

МРНТИ 30.19.21

М.Н. Немеребаев¹ – основной автор,
Ж.А. Шымыр², П.М. Маликтаева^{2*} | ©¹Д-р техн. наук, профессор, ²Канд. техн. наук, и.о. доцента²Таразский инновационно-гуманитарный университет,
г. Тараз, Республика Казахстан^{2*}sakosh_78@mail.ru<https://doi.org/10.55956/BSQH5296>

ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В работе представлены результаты аналитических и экспериментальных исследований динамического поведения цилиндрической оболочки тетрагональной структуры из композиционных материалов. Рассмотрены особенности геометрии сетчатых оболочек из композитных материалов. При малых значениях углов можно приближено считать, что они лежат на поверхности, близкой к цилиндрической. Такой подход позволяет сформулировать единую систему допущений, на основе которых проводится оценка малости тех или иных членов в соотношениях между деформациями и перемещениями стержней. Полученные теоретические и экспериментальные результаты совпадают с достаточно хорошей точностью, и различия между ними не превышают 8%.

Ключевые слова: оболочка, колебания, частоты, серединой поверхности, угол, каркас.



Немеребаев, М.Н. Динамическое поведение цилиндрической оболочки тетрагональной структуры из композиционных материалов [Текст] / М.Н. Немеребаев, Ж.А. Шымыр, П.М. Маликтаева // Механика и технологии / Научный журнал. – 2021. – №1(71). – С.135-143. <https://doi.org/10.55956/BSQH5296>

Введение. Предположим, что для оболочек тетрагональной структуры справедливы гипотезы Кирхгофа-Лява о жестком нормальном элементе. В соответствии с гипотезами Кирхгофа-Лява в законе Гука следует пренебречь напряжениями σ_γ по сравнению σ_α и σ_β . Таким образом, в качестве основного элемента оболочки следует рассматривать элемент средней поверхности, нагруженный усилиями и моментами.

1. Основные соотношения теории оболочек тетрагональной структуры (ОТС). Рассмотрим задачу определения частоты свободных колебаний оболочек тетрагональной структуры из композиционного материала (КМ). Исходную систему дифференциальных уравнений получим из уравнений классической теории для круговых цилиндрических оболочек с учетом инерционных сил, лишь в направлении нормального перемещения.

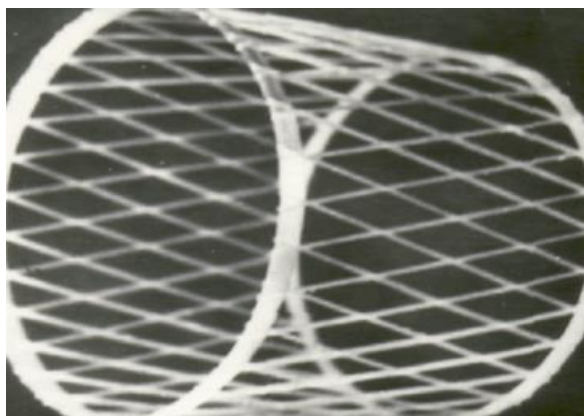


Рис. 1. Оболочка тетрагональной структуры

Уравнения равновесия согласно [1]:

$$\frac{\partial N_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{N_{\beta\alpha}}{\partial \beta} = 0; \quad \frac{\partial N_\beta}{\partial \alpha} + \frac{\partial N_{\alpha\beta}}{\partial \alpha} = 0; \quad \frac{\partial Q_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{Q_\beta}{\partial \beta} - \left(\frac{N_\beta}{R} \right) = Z$$

$$\frac{\partial M_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{M_{\alpha\beta}}{\partial \beta} = Q_\alpha; \quad \frac{\partial M_\beta}{\partial \beta} + \frac{M_{\alpha\beta}}{\partial \alpha} = Q_\beta \quad (1)$$

Формулы, связывающие компоненты деформаций с компонентами перемещений [2].

