



# Устойчивость ортотропных оболочек под воздействием динамической нагрузки

И.В. Каменев, СПбГКУ «ЦРТПиПЧС»

## Вид рассматриваемых конструкций

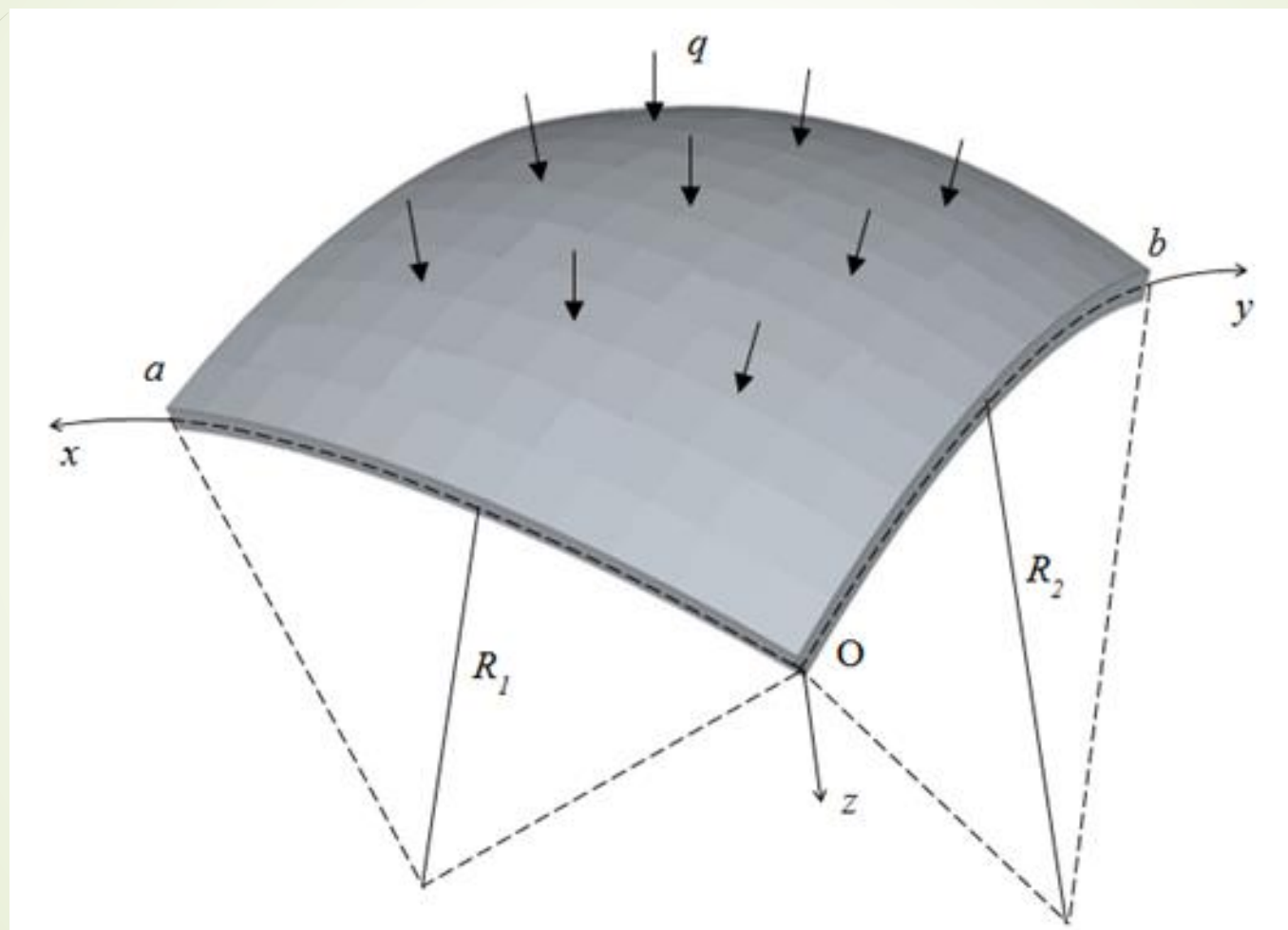


Рисунок 1. Схематичное изображение полой оболочки

# Уравнения в смешанной форме

3/10

$$\begin{aligned}
 & \left( k_x F_1(\Phi) + k_y F_2(\Phi) \right) - \frac{\partial}{\partial x} (F_1(\Phi)\theta_1 + F_3(\Phi)\theta_2) - \\
 & - \frac{\partial}{\partial y} (F_2(\Phi)\theta_2 + F_3(\Phi)\theta_1) + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + q = h\rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}; \\
 & \frac{\partial}{\partial x} \left[ -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{G_{12}} F_3(\Phi) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{E_2 h} F_2(\Phi) - \frac{\mu_{12}}{E_1 h} F_1(\Phi) \right) \right] + \\
 & + \frac{\partial}{\partial y} \left[ -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{G_{12}} F_3(\Phi) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{E_1 h} F_1(\Phi) - \frac{\mu_{21}}{E_2 h} F_2(\Phi) \right) \right] = \quad (1) \\
 & = -(\tilde{\chi}_{12}^2 - \tilde{\chi}_1 \tilde{\chi}_2 + k_x \tilde{\chi}_2 + k_y \tilde{\chi}_1); \\
 & \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{E_1 h^3}{12(1 - \mu_{12}\mu_{21})} (\chi_1 + \mu_{21}\chi_2) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{h^3}{12} G_{12} \chi_{12} \right) - Q_x = 0; \\
