МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра математической теории
упругости и биомеханики

Влияние температурных и силовых воздействий на термоупругое поведение геометрически нерегулярных пластин и оболочек

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 237 группы

направления 01.04.03 – Механика и математическое моделирование

механико-математического факультета

Вавакина Анатолия Владимировича

Научный руководитель
профессор, д.т.н., профессор ____________________ Г. Н. Белосточный
подпись, дата

Зав. кафедрой
д.ф.-м.н, профессор ____________________ Л. Ю. Коссович
подпись, дата

Саратов 2019

Введение

В различных областях современного машиностроения - авиационной и космической техники, судостроения, химического машиностроения, промышленного и гражданского строительства возникают задачи расчета тонкостенных конструкций, сочетающих в себе легкость с высокой прочностью, что и обуславливает их широкое использование. Эти требования, в ряде случаев, приводит к необходимости использовать анизотропные материалы. Конструкции и детали, изготовленные из таких материалов (в отличие от изотропных), обладают высокой несущей способностью, что значительно позволяет снизить вес конструкций с одновременным увеличением их прочности. В связи с этим одной из задач механики тонкостенных конструкций является совершенствование методов расчета (приемлемых для инженерной практики) и проектирования пластин и оболочек сложной формы с различными законами изменения толщины, отверстиями, накладками при сопряженных воздействиях физических (температурных) полей и механических (локализованных и распределенных) нагрузок.

Большинство прикладных практически важных задач теории пластин и оболочек относятся к классу краевых задач, точное аналитическое решение которых в силу различных обстоятельств (неоднородность области, нерегулярность геометрии, сложность граничных условий, нелинейность дифференциальных уравнений) определить невозможно. В этой связи единственно возможным средством для получения приемлемых по точности и затратам времени результатов при решении практически важных задач являются приближенные аналитические методы высшего анализа.

По этой причине решение статических и динамических задач несвязанной термоустойчивости указанного класса оболочек на основе точных и приближенных методов высшего анализа представляют интерес для инженерной практики. На основе таких решений, возможен предварительный количественный анализ поведения конструкций под действием силовых и температурных воздействий, предусмотренных штатными режимами эксплуатации. Подобные задачи решаются в данной работе, актуальность и новизна которых не вызывает сомнений.

Актуальность работы обусловлена тем, что геометрические нерегулярные пластины и оболочки являются одним из наиболее распространенных монтажных элементов сборных пространственных тонкостенных конструкций, широко используемых в инженерной практике. Поэтому анализ влияния температурных и силовых воздействий является необходимым при проектировании конструкций указанного класса. Кроме того, термоустойчивость геометрически нерегулярных тонкостенных конструкций, обширный класс которых, представляют собой оболочки, различные по геометрическим свойствам к настоящему времени мало изучена.

Объектом исследования являются оболочки двух видов – цилиндрическая и постоянного кручения, а также тонкостенная пластина, подкрепленная ребром жесткости, не имеющим общих точек с контуром.

Предметом исследования являются изучение зависимости критических температур геометрически нерегулярной цилиндрической оболочки, геометрически нерегулярной оболочки постоянного кручения и геометрически нерегулярных пластин, а также прогибы пластинки, частично подкрепленной ребром, не имеющим общих точек с контуром.

Целью работы является определение критических температур для геометрически нерегулярной цилиндрической оболочки, геометрически нерегулярной оболочки постоянного кручения и геометрически нерегулярной пластины, а также определение функции прогиба для пластинки, частично подкрепленной ребрами жесткости при сингулярных силовых воздействиях.

Задачами исследования являются:

1) вывод основных уравнений теории пологой геометрически нерегулярной цилиндрической оболочки и геометрически нерегулярной оболочки постоянного кручения на основе дискретно-континуальной модели из вариационного принципа Лагранжа;

2) определение решений безмоментной термоупругости для указанного класса оболочек;

3) определение (исходя из метода Галеркина) величин критических температур для геометрически нерегулярной цилиндрической оболочки нагретой до постоянной температуры;

4) определение (исходя из метода Галеркина) величин критических температур в случае геометрически нерегулярной оболочки постоянного кручения из термочувствительного материала (при линейной аппроксимации технических «постоянных»);

5) количественный анализ полученных решений;

6) определение функции прогиба для пластинки, частично подкрепленной ребрами при сингулярных силовых воздействиях.

