

УДК 539.3

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ,
ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ И ЗАКРИТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ
БОЛЬШЕГАБАРИТНЫХ ЕМКостей ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ
ТРАНСПОРТИРОВКИ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ^{*)}**

В.Г. Баженов¹, А.И. Кибец¹, М.В. Петров², Д.В. Шошин¹

¹Нижний Новгород, ²Чебоксары

Излагаются результаты численного моделирования деформирования, потери устойчивости и закритического поведения тонкостенных элементов большегабаритных емкостей для автомобильной транспортировки сыпучих грузов. Решение трехмерной геометрически и физически нелинейной задачи осуществляется в динамической постановке на основе метода конечных элементов и явной схемы интегрирования по времени типа "крест".

Большегрузная емкость для автомобильной транспортировки сыпучих грузов (рис. 1), представляющая собой тонкостенную оболочку, при разгрузке предварительно нагружается внутренним давлением и наклоняется телескопическим подъемником на угол $40,29^\circ$. Под действием собственного веса, веса сыпучего материала и внутреннего давления корпус емкости деформируется и может потерять устойчивость. Наиболее вероятные области потери устойчивости – средняя часть цилиндрической оболочки, а также места крепления полусферической торцевой оболочки к опорному узлу подъемника. Для исследования этого процесса необходимо решение трехмерной геометрически и физически нелинейной задачи с учетом возможных необратимых деформаций конструкции и моментности напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки.

Система уравнений, описывающая движение деформируемой конструкции, формулируется в переменных Лагранжа. В качестве уравнений состояния используются соотношения теории течения с кинематическим и изотропным упрочнением. Для решения определяющей системы уравнений применяются метод конечных элементов и явная конечно-разностная схема интегрирования по времени типа "крест", реализованные в программном комплексе "Динамика-3" [1, 2]. Оценка предельных нагрузок осуществляется методом продолжения по параметру. В соответствии с этим методом вес груза увеличивается пропорционально одному параметру и из анализа формы конструкции, распределения поля перемещений определяется критическое значение весовой нагрузки.

^{*)} Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 08-08-99049-р-офи, 07-08-13637-офи_ц) и Министерства образования и науки (грант Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-3367.2008.8).

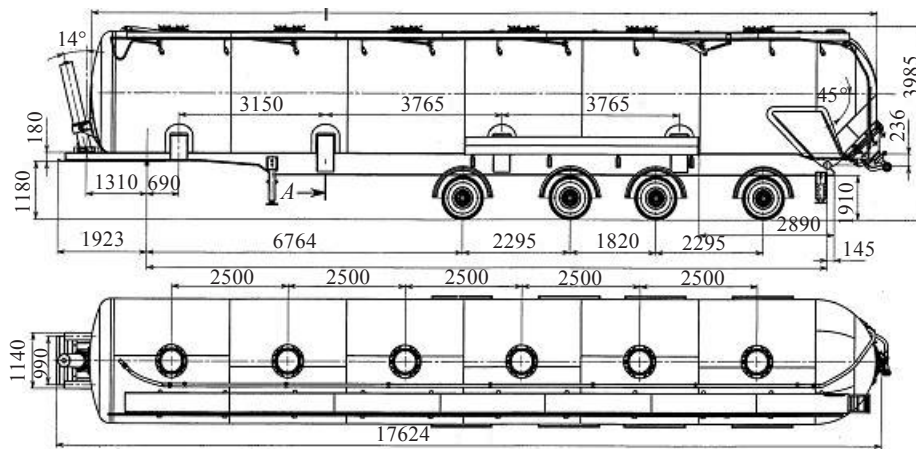


Рис. 1

1. Определение критической весовой нагрузки, приводящей к потере устойчивости цилиндрической обечайки цистерны