 & \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{E_2 h^3}{12(1 - \mu_{12}\mu_{21})} (\chi_2 + \mu_{12}\chi_1) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{12} G_{12} \chi_{12} \right) - Q_y = 0;
 \end{aligned}$$

где:

$$\theta_1 = -\frac{\partial W}{\partial x}, \theta_2 = -\frac{\partial W}{\partial y}; \quad \chi_1 = \frac{\partial \Psi_x}{\partial x}; \quad \chi_2 = \frac{\partial \Psi_y}{\partial y}; \quad \chi_{12} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \Psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \Psi_y}{\partial x} \right).$$

# Расчетные параметры

Номер варианта геометрии	Параметр геометрии	Вариант геометрии		
		1	2	3
1	$h$ , м	0.09	0.09	0.09
2	$a = b$ , м	5.4	10.8	18
3	$R_1 = R_2$ , м	20.25	40.05	45.27

Физический параметр	Название материала			
	M60J/Ероху	AS/3501/Ероху	E-Glass/Ероху	T10 UPE22-27
$E_1$ , МПа	330 000	138 000	60 700	29 400
$E_2$ , МПа	59 000	8 960	24 800	17 800
$G_{12} = G_{13} = G_{23}$ , МПа	3 900	7 100	12 000	3 010
$\mu_{12}$	0.320	0.300	0.230	0.123
$\mu_{21}$	0.057	0.019	0.094	0.074
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1 500	1 540	1 800	1 800

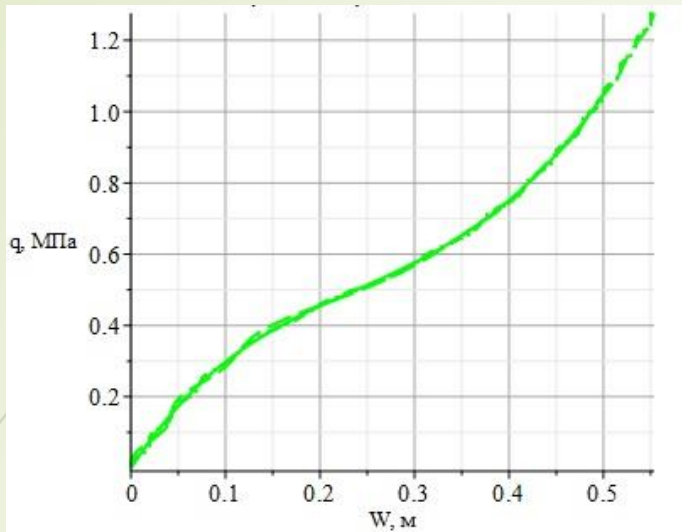


Рисунок 2. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для M60J варианта 1