Научная новизна данной работы заключается в том, что в ней впервые решена задача статической термоустойчивости геометрически нерегулярной оболочки постоянного кручения на базе дискретно-континуальной модели из ортотропного термочувствительного материала.

Структура и объем работы: Выпускная квалификационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников, включающего 21 наименование. Работа изложена на 53 листах машинописного текста, содержит 24 рисунка и 13 таблиц.

Выпускная квалификационная работа содержит следующие главы:

1. Основные положения и уравнения теории пологой оболочки постоянной кривизны.

2. Термоустойчисвость пологой ребристой цилиндрической оболочки, нагретой до постоянной температуры.

3. Определение критических температур для нагретой оболочки постоянного кручения.

4. Определение функции прогиба для ребристой пластинки под действием кусочно-непрерывных нагрузок и сосредоточенных сил.

5. Построение трехмерного изображения функции прогиба.

Основное содержание работы

Во введение говорится про применение тонкостенных конструкций в различных отраслях промышленности, а также говорится про сложность решения задач термоустойчивости.

В первой главе рассматриваются основные положения и уравнения теории пологой оболочки постоянной кривизны.

Во второй главе рассматривается термоустойчивость пологой ребристой цилиндрической оболочки, нагретой до постоянной температуры.

Потенциальная энергия упругой системы, состоящая из полос оболочки и ребер жесткости с учетом свойств дельта функций [1,6], запишется в виде[2]:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}\int_0^a\int_0^b \{T^{11}\varepsilon_{11} + T^{22}\varepsilon_{22} + T^{12}\varepsilon_{12} + M^{11}æ_1 + M^{22}æ_2 + 2M^{12}æ^{12} -$$

$$-T_0^{11}\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2 - T_0^{22}\left(\frac{\partial W}{\partial y}\right)^2 - 2T_0^{12}\frac{\partial W}{\partial x}\frac{\partial W}{\partial y} + \sum_{j=1}^{n}\left[E_j\mathcal{L}_jæ^{ii} - T_0^{11}\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2\right]\cdot$$

$$\cdot\,\delta(y - y_j)\}dxdy. \qquad (1)$$

Усилия, моменты и геометрические соотношения, входящие в (1), определяются формулами:

$$T^{11} = B_1\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \nu_2\frac{\partial v}{\partial y} - \nu_2 k_{11}W\right),\quad T^{22} = B_2\left(\frac{\partial v}{\partial y} + \nu_1\frac{\partial u}{\partial x} - \nu_2 k_{11}W\right),$$

$$T^{12} = Gh\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right),\quad M^{12} = 2D_k\left(-\frac{\partial^2 W}{\partial x\partial y} + k_{11}\frac{\partial v}{\partial x}\right),$$

$$M^{11} = D_1\left(-\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \nu_2\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \nu_2 k_{11}\frac{\partial v}{\partial y}\right),$$

$$M^{22} = D_2\left(-\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \nu_1\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + k_{11}\frac{\partial v}{\partial y}\right), \qquad (2)$$

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u}{\partial x},\quad \varepsilon_{22} = \frac{\partial v}{\partial y} + k_{11}W,\quad æ^{12} = -\frac{\partial^2 W}{\partial x\partial y} + k_{11}\frac{\partial v}{\partial x},\quad æ_1 = -\frac{\partial^2 W}{\partial x^2},$$

$$æ_2 = -\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + k_{11}\frac{\partial v}{\partial y}.$$

Где:

$$D_1 = \frac{E_1 h^3}{12(1-\nu_1\nu_2)}, \qquad D_2 = \frac{E_2 h^3}{12(1-\nu_1\nu_2)}, \qquad D_k = \frac{Gh^3}{12}.$$

$E_j\mathcal{L}_j -$ жесткость изгиба $j -$ го ребра.

Тогда из вариационного уравнения Лагранжа:

$$\delta\mathcal{L} = 0, \tag{3}$$

получим дифференциальные уравнения равновесия указанной упругой системы в перемещениях.

