальной амплитуды прогиба $|w_{p\max}^1|$ при единичной механической нагрузке ($q_0 = 1$ Па, $V_A = 0$) к максимальному прогибу $|w_{E\max}^1|$ при подводе к актуатору единичного электрического потенциала ($V_A' = 1B$, $V_A'' = 0$, $q_0 = 0$), так что

$$k_A = |w_{p\max}^1| / |w_{E\max}^1|. \quad (12)$$

Таким образом, коэффициент k_A характеризует величину электрического потенциала, которую необходимо подвести к электродам актуатора для компенсации единичной механической нагрузки. Наиболее эффективным (оптимальным) будет актуатор таких размеров Δ , при которых электрическое нагружение приводит к реализации максимальной амплитуды прогибов. Такой актуатор позволяет компенсировать механическую нагрузку наименьшим значением амплитуды потенциала, подведенным к внешним электродам актуатора. При этом коэффициент k_A будет минимальным.

3. Числовые результаты и их анализ.

Результаты расчетов представим для оболочки с пьезоактуаторами – накладками и пьезоактуаторами с разрезными электродами срединно-кольцевой конфигурации ширины Δ . Пассивный слой оболочки выполнен из полимера [8], а пьезоактивные слои – из пьезокерамики ЦТСтБС – 2 [1]. Температурные аппроксимации электромеханических модулей, удельные плотности и тепловые коэффициенты указанных материалов приведены в работах [5, 17]. Рассмотрена оболочка радиуса $R = 0,1$ м, длины $L = 0,2$ м и толщины $h_0 = 0,04$ м, на граничных поверхностях которой заданы условия конвективного теплообмена с коэффициентами $\gamma_n = \gamma_0 = \gamma_L = 0,851$. Поскольку для рассматриваемой оболочки реализуются преимущественно изгибные колебания, расчеты проводились для наиболее энергоемкой первой моды.

На рис. 1, а, б для оболочки с жестко закрепленными торцами (5) в зависимости от параметра ширины актуатора Δ показаны кривые 1 – 4 изменения первой резонансной частоты изгибных колебаний пластинки $\tilde{\omega} = \omega \cdot 10^{-5} c^{-1}$ (штрих-пунктирные линии) и рассчитанных на этих частотах максимальных амплитуд прогибов $\tilde{w}_E = |w_E^1(0,5)| \cdot 10^6$ м при подводе к электродам актуатора электрического потенциала $V_A' = 1B$; $V_A'' = 0$; $q_0 = 0$ (сплошные линии) и $\tilde{w}_p = |w_p^1(0,5)| \cdot 10^8$ м при механическом нагружении с амплитудой $q_0 = 1$ Па; $V_A' = V_A'' = 0$ (штриховые линии) для параметров относительной толщины актуатора $\delta_1 = 0; 0,25 \cdot 10^{-3}; 0,25 \cdot 10^{-2}; 0,25 \cdot 10^{-1}$, соответственно. При этом результаты, представленные на рис. 1, а, получены для случая актуаторов –

