УДК 539.37

ПОДХОДЫ К ПРЕОДОЛЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ «ЗАПИРАНИЯ» ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. А. МАКСИМЮК, Е. А. СТОРОЖУК
Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, г. Киев

Тонкие пластины и оболочки как легкие и надежные элементы современных конструкций находят широкое применение в промышленном и гражданском строительстве. В данное время расчет тонкостенных элементов конструкций чаще всего выполняют с использованием численных методов и современной вычислительной техники.

Исторически способ использования ЭВМ и стратегия построения численных методов зависели от мощности ЭВМ и требований к точности расчетов в то время. Первыми были расчеты с помощью аналитических решений математической физики, т.е. аналитически численные подходы. Однако оказалось, что для некоторых значений параметров вычислить специальную функцию труднее, чем численно решить дифференциальное уравнение, которое ее порождает. С ростом мощности ЭВМ стало возможным непосредственно решать задачи механики численными методами. Это привело к развитию истинно численных методов [2]. Однако и эти методы оказались тоже не всесильны. Триумфальное распространение метода конечных элементов споткнулось о так называемую проблему запирания (locking) или вырождения [2]. Например, в теории оболочек при определенных критических значениях геометрических и физических параметров, когда характер деформирования существенно меняется, классические численные методы плохо сходятся. Тогда также может изменяться (вырождаться) и система определяющих уравнений. Сейчас проблема не утратила актуальности.

Авторы предложили три подхода к решению проблемы.

1 Подход с использованием смешанных функционалов. Из опыта [2, 3] решения задач теории оболочек практически установлено, что выбор системы независимых варьируемых функций должным образом позволяет избежать нежелательных явлений типа запирания и ускорить сходимость численных методов. Те величины, которые априорно будут малыми, следует выбирать за независимые функции. Этот подход является достаточно универсальным. Например, чтобы избежать так называемого мембранного и сдвигового запирания при применении сдвиговых моделей для расчета тонких оболочек, можно построить смешанный функционал $\Pi\left(u,\varphi,\varepsilon^{f}\right)$, в котором дополнительно варьируются мембранные $\left(\varepsilon_{11}^{f},\varepsilon_{22}^{f},\varepsilon_{12}^{f}\right)$ и сдвиговые $\left(\varepsilon_{13}^{f},\varepsilon_{23}^{f}\right)$ деформации, которые, очевидно, будут малыми величинами. Его можно представить [3] через функционал $\Pi(u,\varphi)$, в котором варьируются только перемещения (u_1,u_2,u_3) и углы поворота (φ_1,φ_2), таким образом:

$$\Pi\left(u,\varphi,\varepsilon^{f}\right)=\Pi(u,\varphi)-\frac{1}{2}\iint\limits_{\Omega}\Big[G_{11}(\varepsilon_{11}-\varepsilon_{11}^{f})^2+G_{22}(\varepsilon_{22}-\varepsilon_{22}^{f})^2+G_{12}(\varepsilon_{12}-\varepsilon_{12}^{f})^2+$$

$$+G_{13}(\varepsilon_{13}-\varepsilon_{13}^{f})^2+G_{23}(\varepsilon_{23}-\varepsilon_{23}^{f})^2\Big]d\Omega. \qquad (1)$$

Следует отметить использование в (1) обозначений для деформаций, которое подчеркивает различие между деформациями-формулами $(\varepsilon_{11},\varepsilon_{22},\varepsilon_{12},\varepsilon_{13},\varepsilon_{23})$ и деформациями-функциями $(\varepsilon_{11}^{f},\varepsilon_{22}^{f},\varepsilon_{12}^{f},\varepsilon_{13}^{f},\varepsilon_{23}^{f})$, что имеет определенное методологическое значение при построении алгоритма.