$$\begin{gathered}
\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{Gh}{B_1}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \left(\nu_2 + \frac{Gh}{B_1}\right)\frac{\partial^2 \upsilon}{\partial x \partial y} - \nu_2 k_{11}\frac{\partial W}{\partial x} = 0,\\
\frac{\partial^2 \upsilon}{\partial y^2} + \frac{Gh}{B_2}\frac{\partial^2 \upsilon}{\partial x^2} + \left(\nu_1 + \frac{Gh}{B_2}\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} - k_{11}\frac{\partial W}{\partial y} = 0,\\
\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2\left(\nu_2 + 2\frac{D_k}{D_1}\right)\frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{E_2}{E_1}\frac{\partial^4 W}{\partial y^4} + \frac{B_2}{D}k_{11}^2 W - \frac{B_2}{D_1}k_{11}\left(\frac{\partial \upsilon}{\partial y} + \nu_1\frac{\partial u}{\partial x}\right) +\\
+\sum_{j=1}^{n}\delta(y-y_j)\frac{E_j\mathcal{L}_j}{D_1}\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} - \frac{1}{D_1}T_0^{11}\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \sum_{j=1}^{n}\frac{T_0^{11}}{D_1}\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}\delta(y-y_j) = 0.
\end{gathered} \tag{4}$$

$$\begin{gathered}
T_0^{11} = -B_1(1-\nu_1\nu_2)\alpha_1\theta, \qquad T_0^{22} = 0; \quad T_0^{12} = 0,\\
\upsilon^0 = (\alpha_2 + \nu_1\alpha_1)\theta y, \qquad U^0 = 0.
\end{gathered} \tag{5}$$

Здесь (5) является решением безмоментной термоустойчивости геометрически нерегулярной цилиндрической оболочки [5]:

Рассмотрим случай, когда на краях оболочки выполняются следующие условия:

$$\begin{gathered}
u = 0, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial \upsilon}{\partial x} = 0, \qquad W = 0, \quad \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = 0 \qquad \text{при } x = 0, x = a;\\
u = 0, \frac{\partial \upsilon}{\partial y} + \nu_1\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad W = 0, \quad \frac{\partial^2 W}{\partial y} = 0 \qquad \text{при } y = 0, y = b.
\end{gathered} \tag{6}$$

Решение системы дифференциальных уравнений (5), удовлетворяющих граничным условиям (6) зададим в виде:

$$u = A_{km}\varphi(x)\psi(y); \quad v = B_{km}\rho(x)\chi(y); \quad W = C_{km} sin\frac{k\pi x}{a} sin\frac{m\pi y}{b}; \qquad (7)$$

где $\varphi(x) = \left(\frac{x}{a}\right)^{2k} - \left(\frac{x}{a}\right)^{4k}$; $\quad \psi(y) = \left(\frac{y}{b}\right)^{2m} - \left(\frac{y}{b}\right)^{4m}$;

$$\rho(x) = \frac{1}{3}\left(\frac{x}{a}\right)^{3k} - \frac{1}{5}\left(\frac{x}{a}\right)^{5k}; \quad \chi(y) = \frac{1}{3}\left(\frac{y}{b}\right)^{3m} - \frac{1}{5}\left(\frac{y}{b}\right)^{5m}.$$

Приравнивая к нулю определитель, полученный в результате применения процедуры Галеркина к системе (5), получим разрешающие уравнение для определения критической температуры, из которого находим:

$$\theta\left(\frac{b}{h}\right)^2 \alpha_1 = \frac{M_{33}^1 + 2M_{33}^p + \frac{4}{l}\left(\frac{\delta}{h}\right)^2\left[\frac{A}{B}\right]}{12(1-\nu_1\nu_2)\left(\frac{k\pi}{l}\right)^2\left[1 + \sum_{j=1}^{n}\frac{b_j^p}{h}\frac{h_j^p}{h} sin^2\frac{m\pi y_j}{b}\right]}. \qquad (8)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов для материала КАСТ-Б ($E_1 = 213 \cdot 10^8\ {}^{\text{Н}}/_{\text{м}^2}$; $E_2 = 121 \cdot 10^8\ {}^{\text{Н}}/_{\text{м}^2}$; $G = 20{,}1 \cdot 10^8\ {}^{\text{Н}}/_{\text{м}^2}$; $\nu_2 = 0{,}19$; $\alpha_2 = 2\alpha_1$)

k	$\frac{\delta}{h}$	n	$\frac{\mathcal{L}_j}{bh^3}$	$\theta\left(\frac{b}{h}\right)^2\alpha_1$	$\frac{a}{b}$
1	0	0	0	1,9681	1,15
		1	0,5	2,3388	1,31
	1	0	0	4,1708	0,68
		1	0,05	5,1267	0,82
		3	0,05	6,2730	0,92
		3	1	7,7710	1,03
	2,5	0	0	9,0596	0,47
		1	0,05	11,3698	0,58
		3	0,05	13,9683	0,60
		3	1	17,4737	0,68
	5	0	0	17,5903	0,33

		1	0,05	22,1930	0,38
		3	0,05	27,3628	0,41
		3	1	34,3505	0,48

В третьей главе рассматривается термоустойчивость оболочки постоянного кручения.