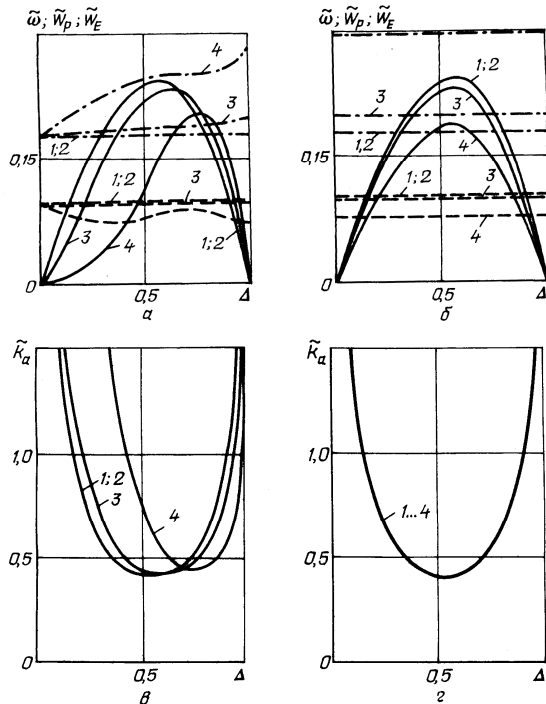


Рис. 1

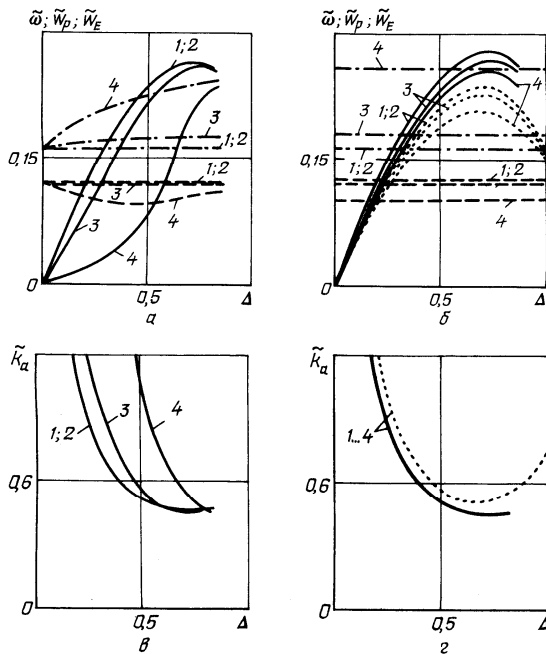


Рис. 2

В случае жестко-шарнирного закрепления торцов (б) рассматриваемой оболочки аналогичные результаты представлены на рис. 2. При этом ширина кольцевого актуатора Δ выбиралась так, чтобы ее середина совпадала с точкой $x = 0,58$ (сплошные кривые), поскольку прогибы первой моды изгибных колебаний оболочки достигают максимальных значений в этой точке. Результаты, когда середина ширины актуатора совпадает со серединой длины оболочки ($x = 0,5$), представлены пунктирными кривыми.

пьезонакладок, а на рис. 1, б – для актуаторов с разрезными электродами. Electrodes такого актуатора вне области Δ приложения потенциала – закорочены ($V_A = 0$). Зависимости коэффициента управления $\tilde{k}_a = k_a \cdot 10^2$, В/Па (12) при вышеуказанных параметрах толщины δ_1 показаны кривыми 1–4 на рис. 1, в, г для актуаторов – пьезонакладок и актуаторов с разрезными электродами, соответственно. Для актуаторов с разрезными электродами кривые 1–4 зависимостей $\tilde{k}_a(\Delta)$ совпадают между собой.

Отметим, что кривые 1, 2, рассчитанные для параметров $\delta_1 = 0$ и $\delta_1 = 0,25 \cdot 10^{-3}$, совпадают между собой и с результатами расчетов, полученными на основе аналитического решения задачи [6]. Кроме того, при указанных условиях закрепления торцов оболочки в средней точке ее длины ($x = 0,5$) прогибы являются максимальными и ширина актуатора выбирается так, чтобы его центр совпадал с этой точкой.

Из рис. 1, а видно, что рост относительной толщины δ_1 пьезоактуатора – накладки количественно и качественно влияет на зависимости собственной частоты ω , максимальных прогибов w_E и коэффициента управления k_a от параметра Δ ширины актуатора, смещая максимумы \tilde{w}_E и минимумы \tilde{k}_a в сторону увеличения значений Δ . Согласно проведенным численным расчетам и на основании аналитического решения [7] для оптимального актуатора параметр ширины $\Delta = 0,577$.