Рассматривалась задача изгиба цилиндрической оболочки ($D = 255$ см, $h = 0,5$ см, $L = 1597,3$ см) с недеформируемыми круглыми пластинами на торцах (рис. 2) под действием весовой нагрузки и внутреннего давления. Конструкция опирается на торцах на неподвижные недеформируемые плиты. Поскольку задача решается в динамической постановке, для моделирования квазистатического режима нагружения изменение внутреннего давления во времени задается формулой

$$p = \begin{cases} p_0 \cdot t / t_0, & t \leq t_0, \\ p_0, & t > t_0, \end{cases} \quad (1)$$

где $p_0 = 0,1$ МПа. Чтобы уменьшить влияние динамической составляющей, время нарастания давления t_0 должно быть не менее двух-трех периодов колебаний

конструкции по низшей форме. Распределение весовой нагрузки вдоль оси вращения оболочки равномерно, а в поперечном сечении изменение давления P_φ по углу поворота φ задается формулой

$$P_\varphi = P_1 \sin(\varphi/2), \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi. \quad (2)$$

Величина P_1 определяется из условия:

$$\int_0^L \int_0^{2\pi} P_\varphi d\varphi dx = P_o, \quad (3)$$

где $P_o = 40$ т – допускаемый проектом вес груза. Изменение весовой нагрузки во времени задается в виде:

$$F = \begin{cases} 0, & t \leq t_0, \\ kP_\varphi(t - t_0)/(t_1 - t_0), & t_0 \leq t \leq t_1, \\ kP_\varphi, & t > t_1, \end{cases} \quad (4)$$

где k – коэффициент запаса. Величины t_0, t_1 в формулах (1)–(4) определялись на основе частотного анализа и в дальнейшем корректировались в соответствии с результатами численных экспериментов. Предполагалось, что цистерна выполнена из сплава АМг5, имеющего следующие механические характеристики: плотность $\rho = 2,65$ г/см³, модуль сдвига $G = 23,86$ ГПа, коэффициент объемного сжатия $K = 58,33$ ГПа, предел текучести $\sigma_T = 0,146$ ГПа, модуль кинематического упрочнения $g = 0,2088$ ГПа.

Результаты решения задачи приведены на рис. 2–4. На рис. 2 изображена форма тонкостенной конструкции в различные моменты времени, характеризующиеся величиной F/P_o .

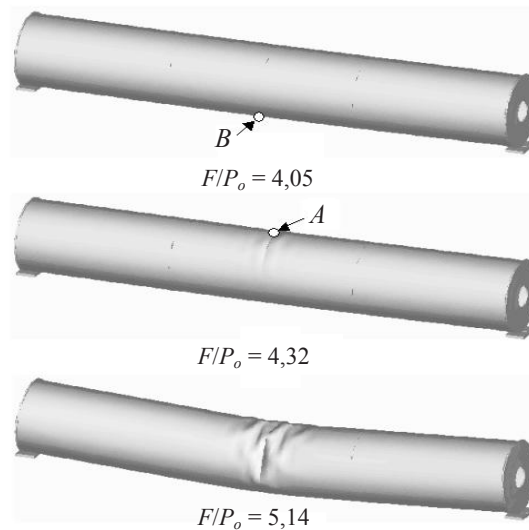


Рис. 2

На рис. 3, 4 представлены графики изменения в зависимости от весовой нагрузки, отнесенной к допустимому весу груза, следующих параметров:

– параметра складкообразования

$$DR = \sum_{i=1}^N |y_i - y_s| / y_s, \quad y_s = \sum_{i=1}^N y_i / N, \quad (5)$$

где y_i ($i = 1, 2, \dots, N$) – вертикальные координаты узлов конечно-элементной сетки цистерны в зоне образования гофров;

– отнесенных к пределу текучести σ_T продольных σ_{zz} и окружных $\sigma_{\phi\phi}$ напряжений на внешней поверхности цилиндрической оболочки в конечном элементе, помеченном буквой A на рис. 2.

