

## **РАСЧЁТ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОФРИРОВАННОЙ ОБОЛОЧКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ**

*С.В. Махнович, А.М. Овчинников*

В статье рассмотрен процесс формирования расчётной модели деформирования гофрированной оболочки. Проведено исследование влияния частоты сетки КЭ модели на точность решения. Выполнено сравнение результатов расчёта перемещения жёсткого центра мембраны с экспериментальными данными.

Ключевые слова: гофрированная оболочка, нелинейное деформирование.

В связи с ограничениями накладываемыми на габаритные размеры, а также массовые характеристики конструкций в ракетной технике широко используются разворачивающиеся, оболочки. В начальный момент времени такие конструкции находятся в свёрнутом компактном состоянии и в нужный момент принимают требуемую форму. Выполняемые при этом задачи могут быть различными. Из литературы известны примеры использования таких механизмов для увеличения критической части сопла РД в полёте, механического разделения компонентов топлива, разворачивания головного обтекателя БР и др.

За частую в основе создания конструкций ракетной техники лежит не теоретическое исследование, а сложная и дорогостоящая экспериментальная отработка. В связи с этим, в виду отсутствия методических материалов по расчётам и проектированию, создание аналогичных конструкций наталкивается на такие же сложности.

Основной проблемой проектирования гофрированных оболочек является описание нелинейных процессов деформирования. Все нелинейные процессы, возникающие в условиях сложного нагружения оболочки, можно разделить на геометрически нелинейные и физически нелинейные. Первый тип выражается в нелинейной зависимости деформаций от перемещений. Второй тип нелинейности выражается в появлении в материале при определённых условиях неупругих деформаций, которые начинаются при достижении некоторого напряжения – предела текучести материала.

Для решения нелинейных задач используются, в основном, численные методы. Среди них особое место занимает метод конечных элементов (МКЭ) в силу его универсальности в программной реализации и возможности создания полностью автоматизированного цикла расчёта.

В работе рассмотрен расчёт разворачивания гофрированной оболочки с 5 гофрами, внешним радиусом  $R=150\text{мм}$ , толщиной  $h=0,18\text{мм}$ , углом при вершине гофра  $\beta=126^{\circ}40'$  и высотой гофра  $H=3,93\text{мм}$  при помощи конечно-элементного комплекса MSC NASTRAN. Расчётная схема оболочки показана на рис. 1.

