

ДК 624.074.4:539.1

И.Мелезнов, В.Т.Фадеев

## ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассматривается задача по уточнению расчетного НДС по результатам тензосметрии. В качестве неизвестных при решении полдубратной задачи прочности рассматриваются краевые силы и моменты. Приведены результаты исследования устойчивости круговой цилиндрической оболочки.

Создание современных летательных аппаратов предъявляет повышенные требования к прочностному расчету их конструкций. Современная числительная техника позволяет решить эту задачу. Существует большое количество различных методов исследования прочности элементов конструкций летательных аппаратов. Одним из эффективных численных методов является метод конечных элементов. Однако несмотря на его широкое применение, этот метод обладает рядом существенных недостатков. Во-первых, для обеспечения заданной точности решения задачи требуется достаточно мелкая сетка конечных элементов, что в свою очередь требует больших затрат машинного времени. Во-вторых, требуется информация о реальной внешней нагрузке, которая всегда достоверно известна (защитные конструкции, упругое опирание на другие элементы конструкций и т.д.). В настоящее время достаточно широкое распространение получили расчетно-экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния элементов конструкций [1.../4/, обладающие в ряде случаев существенными преимуществами перед численными методами. Знание реальных значений напряжений или деформаций в отдельных точках конструкции и введение их в расчетную модель позволяет получить удовлетворительное решение на крупных сетках. Однако эти методы применялись в основном для оценки напряженно-деформированного состояния. Ниже рассматривается расчетно-экспериментальный метод исследования устойчивости цилиндрических оболочек при произвольном несимметричном нагружении краевыми силами и моментами. Считается, что нагрузка неизвестна. Учитывается момент-

расчет прочности и долговечности элементов  
конструкций. Куйбышев, 1990

ность и нелинейность исходного напряженно-деформированного состояния. Задача решается методом конечных элементов. В качестве конечных элементов выбраны прямоугольный криволинейный элемент обшивки и балочные криволинейный и прямолинейный элементы для подкреплений.

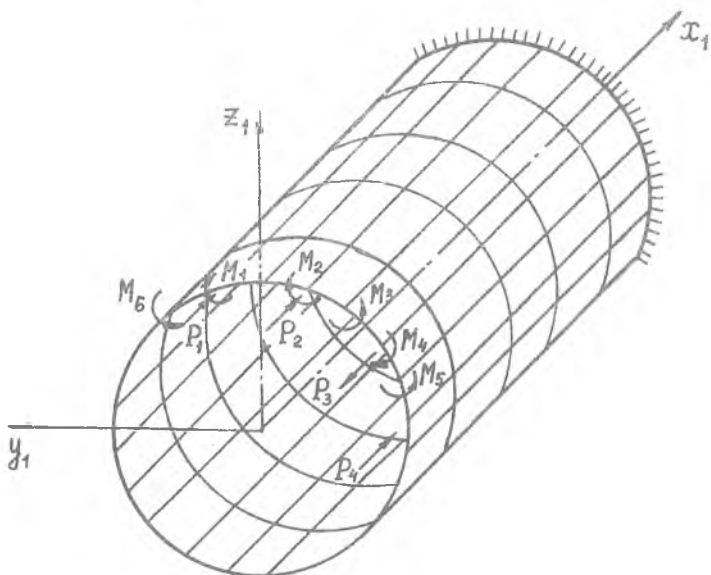


Рис. I

Полагаем, что круговая цилиндрическая оболочка длины  $L$ , ширины  $h$ , радиуса  $R$  подкреплена продольным и поперечным набором. Разобьем оболочку в продольном направлении на  $m$ , а поперечном - на  $n$  частей (рис. I). Таким образом, оболочка представляется набором  $m \times n$  прямоугольных конечных элементов обшивки,  $n \times (m + 1)$  криволинейных балочных элементов поперечного набора и  $m \times (n + 1)$  прямолинейных балочных элементов продольного набора. К оболочке приложена система сил и моментов, распределенная локально по узлам расчетной сетки. Известно место приложения этих сил и моментов, величина и направление их неизвестны. В общем случае в каждом узле расчетной сетки может быть приложено три силы  $P_x, P_y, P_z$  и два момента  $M_x, M_y$ . Внешнее давление

решением как обобщенный силовой фактор. Из тензосметрии определяем деформации на внешней и внутренней поверхностях оболочки, причем суммарный эффект тензодатчиков должно равняться числу неизвестных сил и моментов. Предполагаем, что по результатам тензосметрии получено  $N$  значений деформаций точек оболочки, совпадающее с числом неизвестных сил и моментов. Желательно иметь информацию о деформациях вблизи приложения сил и моментов на внешней и внутренней поверхностях оболочки.