Система дифференциальных уравнений статической термоустойчивости в перемещениях запишется в виде [1,2,6]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{Gh}{B_1}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \left(\nu_2 + \frac{Gh}{B_1}\right)\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} - 2\frac{Gh}{B_1}k_{12}\frac{\partial W}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{Gh}{B_2}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \left(\nu_1 + \frac{Gh}{B_2}\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} - 2\frac{Gh}{B_2}k_{12}\frac{\partial W}{\partial x} = 0, \tag{9}$$

$$D_1\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2(D_1\nu_1 + 2D_k)\frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + D_2\frac{\partial^4 W}{\partial y^4} + 4Ghk_{12}^2 W -$$

$$-2Ghk_{12}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \sum_{i=1}^{n}\left[E_{2i}\mathcal{L}_i\frac{\partial^4 W}{\partial y^4} + T_{2i}^{p}\frac{\partial^2 W}{\partial y^2}\right]\delta(x - x_i) + T_0^{11}\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} +$$

$$+T_0^{22}\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + 2T_0^{12}\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} = 0.$$

Выразим перемещения u, v, w через функцию перемещений ϕ:

$$u = 2k_{12}\frac{Gh}{B_2}\left[\frac{E_2}{E_1}\frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} - \nu_2\frac{\partial^3 \phi}{\partial x^2 \partial y}\right],$$

$$v = 2k_{12}\frac{Gh}{B_2}\left[\frac{\partial^3 \phi}{\partial y^3} - \nu_2\frac{\partial^3 \phi}{\partial x \partial y^2}\right], \tag{10}$$

$$W = \frac{Gh}{B_2}\left[\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + \left(\frac{E_2}{G} - 2\nu_2\right)\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{E_2}{E_1}\frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4}\right].$$

Система (9) подстановкой (10) сводится к одному однородному дифференциальному уравнению 8-го порядка:

$$\frac{\partial^8 \phi}{\partial x^8} + \left[\frac{E_2}{G} + 4(1 - \nu_1\nu_2)\frac{G}{E_1}\right]\frac{\partial^8 \phi}{\partial x^6 \partial y^2} + 2[\frac{E_2}{E_1} + \left(\frac{E_2}{G} - 2\nu_2\right)(\nu_2 +$$

$$+2(1 - \nu_1\nu_2))\frac{G}{E_1}]\frac{\partial^8 \phi}{\partial x^4 \partial y^4} + \left[\frac{E_2}{G} + 4(1 - \nu_1\nu_2)\frac{G}{E_1}\right]\frac{E_2}{E_1}\frac{\partial^8 \phi}{\partial x^2 \partial y^6} +$$

$$+\left(\frac{E_2}{E_1}\right)^2\frac{\partial^8\phi}{\partial y^8}+\frac{48}{a^2b^2}\frac{E_2}{E_1}\left(\frac{\delta}{h}\right)^2(1-\nu_1\nu_2)\frac{\partial^4\phi}{\partial x^2\partial y^2}+$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\{\frac{E_{2i}^{p}\mathcal{L}_i^p}{D_1}\left[\frac{\partial^8\phi}{\partial x^4\partial y^4}+\left(\frac{E_2}{G}-2\nu_2\right)\frac{\partial^8\phi}{\partial x^2\partial y^6}+\frac{E_2}{E_1}\frac{\partial^8\phi}{\partial y^8}\right]+ \qquad (11)$$

$$+\frac{T_{2i}^{p}}{D_1}\left[\frac{\partial^6\phi}{\partial x^4\partial y^2}+\left(\frac{E_2}{G}-2\nu_2\right)\frac{\partial^8\phi}{\partial x^2\partial y^6}+\frac{E_2}{E_1}\frac{\partial^8\phi}{\partial y^8}\right]\}\delta(x-x_i)-$$

$$-\frac{1}{D_1}\left(T_0^{11}\frac{\partial^2}{\partial x^2}+2T_0^{12}\frac{\partial^2}{\partial x\partial y}+T_0^{22}\frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)[\frac{\partial^4\phi}{\partial x^4}+\left(\frac{E_2}{G}-2\nu_2\right)\frac{\partial^4\phi}{\partial x^2\partial y^2}+$$

