



Устойчивость ортотропных оболочек под воздействием динамической нагрузки

И.В. Каменев, СПбГКУ «ЦРТПиПЧС»

Вид рассматриваемых конструкций

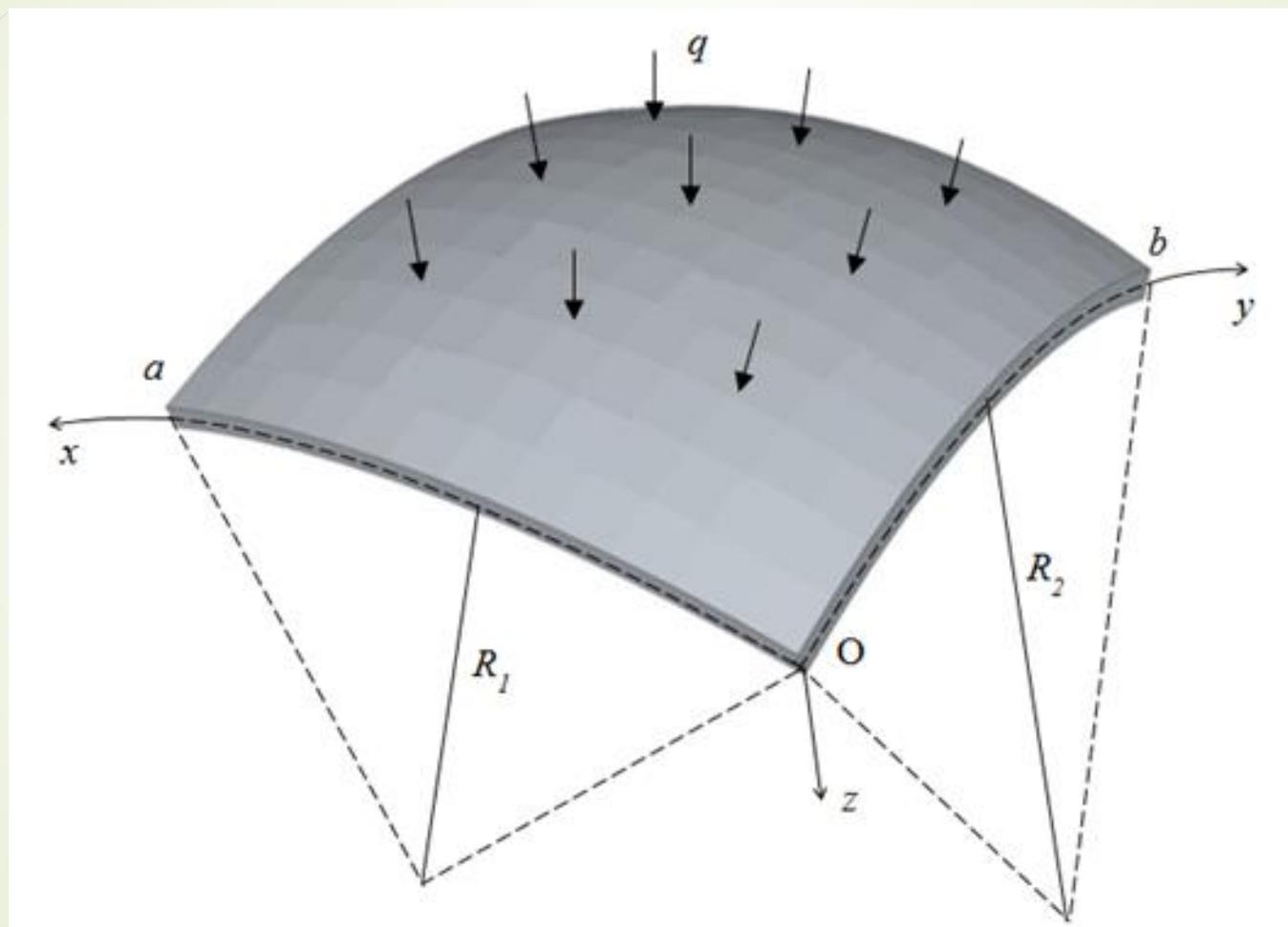


Рисунок 1. Схематичное изображение полой оболочки

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/Эпоxy | AS/3501/Эпоxy | E-Glass/Эпоxy | 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 |
| μ_{12} | 0.320 | 0.300 | 0.230 | 0.123 |
| μ_{21} | 0.057 | 0.019 | 0.094 | 0.074 |
| ρ , кг/м ³ | 1 500 | 1 540 | 1 800 | 1 800 |