Из известных соотношений для оболочки получаем деформации и кривизны срединной поверхности:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_1^+ + \varepsilon_1^-}{2}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_2^+ + \varepsilon_2^-}{2}, \quad \tau = \frac{\tau^+ + \tau^-}{2};$$

$$\chi_1 = \frac{2(\varepsilon_1^+ - \varepsilon_1^-)}{h}, \quad \chi_2 = \frac{2(\varepsilon_2^+ - \varepsilon_2^-)}{h}, \quad \chi_3 = \frac{2(\tau^+ - \tau^-)}{h},$$

$\varepsilon_1^+, \varepsilon_2^+, \tau^+$  - продольная, поперечная деформации и сдвиги точек внешней поверхности оболочки;  $\varepsilon_1^-, \varepsilon_2^-, \tau^-$  - продольная и поперечная деформации и сдвиг точек внутренней поверхности оболочки;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \chi_1, \chi_2, \chi_3$  - деформации и кривизны срединной поверхности оболочки.

Используем метод суперпозиции для задачи упругого равновесия оболочки от системы сил. Итак, деформацию в каждой точке можно выразить в виде

$$\tilde{\varepsilon}_i = \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij} P_j, \quad (1)$$

$\varepsilon_{ij}$  - обобщенная деформация, деформация или кривизна срединной поверхности оболочки  $i$ -ой точки от действия единичной силы, приложенной в  $j$ -ой точке оболочки.

Таким образом, можно записать

$$\tilde{\varepsilon} = A \bar{P}, \quad (2)$$

$\tilde{\varepsilon} = \{\tilde{\varepsilon}_1, \tilde{\varepsilon}_2, \dots, \tilde{\varepsilon}_N\}$  - вектор деформаций и кривизн,  $\bar{P}$  - вектор известных обобщенных узловых сил,  $A$  - матрица связи порядка  $N$ , элементы которой получаются следующим образом. Задается единичное воздействие в  $j$ -ой точке оболочки (в виде силы или момента). Решается на основе алгоритма, приведенного в /5/, задача упругого равновесия оболочки. Определяется вектор обобщенных дефор-

маций и кривизин в точках приложения обобщенных сил. Этот вектор обозначается  $\mathbf{j}$ -ый столбец матрицы  $\mathbf{A}$ . Решая  $N$  раз задачу упругого равновесия от  $N$  единичных сил и моментов, строим матрицу  $\mathbf{A}$ . Определив ее из (2) и считая известным из эксперимента вектор  $\mathbf{z}$  находим вектор неизвестных обобщенных узловых сил и моментов по формуле

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{z}. \quad (3)$$

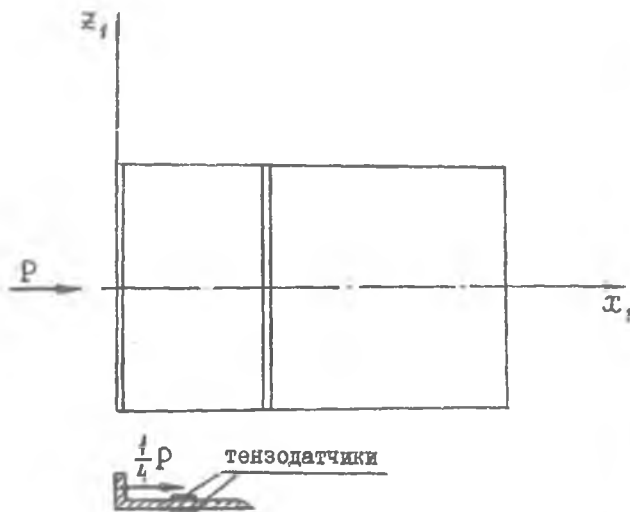


Рис. 2

В качестве примера исследована устойчивость круговой цилиндрической оболочки (рис.2) при неоднородном осевом сжатии и изгибе крайними моментами. Оболочка имела  $L/R = 1,4$ ,  $R/h = 278$ . Жесткостные характеристики для шпангоутов равны:  $\bar{F} = EF/DK_2 = 3,9 \cdot 10^6$ ;  $\bar{J}_x = EJ_x/DR = 9$ ;  $\bar{J}_z = EJ_z/DR = 13,4$ ;  $\bar{J}_k = EJ_k/DR = 12$ ;  $\bar{e} = e/R = 0,05$ ;  $k_2 = R^{-1}$ ;  $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ .