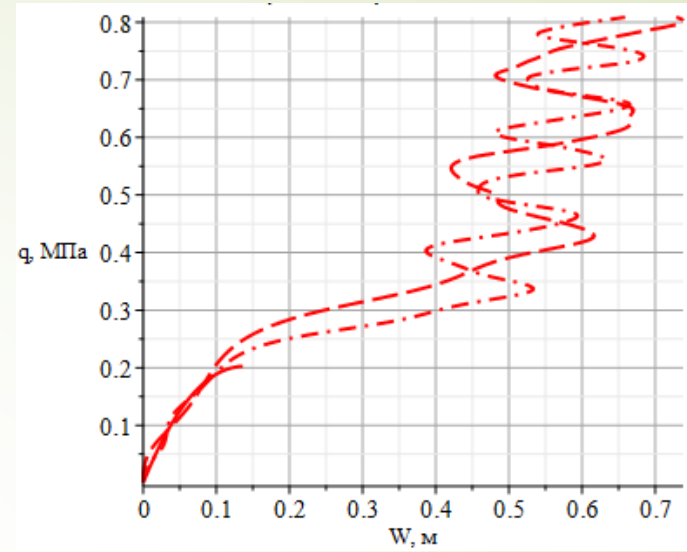


Рисунок 3. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для AS/3501 варианта 1

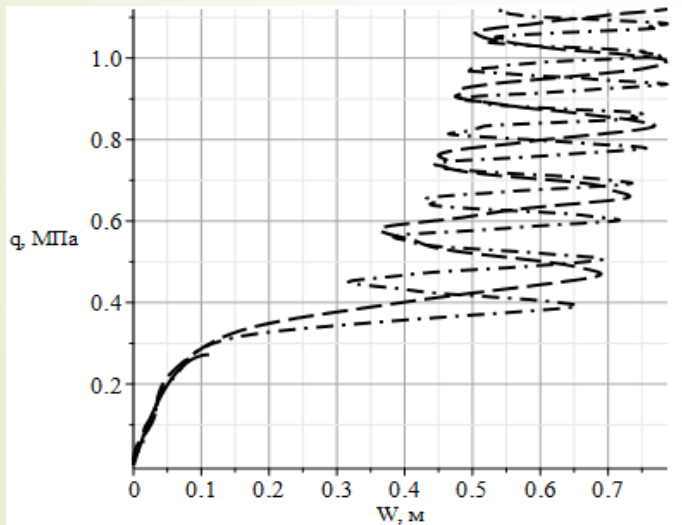


Рисунок 4. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для E-Glass/Ероху варианта 1

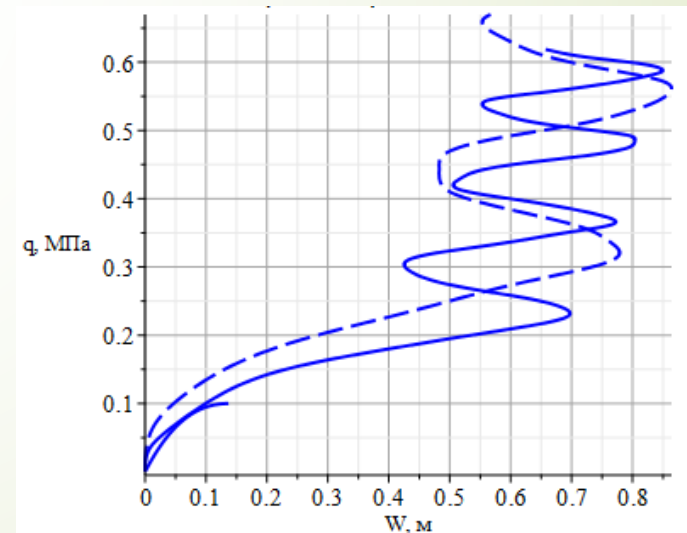


Рисунок 5. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для T10 UPE22-27/Ероху варианта 1