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\partial u}{\partial \alpha}; \quad \varepsilon_\beta = \frac{\partial u}{\partial \beta} + \frac{w}{R}; \quad \gamma_{\alpha\beta} = \frac{\partial u}{\partial \beta} + \frac{\partial v}{\partial \alpha}, \quad (2)$$

$$X_\alpha = -\frac{\partial^2 w}{\partial \alpha^2}, \quad X_\beta = -\frac{\partial^2 w}{\partial \beta^2}, \quad X_{\alpha\beta} = -2\frac{\partial^2 w}{\partial \alpha \partial \beta}.$$

Соотношение упругости [3]:

$$\begin{aligned} N_\alpha &= B_{11}\varepsilon_\alpha + B_{12}\varepsilon_\beta, \quad M_\alpha = C_{11}X_\alpha + C_{12}X_\beta \\ N_\beta &= B_{12}\varepsilon_\alpha + B_{22}\varepsilon_\beta, \quad M_\beta = C_{12}X_\alpha + C_{22}X_\beta \\ N_{\alpha\beta} &= B_{33}\gamma_{\alpha\beta}, \quad M_{\alpha\beta} = C_{12}X_{\alpha\beta}, \end{aligned} \quad (3)$$

где выражение для жесткостей имеют вид:

$$\begin{aligned} B_{11} &= \frac{2}{a} \left[EF \cos^4 \varphi + \left(\frac{l^2}{12EI_z} \right)^{-1} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \right], \\ B_{22} &= \frac{2}{a} \left[EF \sin^4 \varphi + \left(\frac{l^2}{12EI_z} \right)^{-1} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \right], \\ B_{12} &= \frac{2}{a} \left[EF - \left(\frac{l^2}{12EI_z} \right)^{-1} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \right], \end{aligned} \quad (4)$$

$$B_{33} = \frac{2}{a} EF \sin \varphi^2 \cos \varphi^2, \quad C_{11} = \frac{2}{a} EI_y \cos \varphi^4, \quad C_{22} = \frac{2}{a} EI_y \sin \varphi^4, \\ C_{12} = \frac{2}{a} EI_y \cos \varphi^2 \sin \varphi^2.$$

Рассматриваем только спиральные ребра симметричной структуры пакета, где α – расстояние между осями стержней; l – длина стержней.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{X_\alpha}{R} + \frac{\partial^2 \varepsilon_\beta}{\partial \alpha} - \frac{\partial^2 \gamma_{\alpha\beta}}{\partial \alpha \partial \beta} + \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \beta^2} = 0 \quad (5)$$

Поставляя значения компонентов деформации $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta, \gamma_{\alpha\beta}, X_\alpha, X_\beta, X_{\alpha\beta}$ соответственно из (2) в соотношение упругости (3), получим выражения для внутренних сил и моментов, представленных с помощью перемещении u, v, w .

$$N_\alpha = B_{11} \frac{\partial u}{\partial \alpha} + B_{12} \frac{\partial v}{\partial \beta} + B_{12} \frac{w}{R}, \\ N_\beta = B_{12} \frac{\partial u}{\partial \alpha} + B_{22} \frac{\partial v}{\partial \beta} + B_{22} \frac{w}{R}, \\ N_{\alpha\beta} = B_{33} \frac{\partial u}{\partial \beta} + B_{33} \frac{\partial v}{\partial \alpha}, \\ M_\alpha = - \left(C_{11} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + C_{12} \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \right) w, \\ M_\beta = - \left(C_{12} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + C_{22} \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \right) w, \\ M_{\alpha\beta} = -2C_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial \alpha \partial \beta}.$$

Подставляя значения моментов из (6) в последние два уравнения равновесия (1), получим для поперечных сил следующие выражения:

$$Q_\alpha = - \left(C_{11} \frac{\partial^3}{\partial \alpha^3} + 3C_{12} \frac{\partial^3}{\partial \beta^2 \partial \alpha} \right) w, \\ Q_\beta = - \left(C_{22} \frac{\partial^3}{\partial \beta^3} + C_{12} \frac{\partial^3}{\partial \alpha^2 \partial \beta} \right) w.$$

Подставляя значения внутренних сил $N_\alpha, N_\beta, N_{\alpha\beta}$ и Q_α, Q_β соответственно из (2) в первые три уравнения равновесия (1).