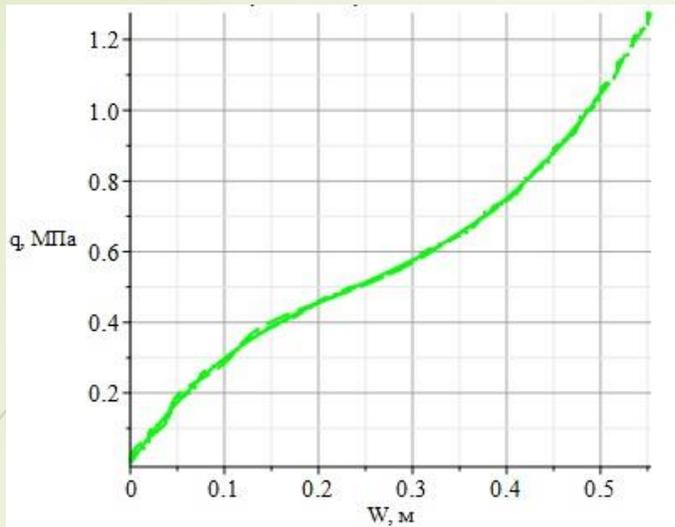


Рисунок 2. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для M60J варианта 1

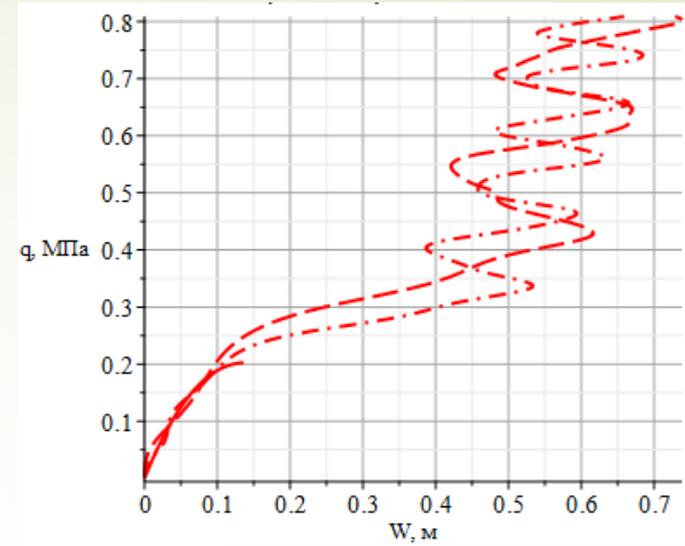


Рисунок 3. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для AS/3501 варианта 1

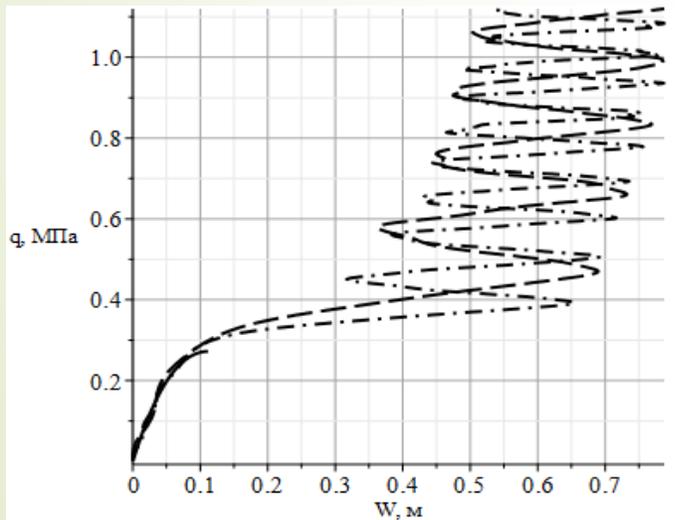


Рисунок 4. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для E-Glass/Ероху варианта 1

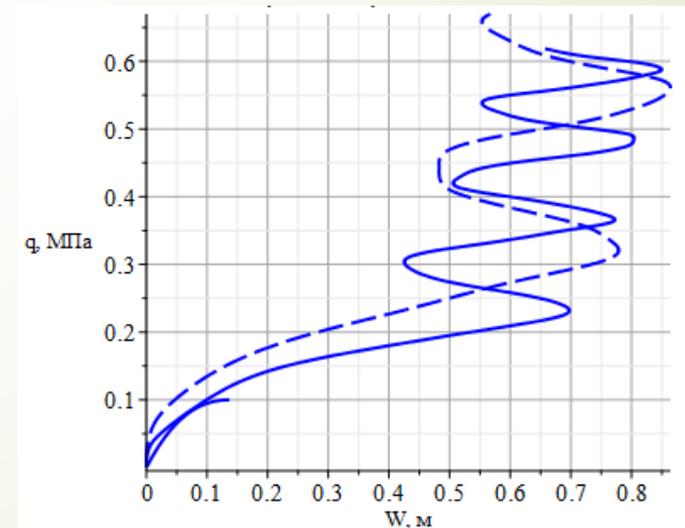


Рисунок 5. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для T10 UPE22-27/Ероху варианта 1