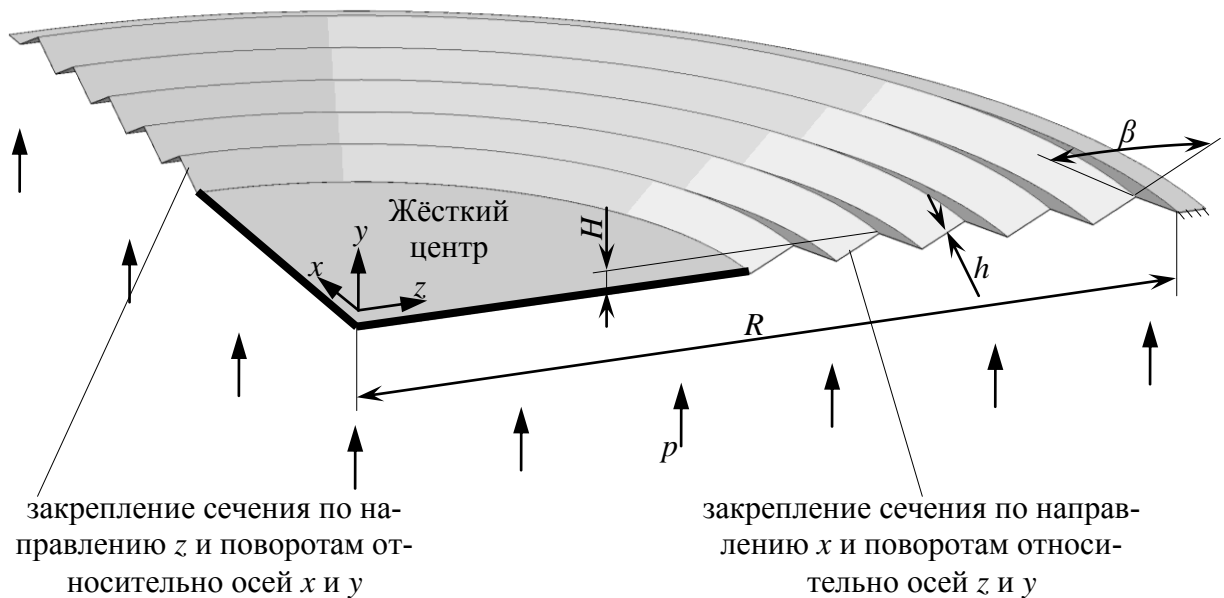


Рис. 1. Расчётная схема деформирования гофрированной оболочки

Осевая симметрия граничных условий и геометрии позволяет рассматривать в расчётной модели четверть оболочки. Это упрощение не влияет на результаты расчёта, однако значительно сокращает время его выполнения. На сечения симметрии наложены соответствующие граничные условия. По внешнему контуру оболочка закреплена по всем направлениям. Избыточное давление  $p$  плавно повышается от 0 до 40 кПа со скоростью 10кПа/с.

Для расчёта принята упруго – пластическая модель материала 12Х18Н10Т с упрочнением диаграмма деформирования которого показана на рис. 2. Модуль Юнга материала принят равным  $E=2,05 \cdot 10^{11}$  Па, коэффициент Пуассона  $\mu=0,34$ .

Конечно-элементная модель, показанная на рис. 3, сформирована из оболочечных четырёхузловых элементов типа CQUAD4 с пятью степенями свободы в каждом узле.

Из опыта решения подобных задач известно, что большое влияние на результаты расчётов имеет размер элементов, особенно в областях сгущения напряжений, таких как вершины гофров. Поэтому проведено исследование влияния количества элементов на гофре ( $N=$  от 2 до 7) в радиальном направлении на точность определения одной из основных характеристик деформирования – перемещение жёсткого центра. Результаты расчётов представлены на рис. 4. В процессе деформирования оболочки можно выделить три основных участка:

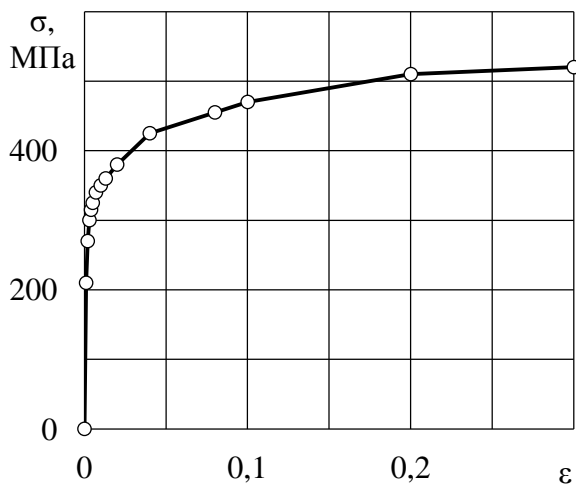


Рис.2. Диаграмма деформирования материала X18Н10Т

1) упругое деформирование. Характеризуется линейным участком в начале диаграммы. При этом напряжения в оболочке не превышают предела текучести;

2) упруго-пластическое деформирование. Имеет явно не линейный характер на диаграмме и оканчивается резким разворачиванием последнего гофра. Напряжения в вершинах гофр превышают предел текучести;

3) «додавливание» оболочки с развёрнутыми гофрами.