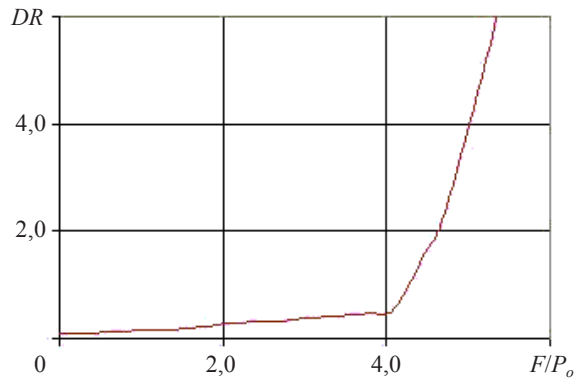


Рис. 3

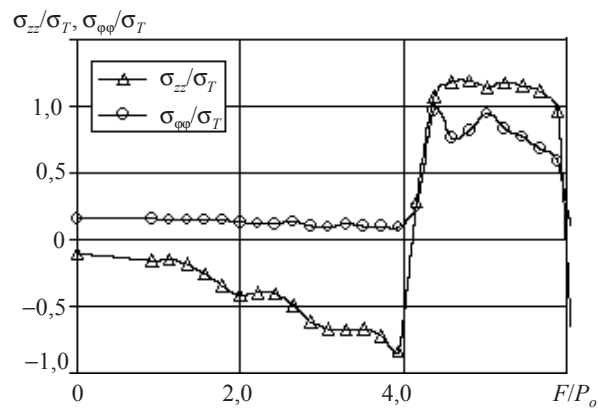


Рис. 4

Анализ результатов расчета показывает следующее.

При превышении весовой нагрузкой допустимого проектом веса груза в 4,2 раза в средней части цилиндрической обечайки образуются две поперечные складки. Дальнейшее увеличение весовой нагрузки приводит к расширению этой зоны и увеличению числа складок. Контактная сила на опорах, несмотря на увеличение весовой нагрузки, в момент образования гофров претерпевает некоторый спад.

На графиках зависимости от весовой нагрузки параметра складкообразования DR и отнесенных к σ_T напряжений σ_{zz} , $\sigma_{\phi\phi}$ в элементе A момент потери устойчивости характеризуется резким увеличением значений соответствующих параметров (см. рис. 3, 4).

Продольные напряжения в зоне гофров в момент потери устойчивости меняют знак (сжимающие напряжения переходят в растягивающие). При этом их величина превышает предел текучести, что свидетельствует о возникновении пластических деформаций в этой зоне.

С учетом найденной величины критической нагрузки коэффициент запаса k по допустимому весу перевозимого груза для рассматриваемой конструкции составляет 4,2. Принимая во внимание сложность задачи (расхождение экспериментальных и расчетных данных в задачах устойчивости цилиндрических оболочек достигает 4 раз) и упрощенную расчетную схему (при решении задачи не учитывались загрузочные люки, использовалась приближенная формула для определения весовой нагрузки и т.д.), можно сделать вывод о целесообразности усиления конструкции в верхней зоне цилиндрической обечайки.

2. Анализ влияния внутреннего избыточного давления на устойчивость корпуса цистерны

Был проведен расчет деформирования цистерны при воздействии только весовой нагрузки. Сопоставление полученных результатов с данными предыдущего расчета показало, что при определении весовой нагрузки по формулам (2)–(4) внутреннее избыточное давление в 0,1 МПа незначительно влияет на величину критической нагрузки, хотя и вносит изменения в процесс складкообразования (изменяются размер зоны гофров и их величина). Иная картина получается в случае, если весовая нагрузка приложена только на нижней половине цилиндрической обечайки цистерны. Результаты расчетов с избыточным давлением 0,1 МПа и при его отсутствии представлены на рис. 5–7.

