Н. Н. Столяров, **Н. И. Дедов**, **В. Н. Исуткина** (Самара, СамГТУ). **Шаговые алгоритмы решения задач устойчивости оболочек при комбинированном нагружении.**

Нелинейная система уравнений, описывающая упругопластическое поведение оболочек, имеет операторный вид

$$A(y_{s+1}) = fp_{s+1}, \tag{1}$$

где s — номер этапа нагружения, y_s — решение (1) при $p = p_s$, p — параметр продольных и поперечной нагрузок, f — функция, задающая распределение поперечной нагрузки и вид комбинированного нагружения. Заданием f можно обеспечить различные пути нагружения в пространстве нагрузок (p, p_1, p_2).

Проводя линеаризацию [1, 2, 3], представим (1) в виде

$$\Phi'(y_s)\Delta y_s + L'(y_s)\Delta y_s = f\Delta p_s - [A(y_s) - fp_s], \tag{2}$$

где $y_{s+1} = y_s + \Delta y_s$, а $\Phi'(y_s)$, $L'(y_s)$ — линейные операторы с переменными коэффициентами, $\Phi'(y_s)$ — оператор, определяемый нелинейностью, связанной с упругопластическими свойствами материала, $L'(y_s)$ — оператор, определяемый геометрической нелинейностью. Обозначим $r_s = A(y_s) - fp_s$, где r_s — невязка при $p = p_s$.

Для оболочек из упругого материала оператор $\Phi'(y_s)$ является линейным: $\Phi'_{lin} = \Phi'(y_s)$.

Система (2) решалась методом приращений, самокорректирующимся методом и методом Ньютона–Канторовича. Положив в (2) $r_s = 0$, приходим к методу приращений, при $r_s = A(y_s) - fp_s$ из (2) следует самокорректирующийся метод. В методе Ньютона–Канторовича Δy_s находится из (2) путем итераций на шаге $s+1$, а невязка вычисляется по формуле $r_s = A(y_s^k) - fp_s$, где k — номер итерации. При этом, если операторы $\Phi'(y_s)$, $L'(y_s)$ в процессе k итераций на этапе $s+1$ не меняются, то имеем модифицированный метод Ньютона–Канторовича.

Система (2) имеет эволюционный характер и дополняется начальными условиями $y_s = 0$ при $s = 0$.

Разработанные алгоритмы обеспечивают задание произвольного пути нагружения в пространстве нагрузок (p, p_1, p_2), нагрузки задаются в виде

$$p = \varphi(t), \quad p_1 = \varphi_1(t), \quad p_2 = \varphi_2(t), \tag{3}$$

где t — некоторый параметр. Из (3) следует

$$\Delta p = \varphi'(t_s)\Delta t, \quad \Delta p_1 = \varphi_1'(t_s)\Delta t, \quad \Delta p_2 = \varphi_2'(t_s)\Delta t. \tag{4}$$

Для нагружения по лучу в пространстве (p, p_1, p_2) из (4) имеем

$$\Delta p = k\Delta t, \quad \Delta p_1 = k_1\Delta t, \quad \Delta p_2 = k_2\Delta t. \tag{5}$$

Из (5) как частный случай следует нагружение внешним давлением ($\kappa = 1$, $\kappa_1 = \kappa_2 = 0$), продольной нагрузкой ($\kappa = 0$, $\kappa_1 = 1$, $\kappa_2 = 0$) и различные виды комбинированного нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бахвалов Н. С.* Численные методы. Ч. 1. М.: Наука, 1973, 631 с.
2. *Корнишин М.С.* Нелинейные задачи теории платин и пологих оболочек и методы их решения. М.: Наука, 1964, 192 с.
3. *Ляшко А. Д.* Разностные схемы для задач об изгибе тонких пластин. — В кн.: Численные методы механики сплошной среды. Новосибирск: 1973.