выми 1–4. Сравнение между собой результатов, представленных сплошными и пунктирными кривыми, подтверждает, что оптимальным будет актуатор, центр ширины которого совпадает с точкой продольной координаты, в которой достигаются максимальные прогибы ($x = 0,58$). Параметр ширины оптимального актуатора $\Delta \cong 0,7$ (сплошные кривые; рис. 2, *з*).

Числовые результаты, полученные для актуаторов–пьезонакладок (рис. 1, *а*, рис. 2, *а*) и актуаторов с разрезными электродами (рис. 1, *б*, рис. 2, *б*) указывают на предпочтительность актуаторов второго типа. При таком типе актуаторов собственная частота не зависит от его ширины (штрих-пунктирные кривые), а толщина пьезоактивных элементов практически не влияет на величину коэффициента управления k_a и не изменяет характер его зависимости от параметра Δ (кривые 1–4 на рис. 1, *з* и рис. 2, *з*). Анализ результатов, представленных на рис. 1, 2, показывает, что при активном демпфировании рассматриваемых оболочек механические условия закрепления их торцов заметно влияет на показатели электрического потенциала, компенсирующего механическую нагрузку, оптимальные геометрические размеры и место расположения актуаторов на поверхностях оболочки.

Для принятых размеров оболочки с жестко заземленными торцами (5) и актуатором ширины $\Delta = 0,5$ с разрезными электродами, нагруженной поверхностным давлением амплитуды $q_0 = 10^4$ Па, амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) прогибов и температурно-частотные характеристики (ТЧХ) диссипативного разогрева в средней точке $x = 0,5$ показаны кривыми 1–4 на рис. 3, 4, соответственно. Кривые 1–4 отвечают вышерассмотренным значениям параметра δ_1 , соответственно. При этом штриховые кривые рассчитаны при изотермических характеристиках ($T = T_0$) пассивного и пьезоактивного материалов, а сплошные – с учетом их зависимости от температуры диссипативного разогрева. Штрих-пунктирные кривые 1–4 рассчитаны при противофазном нагружении оболочки гармоническим давлением $q_0 = 10^4$ Па и подводе к внешним электродам пьезоактуатора соответствующего значения потенциала V_A . Значения V_A вычислялись по формуле (11), в которой для рассматриваемых параметров толщины δ_1 рассчитанные по формуле (12) коэффициенты управления $k_a \cdot 10^2 = 0,4221; 0,4238; 0,4225; 0,4139$. С этими значениями электрических потенциалов V_A на электродах актуатора проведены расчеты АЧХ и ТЧХ при отсутствии механического нагружения ($q_0 = 0$). В этом случае кривые АЧХ и ТЧХ в масштабе графиков совпали с кривыми 1–4 на рис. 3, 4 как при изотермических модулях, так и с учетом их температурной зависимости.

Анализ кривых на рис. 3, 4 показывает, что увеличение толщины пьезоактуатора сопровождается ростом собственных частот, снижением максимума амплитуд прогибов и увеличением температуры саморазогрева при вынужденных колебаниях рас-