$$+\frac{E_2}{E_1}\frac{\partial^4\phi}{\partial y^4}]=0.$$

Решение (11) тождественно удовлетворяющие всем краевым условиям шарнирного закрепления, предварительно переписанным через функцию ϕ, задается в виде:

$$K_5(\gamma\beta)\left(\frac{a}{h}\right)^2\alpha_{10}\theta^5+K_4(\gamma\beta+\gamma)\left(\frac{a}{h}\right)^2\alpha_{10}\theta^4+\left[K_3'(\gamma)+K_3''(\gamma\beta+\gamma)\left(\frac{a}{h}\right)^2\alpha_{10}\right]$$

$$\cdot\theta^3+\left[K_2'(\gamma)+K_2''(\beta+\gamma)\left(\frac{a}{h}\right)^2\alpha_{10}\right]\theta^2+\left[K_1'(\gamma)+K_1''\left(\frac{a}{h}\right)^2\alpha_{10}\right]\theta+K_0=0.$$

В таблицах 2, 3 приводятся численные значения критических температур для материала КАСТ-Б ($E_1=213\cdot10^8\ \text{Н}/\text{м}^2$; $E_2=121\cdot10^8\ \text{Н}/\text{м}^2$;

$G=20{,}1\cdot10^8\ \text{Н}/\text{м}^2$; $\nu_2=0{,}19$; $\alpha_2=2\alpha_1$) при следующих параметрах ребра

$\frac{h_i^p}{h}=3$; $\frac{a_i^p}{a}=0{,}01$.

Таблица 2 – Результаты расчетов для материала КАСТ-Б

$\beta_1=\beta_2=\gamma_1=\gamma_2=0$						
$\frac{b}{a}$	n	$\frac{\delta}{h}$	$\frac{\mathcal{L}_i^p}{ah^3}$	$\theta_{кр}\left(\frac{a}{h}\right)^2\alpha_{10}$	$\frac{b}{a}$	$\theta_{кр}\left(\frac{a}{h}\right)^2\alpha_{10}$
		1	0	2,7531		1,2064
			0,01	3,1801		1,2898
			0,05	4,8912		1,6232
	1	5	0	3,3985		1,6717

0,5			0,01	3,8226	0,9	1,7550
			0,05	5,5366		2,0895
	3	1	0	2,7531		1,2064
			0,01	3,6083		1,3731
			0,05	7,0294		2,0400
		5	0	3,3984		1,6717
			0,01	4,2537		1,8384
			0,05	7,6748		2,5052

Таблица 3 – Результаты расчетов для материала КАСТ-Б

$\theta_{кр}\left(\frac{b}{a}=0{,}5;\ \frac{\mathcal{L}_p}{ah^3}=0{,}05;\ \frac{\delta}{h}=2{,}5; n=3\right)$					
$\frac{a}{h}$	$\beta=\gamma=0$	$\beta\neq 0;\ \gamma=0$		$\beta=0;\ \gamma\neq 0$	
100	56,8054	β	55,7989	γ	56,9019
		2β	54,8596	2γ	57,0024
		3β	54,6269	3γ	57,1073
75	100,9874	β	97,8897	γ	101,2973
		2β	95,1357	2γ	101,6112
		3β	94,4720	3γ	101,9925
50	227,2217	β	212,6090	γ	228,8675
		2β	201,0799	2γ	230,8364
		3β	198,4670	3γ	233,2451

В четвертой главе определяются функции прогиба для ребристой пластинки под действием кусочно-непрерывной нагрузки и сосредоточенной силы.

На основании стандартных процедур метода Галеркина были получены разрешающие уравнения для нахождения прогибов пластинки под действием кусочно-непрерывной нагрузки и сосредоточенной силы.

Далее проводился количественный анализ функции прогиба указанной упругой системы «пластинка-ребро». Было рассмотрено пять случаев зависимости относительного прогиба W^* от $\left(\frac{h_1}{h}\right)$, где $\left(\frac{h_1}{h}\right)$ отношение высоты ребра к длине пластины.

Результаты представлены в таблицах 4-8.