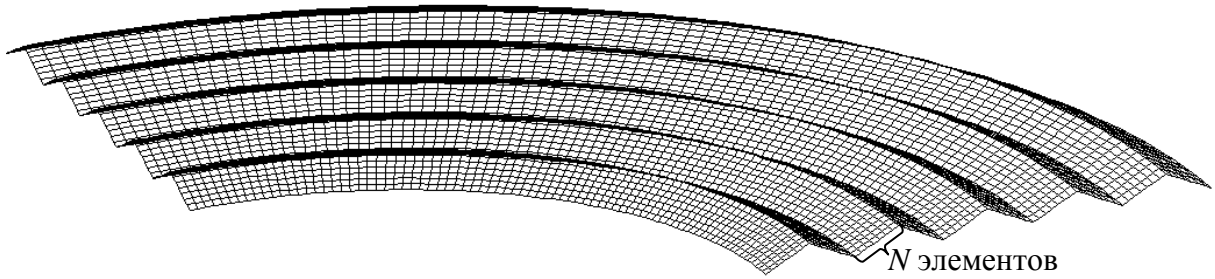


Рис. 3. Конечно-элементная модель гофрированной оболочки

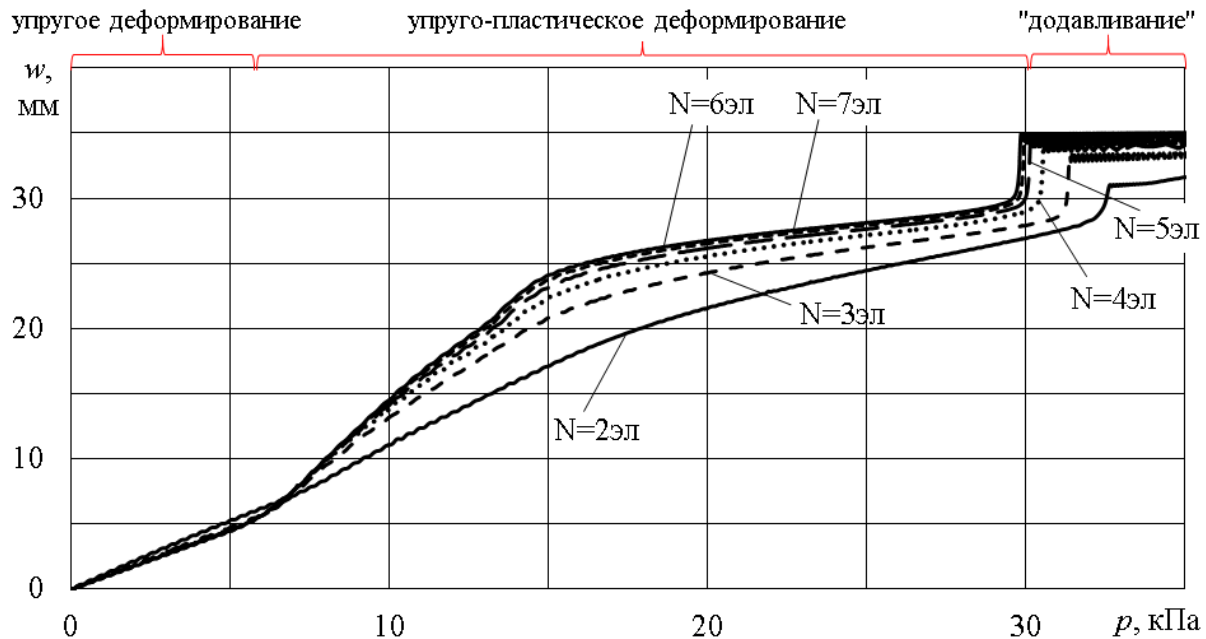


Рис. 4. Зависимость перемещения жёсткого центра мембраны  $w$  от избыточного давления  $p$

Расчёты показали, что при малом количестве (до 4) элементов на гофре жёсткость расчётной модели оболочки увеличивается от 14 до 23 %. Таким образом, для расчёта деформирования гофрированной мембраны с большим углом вершины гофра достаточно 5...7 элементов на гофре.

На рис. 5 показаны результаты расчёта перемещения жёсткого центра с изменением давления в сравнении с результатами эксперимента, проведённого на кафедре ЛАиАУ ЮУрГУ [1].