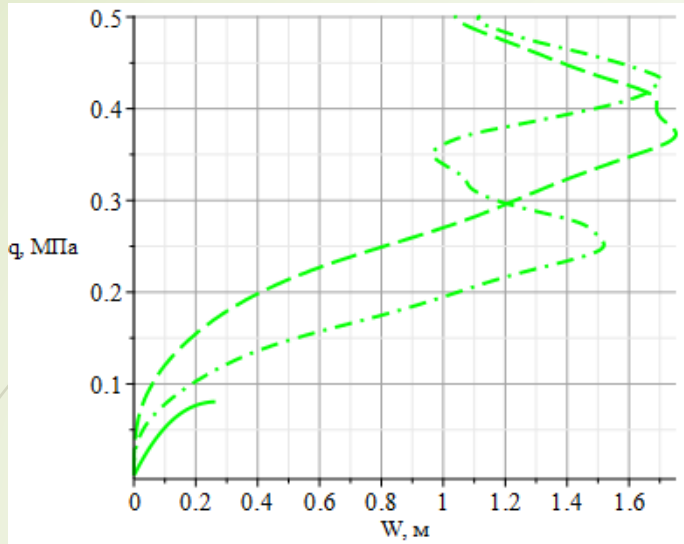


Рисунок 6. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для М60J варианта 2

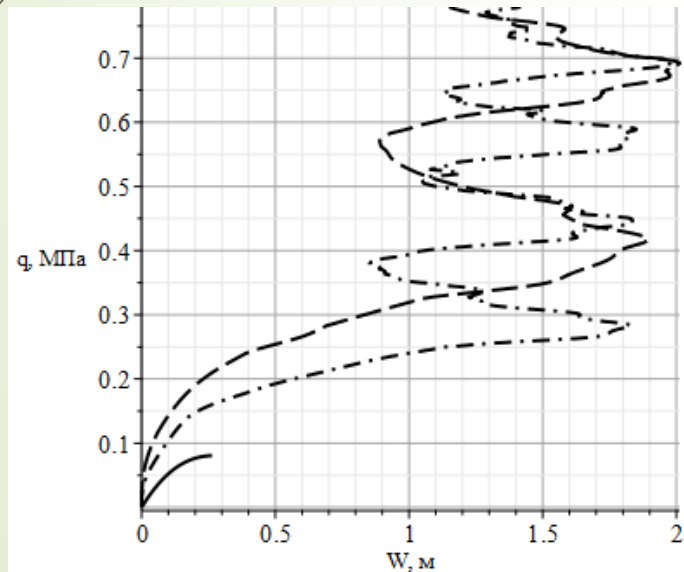


Рисунок 8. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для E-Glass/Ероху варианта 2

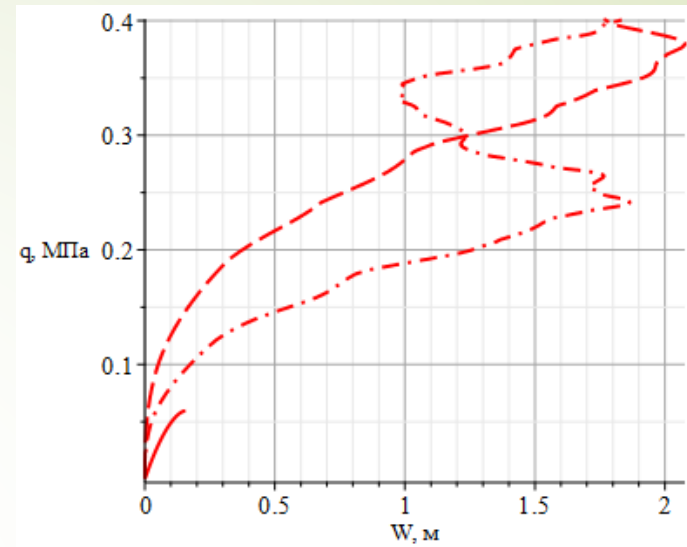


Рисунок 7. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для AS/3501 варианта 2