В такой постановке получили следующую систему уравнений равновесия в перемещениях:

$$L_{11}(B_{ik})u + L_{12}(B_{ik})v + L_{13}(B_{ik})w = 0, \\ L_{21}(B_{ik})u + L_{22}(B_{ik})v + L_{23}(B_{ik})w = 0, \\ L_{31}(B_{ik})u + L_{32}(B_{ik})v + L_{33}(B_{ik}, C_{ik})w = 0, \quad (8)$$

где для линейных дифференциальных операторов имеем:

$$\begin{aligned}
L_{12}(B_{ik}) &= L_{21}(B_{ik}) = B_{12} \frac{\partial^2}{\partial \alpha \partial \beta} + B_{33} \frac{\partial^2}{\partial \alpha \partial \beta}, \\
L_{11}(B_{ik}) &= B_{11} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + B_{33} \frac{\partial^2}{\partial \beta^2}, L_{22}(B_{ik}) = B_{22} \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} + B_{33} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2}, \quad (9) \\
L_{13}(B_{ik}) &= L_{31}(B_{ik}) = \frac{B_{12}}{R} \frac{\partial}{\partial \alpha}, L_{23}(B_{ik}) = L_{32}(B_{ik}) = \frac{B_{22}}{R} \frac{\partial}{\partial \beta}, \\
L_{33}(B_{ik}, C_{ik}) &= \left(C_{11} \frac{\partial^4}{\partial \alpha^4} + 6C_{12} \frac{\partial^4}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + C_{22} \frac{\partial^4}{\partial \beta^4} + \frac{B_{22}}{R^2} \right)
\end{aligned}$$

Уравнения (8) представляет собой соотношения технической теории цилиндрических оболочек тетрагональной структуры, записанные в перемещениях.

Уравнения технической теории цилиндрических оболочек тетрагональной структуры могут быть представлены в форме уравнений смешанного метода [3]:

$$N_\alpha = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \beta^2}, N_\beta = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2}, N_{\alpha\beta} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha \partial \beta}, \quad (10)$$

где $\varphi = \varphi(\alpha, \beta)$ – искомая функция напряжений тождественно удовлетворяющая первым двум уравнениям равновесия (1) с учетом (10) третье уравнение (1) представим в виде:

$$\frac{\partial Q_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{\partial Q_\beta}{\partial \beta} - \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} = Z. \quad (11)$$

Решая соотношения упругости (3) относительно компонентов деформации $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta, \gamma_{\alpha\beta}$, получим:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_\alpha &= A_{11}N_\alpha + A_{12}N_\beta, \\
\varepsilon_\beta &= A_{22}N_\beta + A_{12}N_\alpha, \\
\gamma_{\alpha\beta} &= A_{66}N_{\alpha\beta},
\end{aligned} \quad (12)$$

где для коэффициентов, характеризующих упругие свойства оболочки имеем:

$$\begin{aligned}
A_{11} &= \frac{B_{22}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}, A_{22} = \frac{B_{11}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}, \\
A_{12} &= \frac{-B_{12}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}, A_{66} = \frac{1}{B_{33}}. \quad (13)
\end{aligned}$$

Подставляя полученные при этом (12) совместно с (2) в уравнение неразрывности (6), получим

$$-\frac{1}{R} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} + A_{22} \frac{\partial^2 N_\beta}{\partial \alpha^2} + A_{12} \frac{\partial^2 N_\alpha}{\partial \alpha^2} - A_{66} \frac{\partial^2 N_{\alpha\beta}}{\partial \alpha \partial \beta} + A_{11} \frac{\partial^2 N_\alpha}{\partial \beta^2} + A_{12} \frac{\partial^2 N_\beta}{\partial \beta^2} = 0 \quad (14)$$