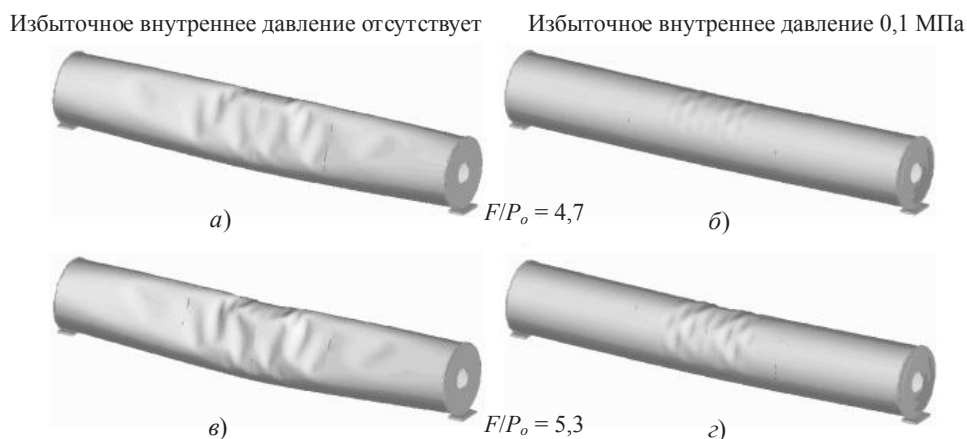


Рис. 5

Как видно из этих рисунков, отсутствие избыточного внутреннего давления (рис. 5, а, в и кривая с кружочками на рис. 6) приводит к изменению НДС цилиндрической оболочки и существенно снижает величину критической нагрузки. При этом сначала ($F/P_0 \approx 1,76$) происходит изменение поперечного сечения в средней части цилиндрической оболочки (рис. 7), а затем ($F/P_0 \approx 4,1$) на ней образуются локальные гофры в верхней сжимаемой зоне цилиндрической оболочки. Отметим, что при избыточном внутреннем давлении 0,1 МПа формоизменение корпуса конструкции (рис. 5, б, г) отличается от представленного на рис. 2: зона образования складок

становится шире, но глубина складок меньше. Однако, судя по графикам изменения параметра складкообразования, величина критической весовой нагрузки при этом практически не меняется. Другими словами, величина критической весовой нагрузки при наличии избыточного внутреннего давления мало зависит от взаимодействия цилиндрической обечайки и транспортируемого груза в верхней половине корпуса емкости.

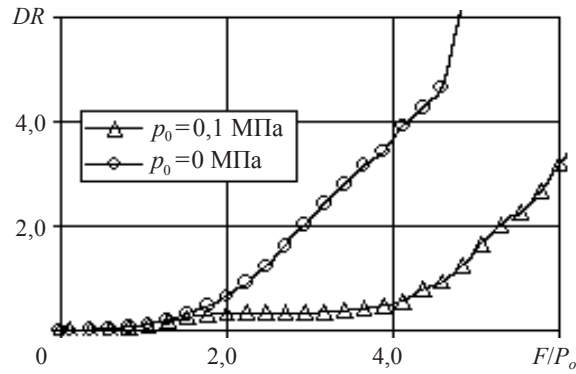


Рис. 6

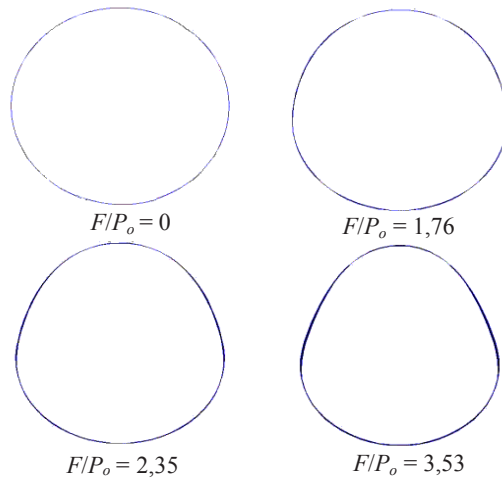


Рис. 7

Для проверки правильности определения критической весовой нагрузки был проведен расчет при следующем варианте нагружения:

- внутреннее избыточное давление в емкости нарастает до 0,1 МПа согласно формуле (1);
- далее на нижней половине цилиндрической оболочки задается весовая нагрузка:

$$F = \begin{cases} 0, & t \leq t_1, \\ kP_\varphi (1 - \cos(\pi t / \Delta t)) / 2, & t_1 \leq t \leq t_2, \\ P_\varphi, & t_2 \leq t, \end{cases} \quad (6)$$

где $t_1 = 30$ мс, $t_2 = 200$ мс, $k = 4$ – коэффициент запаса, P_ϕ – распределение весовой нагрузки (3) в поперечном сечении нижней половины цилиндрической оболочки. Как показал анализ результатов, корпус цистерны в этом случае не теряет устойчивости, что свидетельствует о правильности определения критической весовой нагрузки. Однако следует обратить внимание на то, что продольные растягивающие напряжения в конечном элементе B (см. рис. 2) достигли предела текучести и в этой области можно ожидать возникновения пластических деформаций, что недопустимо.

3. Исследование деформирования торцевой оболочки цистерны под воздействием подъемного устройства

Для анализа прочности и устойчивости корпуса цистерны в зоне крепления штока телескопического подъемного устройства были проведены расчеты с полусферической оболочкой на поднимаемом торце. В соответствии с проектом на этой оболочке моделировался узел крепления штока и торцевой оболочки (рис. 8). Поскольку для исследуемой конструкции отношение диаметра цилиндрической оболочки к ее толщине близко к 500, предполагалось, что деформируемостью узла крепления можно пренебречь и моделировать его по упрощенной схеме, адекватно передающей усилия от штока на торцевую оболочку. Нагружение цистерны осуществлялось внутренним давлением и весовой нагрузкой в соответствии с формулами (1)–(4). Для сравнения был выполнен второй вариант расчета, в котором на поднимаемом торце цистерны располагалась круглая тонкостенная пластина, а опора задавалась на нижнюю часть торца (см. рис. 8).

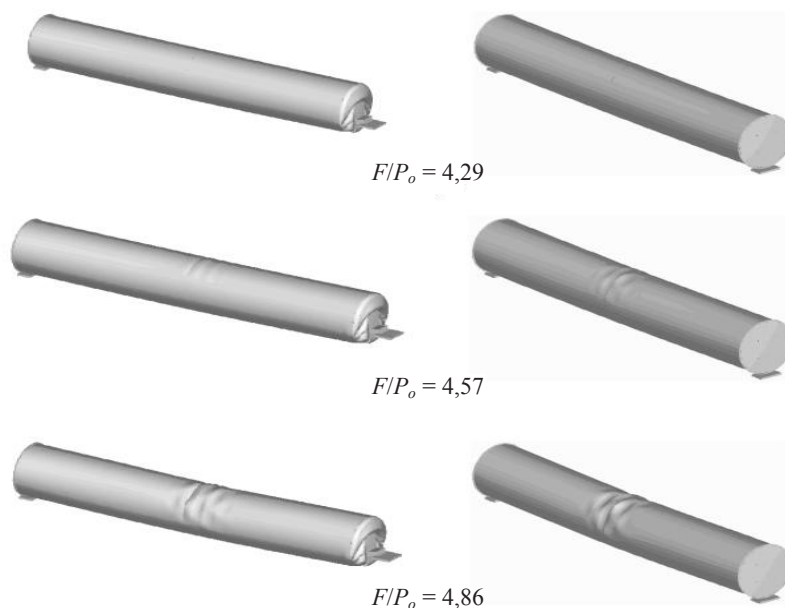


Рис. 8

Полученные результаты представлены в виде расчетных кинограмм процесса деформирования оболочки (рис. 8) и графиков изменения параметра складкообразования DR в зависимости от весовой нагрузки (рис. 9, ромбиками помечены результаты, относящиеся к первому варианту задачи, треугольниками – ко второму).