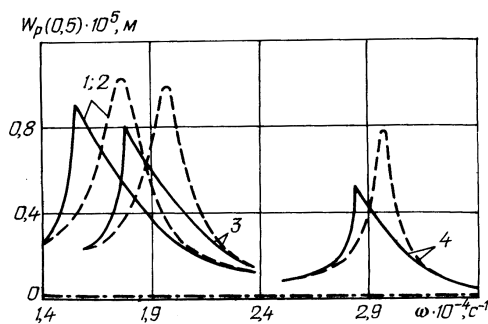


Рис. 3

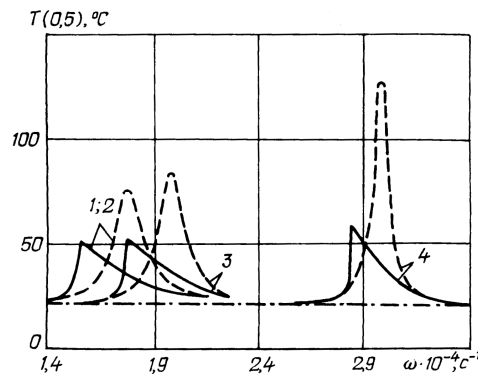


Рис. 4

смагриваемої оболочкн. Учет температурной зависимости свойств материалов (сплошные кривые) характеризуется известным эффектом [3] смещения резонансных частот в сторону уменьшения и превращением АЧХ и ТЧХ в характеристики мягкого типа. Активное демпфирование вынужденных колебаний в области резонансных частот оболочки путем подвода к электродам актуатора соответствующего электрического потенциала в противофазе к механической нагрузке приводит к снижению прогибов на два – три порядка (штрих-пунктирные линии) и снижению температуры до уровня начальной. Расчеты показали, что при учете температурной зависимости модулей пьезоматериала температурные эффекты слабо влияют на показатель пьезоактуатора V_A , который может быть рассчитан на основании изотермического подхода по формулам (11), (12). Однако расчет температурного поля необходим, поскольку в зависимости от уровня нагружения и условий теплообмена температура саморазогрева может достигнуть температуры точки Кюри, при которой актуатор теряет функциональное предназначение из-за деполяризации пьезоматериала.

Заклучение.

Исследовано влияние условий механического закрепления торцов оболочки, геометрических размеров пьезоактуатора и температуры диссипативного разогрева на активное демпфирование вынужденных колебаний цилиндрической оболочки и показатель актуатора при действии равномерного поперечного моногармонического давления. Показано, что температурные эффекты слабо влияют на показатель актуатора.

РЕЗЮМЕ. Розглянуто зв'язану задачу про вимушені осесиметричні коливання та дисипативний розігрів в'язкопружних циліндричних оболонок з п'єзокерамічними актуаторами при моногармонічному електромеханічному навантаженні. Враховано температурну залежність комплексних характеристик пасивного і п'єзоактивного матеріалів. Зв'язана нелінійна задача електротермомеханіки розв'язується методом крокового за часом інтегрування з використанням на кожній ітерації методу дискретної ортогоналізації для інтегрування рівнянь механіки і явної схеми методу скінченних різниць при розв'язанні рівняння теплопровідності. Досліджено вплив умов механічного закріплення торців оболонки, геометричних розмірів п'єзоактуатора та температури дисипативного розігріву на активне демпфювання вимушених коливань циліндричної оболонки і показник актуатора при дії рівномірного поперечного моногармонічного тиску.

1. Болкисев А.М., Карлаш В.Л., Шульга Н.А. О зависимости свойств пьезокерамических материалов от температуры // Прикл. механика. – 1984. – 20, № 7. – С. 70 – 74.
2. Годунов С.К. О численном решении краевых задач для систем обыкновенных дифференциальных уравнений // Успехи мат. наук. – 1961. – 16, вып. 3. – С. 171 – 174.
3. Карнаухов В.Г., Киричок И.Ф. Механика связанных полей в элементах конструкций: В 5-ти т.; Т. 4. Электротермовязкоупругость. – К.: Наук. думка, 1988. – 320 с.
4. Карнаухов В.Г., Киричок И.Ф., Козлов В.И. Влияние температуры диссипативного разогрева на активное демпфирование вынужденных колебаний неупругих тонких пластин при помощи пьезоэлектрических сенсоров и актуаторов // Актуальні аспекти фізико-механічних досліджень. Акустика і хвилі. – К.: Наук. думка, 2007. – С. 127 – 152.
5. Киричок І.Ф., П'ятецька О.В., Карнаухов М.В. Згинні коливання та дисипативний розігрів кільцевої в'язкопружної пластинки з п'єзоелектричними актуаторами при електромеханічному моногармонічному навантаженні // Вісн. Київ. ун-ту. Сер.: фіз.-мат. науки. – 2006. – Вип. 2. – С. 84 – 92.
6. Козлов В.І., Карнаухова Т.В., Пересунько М.В. Демпфірування вимушених осесиметричних коливань шарнірно опертої в'язкопружної циліндричної оболонки за допомогою п'єзоелектричних актуаторів // Вісн. Київ. ун-ту. Сер. фіз.-мат. науки. – 2007. – № 4. – С. 84 – 87.
7. Козлов В.І., Карнаухова Т.В., Пересунько М.В. Демпфірування вимушених осесиметричних коливань жорстко закріпленої в'язкопружної циліндричної оболонки за допомогою п'єзоелектричних актуаторів // Вісн. Київ. ун-ту. Сер. фіз.-мат. науки. – 2008. – № 1. – С. 142 – 145.