В силу симметрии оболочки и нагрузки рассматривалась половина оболочки, которая в продольном и поперечном направлениях разбивалась на 15 криволинейных конечных элементов. В корректирующих узлах в узлах приложения внешней нагрузки, по результатам тензометрии

для сугмарной сжимающей силы  $\bar{P} = P/D$ ,  $k_2 = 1820$  получены деформации  $\varepsilon^+$  на внешней и  $\varepsilon^-$  на внутренней поверхностях оболочки, представленные в таблице I.

Таблица I

№ узла	I	2	3	4	5	6	7	8
$10^6 \cdot \varepsilon^+$	-580	-1000	-1070	-530	30	-930	-860	-390
$10^6 \cdot \varepsilon^-$	-220	100	-70	-30	-170	30	0	-220
№ узла	9	10	11	12	13	14	15	16
$10^6 \cdot \varepsilon^+$	-310	-790	-730	140	-390	-810	-890	-200
$10^6 \cdot \varepsilon^-$	-240	20	-170	-280	-80	-170	-100	-260

Из решения обратной задачи находим неизвестные узловые силы  $\bar{P} = P/Dk_2$  и моменты  $\bar{M} = M/D$ , обеспечивающие приведенные выше деформации. Их значения представлены в таблице 2.

Таблица 2

№ узла	I	2	3	4	5	6	7	8
$\bar{P}$	48,12	95,65	101,23	57,04	33,73	73,29	80,37	69,92
$\bar{M}$	1,48	-1,63	-1,37	-0,51	3,8	-2,86	-1,42	1,28
№ узла	9	10	11	12	13	14	15	16
$\bar{P}$	64,78	70,21	71,63	29,52	44,46	66,91	92,12	35,28
$\bar{M}$	1,76	-2,17	-1,8	3,48	-0,73	-0,85	-2,03	1,82

Определив внешнюю нагрузку, решаем задачу устойчивости оболочки с использованием алгоритма работы /5/. Введем параметр  $K_p = P_p/P_3$ , где  $P_p$ ,  $P_3$  - соответственно расчетное и экспериментальное значения критической осевой сжимающей силы. При расчете с учетом нелинейности исходного напряженно-деформированного состояния  $K_p = 1,28$ . Различие в значениях расчетной и экспериментальной критической осевой нагрузки объясняется, по-видимому, некоторой неточностью в представлении реальной конструкции ее расчетной моделью. При линей-

ном исходном состоянии  $K_p = 2,4$ . Видим, что влияние нелинейности существенно, и расчеты необходимо проводить с учетом геометрической нелинейности исходного состояния.

#### Библиографический список

1. Бегеев Т.К., Гришин В.И., Писарев В.С. Исследование НДС оболочек с отверстием МКЭ и голографической интерферометрии // Уч. зап. ЦАГИ, ХУ, 1984. № 6, С.85-96.
2. Пригоровский Н.И., Дверес Н.Н., Разумовский И.А., Филин А. Исследование напряжений в сложных пространственных конструкциях: Материалы VIII Всесоюзной конференции по методу фотоупругости / Таллин, 1979, т.3. С.212-219.
3. Фадеев В.Т. Идентификация модели конструкции на основе результатов статических испытаний // Пространственные конструкции в Красноярском крае. КПИ. Красноярск, 1986. С.73-82.
4. Писаренко Г.С., Шагдыр Т.Ш., Хивенен В.А. Экспериментальные численные методы определения концентрации напряжений // Проблемы прочности. 1983. № 8. С.3-6.
5. Кабанов В.В., Железнов Л.П. Алгоритм исследования нелинейного деформирования и устойчивости подкрепленных цилиндрических оболочек при неосесимметричном нагружении // Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций: Межвуз. сб. Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1980. С.45-87.

УДК 539.4:534.1

Т.В.Гришанина, Ф.Н.Шклярчук

#### ОПТИМИЗАЦИЯ АЭРОУПРУГОЙ СИСТЕМЫ ПО УСЛОВИЯМ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Рассматриваются свободные колебания линейной аэроупругой системы с конечным числом степеней свободы. Комплексные собственные значения возмущенной системы, параметры которой мало отличаются

---

Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций. Куйбышев, 1990

---