Из трех последних уравнений (1) и уравнения неразрывности (14) с учетом (7) получим следующую разрешающую систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} + \left(C_{11} \frac{\partial^4}{\partial \alpha^4} + 6C_{12} \frac{\partial^4}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + C_{22} \frac{\partial^4}{\partial \beta^4} \right) w = Z$$

$$L_2(A_{ik}) \varphi - \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \alpha^2} = 0 \quad (15)$$

$$L_2(A_{ik}) = A_{22} \frac{\partial^4}{\partial \alpha^4} + (2A_{12} + A_{66}) \frac{\partial^4}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + A_{22} \frac{\partial^4}{\partial \beta^4}$$

К системе уравнений (15) следуют присоединить граничные условия, которые для шарнирно-опертой оболочки запишутся следующим образом:

при

$$\alpha = 0, \alpha = L w = v = M_\alpha = N_\alpha = 0$$

Решение системы (15) представим в форме [1,2]:

$$w(\alpha, \beta, t) = \Phi_{mn} \sin \lambda_1 \alpha \sin \lambda_2 \beta \cos \omega_{mn} t \quad (16)$$

где F_{mn}, Φ_{mn} некоторые постоянные

$$\lambda_1 = \frac{\pi m}{L}, \quad \lambda_2 = \frac{n}{R}$$

Легко заметить, что уравнения (2) полностью удовлетворяют граничными условиями.

Подставляя (16) в систему (15), получим однородную систему уравнений относительно F_{mn} и Φ_{mn} :

$$\frac{\lambda_1^2}{R} F_{mn} - [C_{11} \lambda_1^4 + 6C_{12} \lambda_1^2 \lambda_2^2 + C_{22} \lambda_2^4] \Phi_{mn} = -\frac{2F}{a} \rho \omega_{mn}^2 \Phi_{mn} \quad (17)$$

$$[A_{22} \lambda_1^4 + (2A_{12} + A_{66}) \lambda_1^2 \lambda_2^2 + A_{11} \lambda_2^4] F_{mn} + \frac{\lambda_1^2}{R} \Phi_{mn} = 0$$

Приравнявая к нулю определитель однородной системы уравнений (17), получим формулу для нахождения частот собственных колебаний оболочки тетрагональной структуры:

$$\omega_{mn}^2 = \frac{a}{2\rho h \delta} [C_{11} \lambda_1^4 + 6C_{12} \lambda_1^2 \lambda_2^2 + C_{22} \lambda_2^4] + \frac{a \lambda_1^4}{2\rho h R^2 \delta [A_{22} \lambda_1^4 + (2A_{12} + A_{66}) \lambda_1^2 \lambda_2^2 + A_{11} \lambda_2^4]} \cdot \quad (18)$$

В качестве примера, рассмотрим оболочку по найденным экспериментальным данным частота $\omega = 395$ ГЦ, соответствует параметрам волнообразования $m=1, n=4$. Параметры оболочки берутся такими же, как в эксперименте, т.е. $\varphi = 15^\circ, R = 10.310^{-2}$ м, $h = 2.510^{-3}$ м, $\delta = 1.510^{-3}$ м, $L = 17.510^{-2}$ м, $l = 4.7510^{-2}$ м.

Пользуясь вышеизложенной методикой, с помощью соотношения (18) получены следующие значения модуля упругости E для материала оболочки:

$$E = 3,510^{10} \frac{H}{M^2}$$

Для определения эффективного модуля упругости и коэффициента Пуассона имеем [4]:

$$E_{11} = B_{11} - \frac{B_{12}^2}{B_{22}}, \quad E_{22} = B_{22} - \frac{B_{12}^2}{B_{11}}, \quad G = B_{33}, \quad \mu_{11} = \frac{B_{12}}{B_{11}}, \quad \mu_{22} = \frac{B_{12}}{B_{22}} \quad (19)$$

с учетом формул

$$\begin{aligned} B_{11} &= \left(E \cos^4 \varphi + \frac{E\delta^2}{l^2} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \right) \\ B_{22} &= \left(E \sin^4 \varphi + \frac{E\delta^2}{l^2} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \right) \\ B_{12} &= \left(E \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi - \frac{E\delta^2}{l^2} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \right) \\ B_{33} &= E \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \end{aligned} \quad (20)$$

После этого по назначению (19) вычислены упругие постоянные для угла $\varphi=15^\circ$, которые сведены в таблице 1.