1) $x_0 = \frac{a}{2}$; $x = \frac{a}{2}$; $y_0 = \frac{b}{2}$; $x_1 = \frac{a}{2}$; $y_1 = \frac{a}{2}$; $y_2 = \frac{3a}{4}$; $y = \frac{5a}{8}$; $a = b$;

$$\frac{a_1}{a} = 0{,}01$$

Таблица 4 – Значение функции прогиба при условиях 1

$\frac{h_1}{h}$	$W^* = W/\frac{q_0 a^4}{D}$
2	0,00105
3	0,00099
4	0,00089
5	0,00078

2) $x_0 = \frac{a}{2}$; $y_0 = \frac{b}{2}$; $x_1 = \frac{2a}{3}$; $x = \frac{a}{3}$; $y_1 = \frac{a}{3}$; $y_2 = \frac{2a}{3}$; $y = \frac{a}{2}$; $a = b$;

$$\frac{a_1}{a} = 0{,}01$$

Таблица 5 – Значение функции прогиба при условиях 2

$\frac{h_1}{h}$	$W^* = W/\frac{q_0 a^4}{D}$
2	0,00088
3	0,00085
4	0,00078
5	0,00070

3) $x_0 = \frac{a}{2}$; $y_0 = \frac{b}{2}$; $x_1 = \frac{a}{3}$; $x = \frac{a}{3}$; $y_1 = \frac{a}{4}$; $y_2 = \frac{3a}{4}$; $y = \frac{a}{3}$; $a = b$;

$$\frac{a_1}{a} = 0{,}01$$

Таблица 6 – Значение функции прогиба при условиях 3

$\frac{h_1}{h}$	$W^* = W/\frac{q_0 a^4}{D}$
2	0,00088
3	0,00083
4	0,00075
5	0,00065

4) $x_0 = \frac{a}{2};\ y_0 = \frac{b}{2};\ x_1 = \frac{4a}{5};\ x = \frac{4a}{5}\ ;\ y_1 = \frac{2a}{5};\ y_2 = \frac{4a}{5}; y = \frac{3a}{5}; a = b;$

$$\frac{a_1}{a} = 0{,}01$$

Таблица 7 – Значение функции прогиба при условиях 4

$\frac{h_1}{h}$	$W^* = W/\frac{q_0 a^4}{D}$
2	0,00063
3	0,00061
4	0,00058
5	0,00054

5) $x_0 = \frac{a}{2};\ y_0 = \frac{b}{2};\ x_1 = \frac{5a}{6};\ x = \frac{5a}{6}\ ;\ y_1 = \frac{a}{4};\ y_2 = \frac{3a}{4}; y = \frac{a}{2}; a = b;$

$$\frac{a_1}{a} = 0{,}01$$

Таблица 8 – Значение функции прогиба при условиях 5

$\frac{h_1}{h}$	$W^* = W/\frac{q_0 a^4}{D}$
2	0,00051
3	0,00050
4	0,00049

5	0,00046

Количественный анализ показал, что во всех случаях прогибы в точках убывают с увеличением относительной высоты ребра.

Заключение

1) Выведены основные уравнения теории пологой цилиндрической оболочки и оболочки постоянного кручения на основе дискретно-континуальной модели из вариационного принципа Лагранжа;

2) получено решение безмоментной термоупругости для указанного класса оболочек;

3) определены (исходя из метода Галеркина) величины критических температур для геометрически нерегулярной цилиндрической оболочки нагретой до постоянной температуры;

4) определены (исходя из метода Галеркина) величины критических температур в случае оболочки постоянного кручения из термочувствительного материала;

5) проведен количественный анализ полученных решений;

6) определена функция прогиба для пластинки, частично подкрепленной ребрами при сингулярных силовых воздействиях.

Список использованных источников

1 Антосик, П., Микусинский, Я., Сикорский, Р. Теория обобщенных функций: секвенциальный подход / П. Антосик, Я. Микусинский, Р. Сикорский, М.: Мир, 1976. - 311 с.

2 Назаров, А. А. Основы теории и методы расчета пологих оболочек / А.А. Назаров. Л.: Стройиздат, 1966. - 303 с.

3 Рассудов, В. М., Красюков, В. П., Панкратов, Н. Д. Некоторые задачи термоупругости пластинок и пологих оболочек / В. М. Рассудов, В. П. Красюков, Н. Д. Панкратов. С.: Саратовский университет, 1973. - 154 с.

4 Новожилов, В. В. Теория тонких оболочек / В. В. Новожилов. Л.: Судпромгиз, 1962. - 431 с.

5 Прикладная механика. Основы теории оболочек: учеб. пособие / П.А. Жилин. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. - 167 с.

6 Канторович, Л. В., Крылов, В. И. Приближенные методы высшего анализа / Л. В. Канторович, В. И. Крылов. Л.: Физматгиз, 1962. - 708 с.