2 Подход с использованием векторных соотношений для деформаций. Традиционно выражения для деформаций тонких оболочек $(\varepsilon_{ij},\kappa_{ij})$ записываются в скалярном виде через компоненты вектора перемещений (u_1,u_2,u_3). Использование их в декартовой системе координат не влечет какихлибо осложнений, а в криволинейной системе координат может привести к вырождающимся явлениям типа запирания. Представление деформаций в векторной форме [3]

$$\varepsilon_{11} = \vec{e}_1 \cdot \frac{\partial \vec{u}}{A_1 \partial \alpha_1}; \ \varepsilon_{12} = \vec{e}_2 \cdot \frac{\partial \vec{u}}{A_1 \partial \alpha_1} + \vec{e}_1 \cdot \frac{\partial \vec{u}}{A_2 \partial \alpha_2}; \quad (2)$$

$$\kappa_{11} = -\vec{e}_1 \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}}{A_1 \partial \alpha_1}; \ 2\kappa_{12} = -\vec{e}_2 \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}}{A_1 \partial \alpha_1} - \vec{e}_1 \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}}{A_2 \partial \alpha_2}; \ \varphi_1 = \vec{n} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{A_1 \partial \alpha_1} \quad (1 \to 2)$$

непосредственно через векторы перемещений $\vec{u} = u_1\vec{e}_1 + u_2\vec{e}_2 + u_3\vec{n}$ и углов поворота $\vec{\varphi} = \varphi_1\vec{e}_1 + \varphi_2\vec{e}_2$ с последующим применением численного метода также в векторной форме упрощает составление разрешающих уравнений в контурных узлах и на линиях излома срединной поверхности оболочки и позволяет избежать негативного влияния жестких смещений на сходимость результатов. Важная особенность соотношений для деформаций в векторной форме (2) заключается также в отсутствии в них коэффициентов второй квадратичной формы и символов Кристоффеля.

3 Подход с использованием точек сверхсходимости. Для ликвидации отрицательных явлений мембранного и сдвигового запирания при расчете тонких оболочек авторы предлагают модификации метода конечных элементов и вариационно-разностного метода с вычислением компонент деформации, записанных в обычной (скалярной) форме, в точках их сверхсходимости [1].

Отметим, что для каждой компоненты деформации существуют свои точки сверхсходимости.

Предложенные подходы позволяют улучшить сходимость результатов численных расчетов, расширяют область изменения параметров оболочек и представляют перспективное направление для дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Деруга, А. П.** Вариационно-разностные схемы на основе сверхсходимости / А. П. Деруга// докл. IV Всерос. семинара Проблемы оптимального проектирования сооружений. – Новосибирск: НГАСУ, 2002. – С. 118–130.

2. **Maksimyuk, V. A.** Using mesh-based methods to solve nonlinear problems of statics for thin shells / V. A. Maksimyuk, E. A. Storozhuk, I. S. Chernyshenko // Int. Appl. Mech.– 2009. – 45, N 1. – P. 32–56.

3 **Maksimyuk, V. A.** Variational finite-difference methods in linear and nonlinear problems of the deformation of metallic and composite shells (review) / V. A. Maksimyuk, E. A. Storozhuk, I. S. Chernyshenko // Int. Appl. Mech.– 2012. – 48, N 6. – P. 613–687.

УДК 656.211.5

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВОКЗАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

И. Г. МАЛКОВ, М. М. ВЛАСЮК

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В. И. ИСАЧЕНКО

Гомельская дистанция гражданских сооружений, Республика Беларусь

Железнодорожные вокзалы белорусских городов всегда являлись важными градостроительными объектами, создавая определенные удобства для пассажиров в силу своего функционального назначения, служат визитной карточкой города. Поэтому не удивительно, что архитектуре железнодорожных вокзалов в настоящее время уделяется пристальное внимание.

Анализ современного состояния строительства и реконструкции зданий железнодорожных вокзалов в Беларуси позволяет констатировать, что этому направлению капитального строительства уделяется значительное внимание как Управлением Белорусской железной дороги, в чьем ведении находятся вокзалы, так исполнительной власти городов. В течение последних 5 лет на строительство новых и реконструкцию существующих вокзалов Белорусской железной дороги ежегодно выделялось от 4 до 5 миллиардов рублей.

Кроме нового вокзала в г. Минске, введенного в эксплуатацию в 2001–2003 гг. с начала 90-х годов прошлого столетия, т. е. со времени обретения независимости государства, реконструированы вокзалы в городах Жлобине, Орше, Бобруйске, Барановичах и др.