Таблица 1

	n	ω , гц	E_{11} , н/м ²	E_{22} , н/м ²	μ_{11}	μ_{22}	G_{12} , н/м ²
Для сплошных оболочек	2	415					
	3	350					
	4	395	2,410 ¹⁰	1,910 ¹⁰	0,68	0,09	1.510 ⁹
	5	450					
	6	497					
Для сетчатых оболочек	4	395	6,910 ⁸	3,610 ⁶	0,071	17,7	0,2810 ⁹

2. Экспериментальное исследование колебаний оболочек тетрагональной структуры из композиционных материалов. Режимы колебания оболочек полностью определяются двумя параметрами m и n - главными числами продольных полуволн и окружных волн деформации соответственно. В качестве объекта испытаний были взяты специально изготовленные сетчатые цилиндрические оболочки, изображенные на рисунке 1. Оболочки изготавливались по специальной технологии, изложенной в работе [5]. Геометрические характеристики оболочки равно $h=0,025$ м; $L=0,175$ м; $\delta=0,015$ м; $R=0,103$ м; $\varphi=15^\circ$.

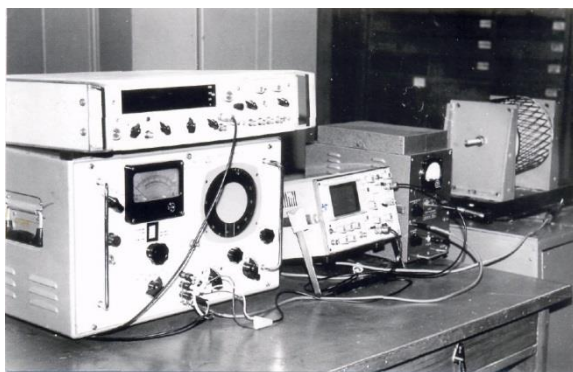
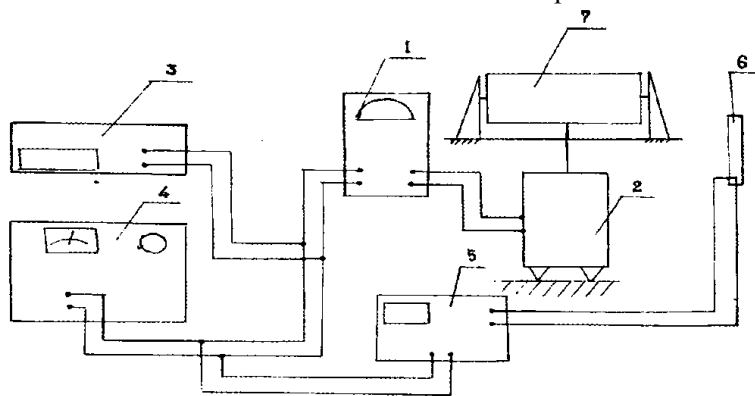


Рис. 2. Экспериментальная установка

Для моделирования шарнирно-опертого края в эксперименте использовалась тщательно обработанная круглая фанерная плитка, точно подогнанная к оболочке и обработанная таким образом, чтобы обеспечить наилучший контакт с внутренней поверхностью оболочки. Эта плита затем при помощи специального болта крепилась к опорной стойке испытательной установки.