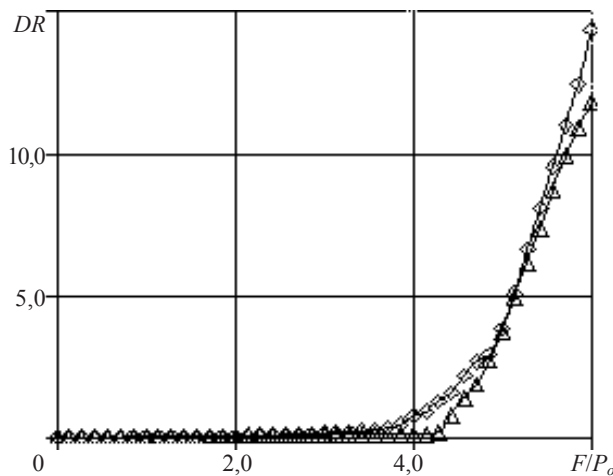


Рис. 9

Из анализа результатов расчетов следует, что при весовой нагрузке, равной примерно двум допустимым весам перевозимого груза, на полусферической оболочке поднимаемого торца цистерны образуется вмятина. При последующем увеличении весовой нагрузки вмятина углубляется, расширяется и при четырехкратном превышении весовой нагрузкой допустимого веса груза на торце цистерны образуются складки. Далее возникают и развиваются складки в средней части цилиндрической оболочки корпуса.

Судя по графикам изменения параметра складкообразования DR (см. рис. 9), критическое значение весовой нагрузки в обоих вариантах задачи составляет примерно 4 допустимых веса перевозимого груза. Таким образом, полученные результаты соответствуют приведенным ранее. Это позволяет предположить, что форма оболочек на торцах цистерны слабо влияет на выпучивание цилиндрической оболочки в средней части корпуса.

Дополнительные расчеты показали, что увеличение внутреннего избыточного давления до 0,2 МПа существенно уменьшает формоизменение конструкции на поднимаемом торце, но не приводит к увеличению критической нагрузки, при которой цилиндрическая оболочка корпуса теряет устойчивость.

Ключевые слова: численное моделирование, деформирование, потеря устойчивости, закритическое поведение, тонкостенные элементы, большегабаритные емкости, транспортировка сыпучих грузов, трехмерная геометрически и физически нелинейная задача, динамическая постановка, метод конечных элементов, явная схема интегрирования по времени типа "крест".

Литература

1. Баженов, В.Г. Численное моделирование нестационарных процессов ударного взаимодействия деформируемых элементов конструкций / В.Г. Баженов, А.И. Кибец, И.Н. Цветкова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1995. – № 2. – С. 20–26.
2. Программный продукт "Пакет прикладных программ для решения трехмерных задач нестационарного деформирования конструкций, включающих массивные тела и оболочки,

"Динамика-3" (ППП "Динамика-3"). Сертификат соответствия Госстандарта России № РОСС RU.ME.20.H00338.

[10.09.2008]

**NUMERICAL ANALYSIS OF DEFORMATION, STABILITY LOSS
AND SUPERCRITICAL BEHAVIOR OF LARGE-SIZED SHELLS USED
FOR AUTOMOBILE TRANSPORTATION OF FREE-FLOWING BULK MATERIAL**

V.G. Bazhenov, A.I. Kibets, M.V. Petrov, D.V. Shoshin

The numerical modeling results of deformation, stability loss and supercritical behavior of the thin-walled elements of shells, used for automobile transportations of free-flowing bulk material, are presented. The solution of 3-dimensional geometrically and physically non-linear problem is performed in a dynamic statement based on a finite-element method and explicit time integration scheme of "crest" type.

Key words: numerical modeling, deformation, stability loss, supercritical behavior, thin-walled elements, large-sized emptiers, transportation of free-flowing bulk materials, three-dimensional geometrically and physically nonlinear problem, dynamic statement, finite element method, explicit time integration scheme of "crest" type.