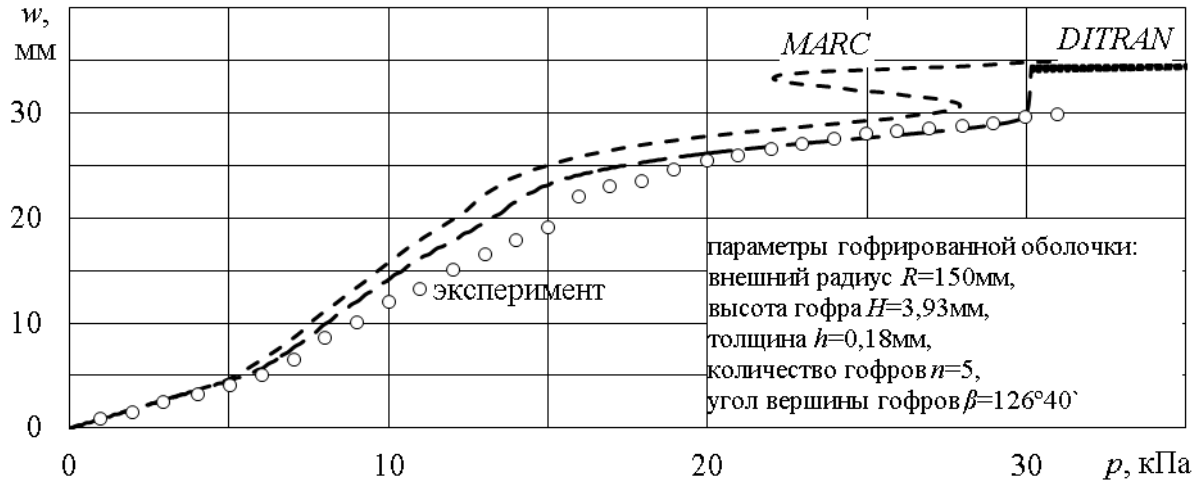


Рис. 5. Перемещение жёсткого центра гофрированной оболочки при увеличении избыточного давления

Максимальное отклонение расчётной кривой от эксперимента составило 20 % на этапе упруго – пластического деформирования. Вероятнее всего это связано с наличием в реальной модели начальных несовершенств материала и формы, которые ведут к образованию местных потерь устойчивости как показано на рис. 6.

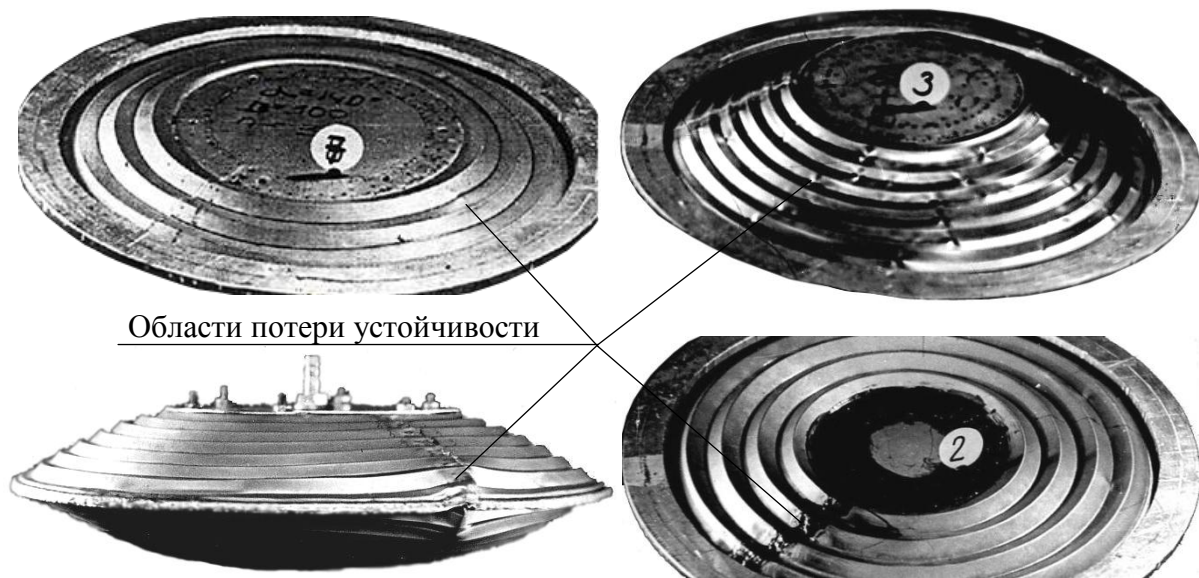


Рис. 6. Формы потери устойчивости при испытании

В испытаниях потеря устойчивости (выхлоп) для каждого гофра начинается с наиболее слабой с точки зрения жёсткости области. Такое одностороннее выпучивание приводит к образованию поперечных складок во впадинах и увеличению общей жёсткости оболочки.

Таким образом, сформированная модель позволяет с достаточной точностью описывать изменение формы гофрированной мембраны при увеличении избыточного давления. Максимальное отклонение расчёта перемещения жёсткого центра от эксперимента составило 20 % на этапе упруго – пластического деформирования.

При отработке расчётной модели установлено, что для уменьшения погрешности расчёта связанной с пространственной дискретизацией геометрии гофрированной оболочки с большим углом вершин гофра достаточно 5–7 элементов на стенке гофра.

### Библиографический список

1. Волошина, И.А. Расчет больших перемещений гофрированных мембран / И.А. Волошина, С.В. Махнович // Вестник ЮУрГУ. – 2002. – Вып. № 6(15). – С. 50–59.