Оболочка (7) возбуждалась в реальном направлении, причем частота возбуждения варьировалась в широких пределах и устанавливалась при помощи звукового генератора ГЗ-33 (4), сигнал с которого пропорциональной ускорению точек колеблющейся оболочки с помощью пьезошупа (6) и подавался на одну из разверток осциллографа (5). На другую развертку подавался сигнал возбуждения. В результате на экране осциллографа появлялась фигура Лиссажу. Резонансный режим, характеризующийся гармоническими колебаниями оболочки с частотой, совпадающей с частотой возбуждающей нагрузки, фиксируется по появлению на экране осциллографа эллипса. Точная установка резонансного режима приводит к сдвигу фазу сигналов на $\pi/2$, что контролируется по вертикальному положению главной оси эллипса или соответствующему смещению по фазе сигналов при переключении осциллографа на двухлучевую схему. Точное значение резонансной частоты снимается по показаниям электронного частотомера (3).



1 - блок возбуждения ПВ-4; 2 - вибратор ПВ-4; 3 - частотомер ЧЗ-38; 4 - генератор сигналов ГЗ-33; 5 - осциллограф С1-7в; 6 - пьезошуп; 7 - испытуемая сетчатая оболочка.

Рис. 3. Блок схема установки

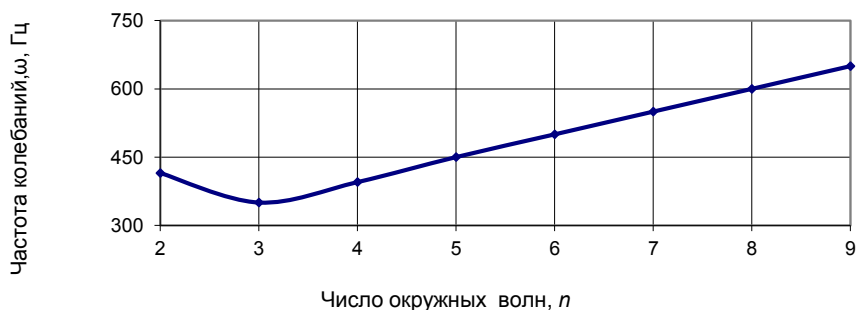


Рис. 4. Зависимость частоты колебаний от n

Для определения формы колебаний с помощью пьезощупа отыскивались узловые линии колеблющейся на резонансном режиме оболочки. Переход через узловую линию меняет фазу сигнала пьезощупа (6). Таким образом, перемещая по окружности пьезощуп и подсчитывая число изменений фаз, можно достаточно точно определить число и положение узловых линий. Согласно этой методике определялись значения собственных частот сетчатой оболочки при различных значениях числа окружных волн n , считая $m=1$. На рисунке 4 представлены экспериментальные данные для оболочки из КМ.

Заключение. В работе была показана возможность применения гипотезы Кирхгофа-Лява о жестком нормальном элементе для решения задач на собственные значения, связанных со свободными колебаниями сетчатой оболочки из КМ. Полученные теоретические и экспериментальные результаты совпадают с приемлемо хорошей точностью.

Список литературы

1. Амбарцумян, С.А. Общая теория анизотропных оболочек [Текст] / С.А. Амбарцумян. - М.: Наука, 1974. – 448 с.
2. Немеребаев, М.Н. Динамическое поведение оболочки из композиционных материалов тетрагональной структуры [Текст] / М.Н. Немеребаев, М.М. Бекмуратов, С.А. Орынбаев, Е.К. Актаев. - М.: Издательский дом академии Естествознания, 2018. - 134 с.
3. Немеребаев, М.Н. Колебаний композиционных оболочек тетраструктуры с учетом дискретности элементов [Текст] / М.Н. Немеребаев, М.М. Бекмуратов, Е.К. Актаев // "Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований". - 2018. - № 6. - С.30-37.
4. Васильев, В.В. Механика конструкций из композиционных материалов [Текст] / В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
5. Зайцев, И.М. Технологические процессы изготовления ячеистых структур из композиционного материала. Проблемы проектирования современных вертолетов [Текст] / И.М. Зайцев // «Труды Всесоюзной научной конференции. – 1977.

Материал поступил в редакцию 11.03.21.