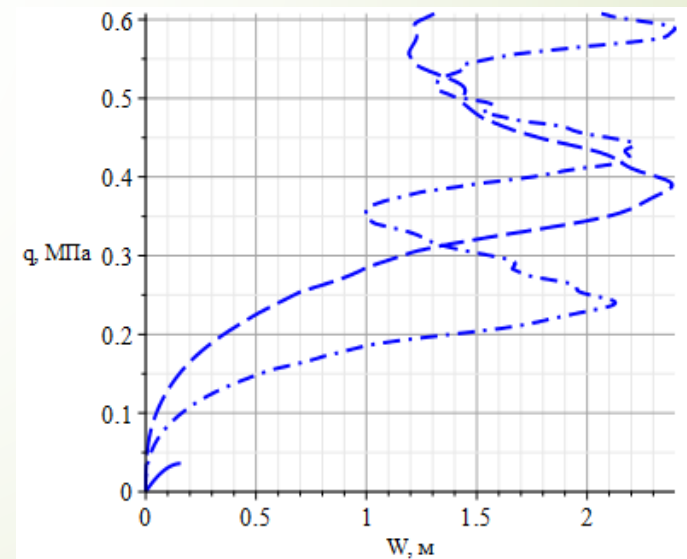


Рисунок 9. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для T10 UPE22-27/Ероху варианта 2

## Значения критических нагрузок

Материал	Вариант геометрии	$q^{st}$ , МПа	$q^1$ , МПа	$q^2$ , МПа	$t^1$ , с	$t^2$ , с
М60J/Эпоxy	1	0.405	0.425	0.459	0.174	0.094
AS/3501/Эпоxy	1	0.205	0.270	0.320	0.111	0.066
E-Glass/Эпоxy	1	0.265	0.373	0.388	0.153	0.079
T10 UPE22-27	1	0.105	0.206	0.223	0.084	0.046
М60J/Эпоxy	2	0.081	0.167	0.257	0.068	0.053
AS/3501/Эпоxy	2	0.059	0.134	0.218	0.055	0.045
E-Glass/Эпоxy	2	0.120	0.260	0.339	0.107	0.069
T10 UPE22-27	2	0.036	0.203	0.336	0.083	0.069
М60J/Эпоxy	3	0.098	0.192	0.295	0.079	0.060
AS/3501/Эпоxy	3	0.067	0.193	0.311	0.079	0.064
E-Glass/Эпоxy	3	0.070	0.228	0.414	0.093	0.085
T10 UPE22-27	3	0.030	0.184	0.315	0.075	0.065

## Заключение

1. Разработана модель деформирования пологих оболочечных конструкций из ортотропных материалов, находящихся под воздействием динамической нагрузки с учетом геометрической нелинейности и поперечных сдвигов.
2. Разработан алгоритм её исследования на основе методов Власова-Канторовича и Рунге-Кутта.
3. Проведено исследования устойчивости 12 конструкций 3 геометрий, выполненных из 4 материалов. Оптимальным материалом на основе сравнения значений критических нагрузок потери устойчивости и соответствующему такой нагрузке времени выбрано стекловолокно E-Glass/Ероху.
4. Показан эффект запаздывания, свойственный конструкциям, находящимся под воздействием динамической нагрузки.
5. Полученные результаты будут использованы для исследования подобных конструкций, ослабленных вырезами и подкрепленными ребрами жесткости.



## Список литературы

1. Кривошапко С.Н. 2013. О возможностях оболочечных сооружений в современной архитектуре и строительстве. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений* (1): 51-56.
2. Karpov V.V. & Semenov A.A. 2017. Mixed-form equations for stiffened orthotropic shells of arbitrary canonical shape with static load. *Journal of Mechanics* 34: 469-474.
3. Каменев И.В. и Семенов А.А. 2018. Устойчивость ортотропных пологих оболочек двоякой кривизны при шарнирно-подвижном закреплении контура. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика* 2: 32-43.
4. Duc N.D. & Tung H.V. 2010. Nonlinear response of pressure-loaded functionally graded cylindrical panels with temperature effects. *Composite Structures* 92: 1664-1672.

Спасибо за внимание!