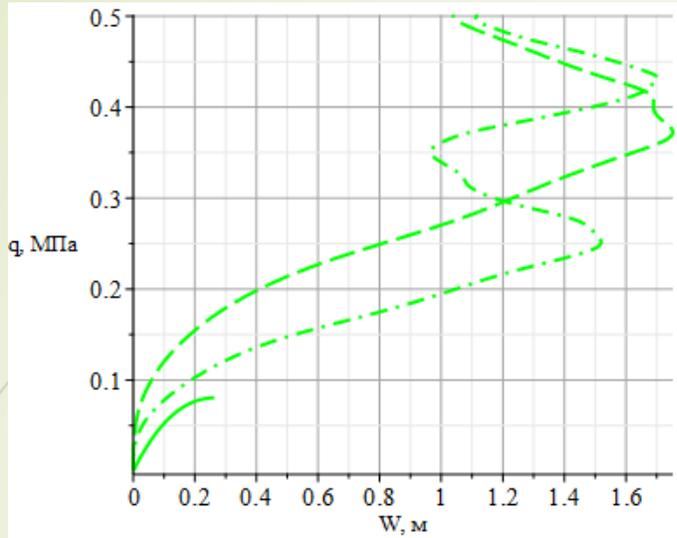


Рисунок 6. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для М60J варианта 2

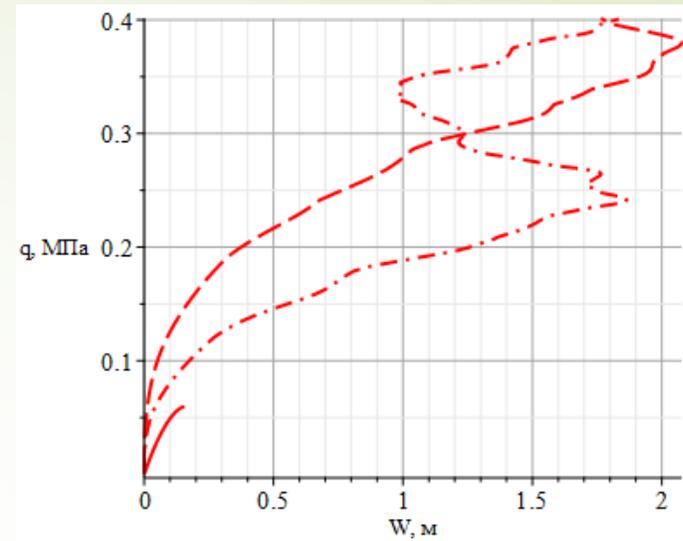


Рисунок 7. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для AS/3501 варианта 2

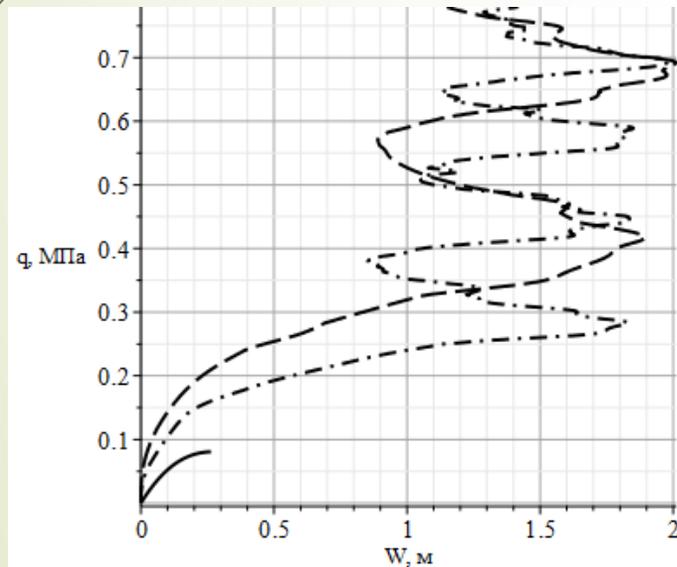


Рисунок 8. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для E-Glass/Ероху варианта 2

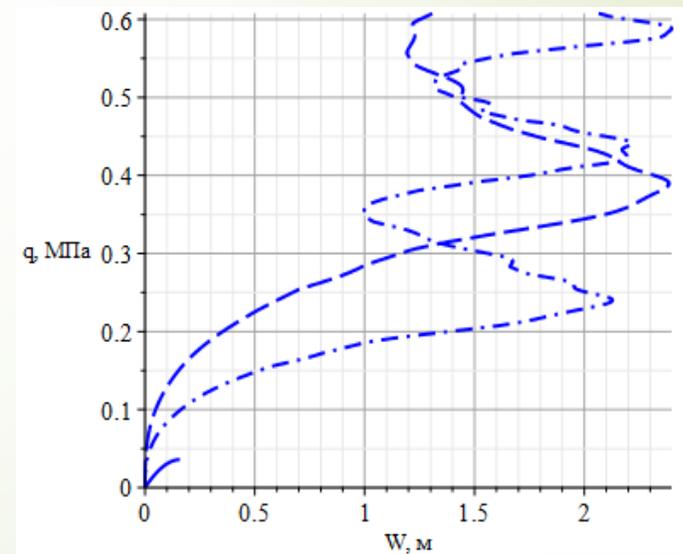


Рисунок 9. Графики «Нагрузка – наибольший прогиб» для T10 UPE22-27/Ероху варианта 2

Значения критических нагрузок

| Материал | Вариант геометрии | q^{st} , МПа | q^1 , МПа | q^2 , МПа | t^1 , с | t^2 , с |
|---------------|-------------------|----------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| M60J/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 |
| M60J/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 |
| M60J/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-Кутты.
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!