М.Н. Немеребаев, Ж.А. Шымыр, П.М. Маликтаева

Тараз инновациялық-гуманитарлық университеті, Тараз қ., Қазақстан

КОМПОЗИЦИЯЛЫҚ МАТЕРИАЛДАРДАН ЖАСАЛҒАН ТЕТРАГОНАЛЬДЫ ҚҰРЫЛЫМНЫҢ ЦИЛИНДРЛІК ҚАБЫҒЫНЫҢ ДИНАМИКАЛЫҚ ӘРЕКЕТІ

Аңдатпа. Жұмыста композициялық материалдардан жасалған тетрагональды құрылымның цилиндрлік қабығының динамикалық әрекетін аналитикалық және эксперименттік зерттеулердің нәтижелері, композициялық материалдардан жасалған торлы қабықтардың геометриясының ерекшеліктері қарастырылған. Бұрыштардың кішкентай мәндерінде олар цилиндрге жақын жерде жатыр деп болжауға болады. Бұл тәсіл болжамдардың бірыңғай жүйесін құруға мүмкіндік береді, соның негізінде деформациялар мен өзектердің қозғалысы арасындағы қатынастарда белгілі бір мүшелердің аздығы бағаланады. Алынған теориялық және эксперименттік нәтижелер қолайлы дәлдікпен сәйкес келеді және олардың арасындағы айырмашылықтар 8%-дан аспайды.

Тірек сөздер: қабық, тербелістер, жиіліктер, беттің ортасы, бұрыш, каркас.

M.N. Nemerebaev, Z.A. Shymyr, P.M. Maliktaeva

Taraz Innovation and Humanities University, Taraz, Kazakhstan

**DYNAMIC BEHAVIOR OF A CYLINDRICAL SHELL OF A TETRAGONAL
STRUCTURE MADE OF COMPOSITE MATERIALS**

Abstract. The paper presents the results of analytical and experimental studies of the dynamic behavior of a cylindrical shell of a tetragonal structure made of composite materials. The features of the geometry of mesh shells made of composite materials are considered. For small values of the angles, it can be approximated that they lie on a surface close to a cylindrical one. This approach allows us to formulate a single system of assumptions, on the basis of which the evaluation of the smallness of certain terms in the relationship between deformations and displacements of the rods is carried out. For shells of a tetragonal structure, the Kirchhoff-Love hypotheses about a rigid normal element are valid. Thus, as the main element of the shell raasmariyat element in the middle of the surface, loaded with forces and moments. The obtained theoretical and experimental results coincide with an acceptably good accuracy, and the differences between them do not exceed 8%.

Keywords: shell, vibrations, frequencies, mid-surface, angle, frame.

References

1. Ambartsumyan S.A. Obshchaya teoriya anizotropnykh obolochek [The General theory of anisotropic shells]. - Moscow: Nauka, 1974.– 448 p. [in Russian].
2. Nemerebai M.N., Bekmuratov M.M., Orynbayev S.A., Aktau E.K. Dinamicheskoye povedeniye obolochki iz kompozitsionnykh materialov tetragonal'noy struktury [The Dynamic behavior of the shell of composite materials tetragonal structure]. - Moscow: Publishing house of the Academy of natural Science, 2018.- 134 p. [in Russian].
3. Nemerebai M.N., Bekmuratov M.M., Aktau E.K. Kolebaniy kompozitsionnykh obolochek tetrastruktury s uchetom diskretnosti elementov [Fluctuations composition shells of terstruktur taking into account the discreteness of the elements] // "International journal of applied and fundamental research". 2018, No.6, PP. 30-37 [in Russian].
4. Vasiliev V.V. Mekhanika konstruktsiy iz kompozitsionnykh materialov [Mechanics of structures made of composite materials]. - Moscow: Mashinostroenie, 1988. – 272 p. [in Russian].
5. Zaitsev I.M. Tekhnologicheskiye protsessy izgotovleniya yacheistyykh struktur iz kompozitsionnogo materiala. Problemy proyektirovaniya sovremennykh vertoletov [Technological processes of manufacturing cellular structures from composite material. Problems of designing modern helicopters] // Proceedings of the All-Union Scientific Conference, 1977 [in Russian].