8. *Нестеренко Н.П., Червинко О.П., Сенченков И.К.* Моделирование ультразвукового разогрева структурных элементов полимерных волокнистых композитов при нормальном нагружении // Вест. Нац. техн. ун-та «ХПИ». – 2002. – № 9. – С. 3 – 8.
9. *Шинкарь А.И., Китайгородский А.Б., Борцевская С.К.* Решение линейных краевых задач для систем обыкновенных дифференциальных уравнений // Алгоритмы и программы решения задач механики твердого деформируемого тела. – К.: Наук. думка. – 1976. – С. 157 – 170.
11. *Gabbert U., Tzou H.S.* Smart structures and structronic systems. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. – 384 p.
12. *Karnaukhov V.G., Kirichok I.F., Karnaukhov M.B.* The Influence of dissipative heating on active vibration damping of viscoelastic plates // J. Eng. Math. – 2008. – **61**, N 2 – 4. – P. 399 – 411.
13. *Karnaukhova T.V., Piatetskaya E.V.* Basic Equations for Termoviscoelastic Plates with Distributed Actuators under Monoharmonic Loading // Int. Appl. Mech. – 2009. – **45**, N 2. – P. 200 – 214.
14. *Karnaukhova T.V., Piatetskaya E.V.* Damping the Resonant Flexural Vibration of a Hinged Plate with Actuators // Int. Appl. Mech. – 2009. – **45**, N 4. – P. 448 – 456.
15. *Karnaukhova T.V., Piatetskaya E.V.* Resonant Vibrations of a Hinged Viscoelastic Rectangular Plate // Int. Appl. Mech. – 2009. – **45**, N 7. – P. 762 – 771.
16. *Kirichok I.F.* Flexural Vibrations Heating of a Ring Plate with Thin Piezoceramic Pads under Single - Frequency Electromechanical Loading // Int. Appl. Mech. – 2008. – **44**, № 2. – P. 200 – 207.
17. *Kirichok I.F.* Resonant Vibration and Heating of Ring Plates with Piezoactuators under Electromechanical Loading and Shear Deformation // Int. Appl. Mech. – 2009. – **45**, N 2. – P. 215 – 222.
18. *Kirichok I.F., Karnaukhov M.V.* Single – Frequency Vibrations and Vibrational Heating of a Piezoelectric Circular Sandwich Plate under Monoharmonic Electromechanical Loading // Int. Appl. Mech. – 2008. – **44**, N 1. – P. 65 – 72.
19. *Kirichok I.F., Karnaukhov M.V.* Monoharmonic Vibrations and Vibrational Heating of a Electromechanically Loaded Circular Plate with Piezoelectric Actuators to Shear Strain // Int. Appl. Mech. – 2008. – **44**, N 9. – P. 1041 – 1049.
20. *Tzou H.S., Anderson G.L.(Eds.)* Intelligent structural Systems. – Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1992. – 453 p.
21. *Tzou H.S.* Piezoelectric Shells (Distributed Sensing and Control of Continua). – Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1993. – 400 p.

Поступила 02.12.2009

Утверждена в печать 15.06.2010

