

2. Новиков В. В. *Анизотропно-упругий шар в свободном движении* // Прикладная математика и механика. – 1987. – Т. 17. – № 5. – С. 767–774.

Т. Г. Федорова, Е. Г. Гоник, А. И. Кибец, М. В. Петров

Нижегородский государственный университет,

kibec@mech.unn.ru

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ВЫПУЧИВАНИЯ
ПОДЪЕМНОЙ ЦИСТЕРНЫ
ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ СЫПУЧИХ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ АВАРИЙНОМ ПАДЕНИИ**

При проектировании тонкостенных конструкций наряду с оценкой прочности необходим анализ их устойчивости при всех возможных нагружениях. Большегрузная емкость для автомобильной транспортировки сыпучих грузов при разгрузке наклоняется. Для этого ее один торец шарнирно закрепляется на раме, а другой поднимается телескопическим устройством. Под действием весовой нагрузки корпус емкости (тонкостенная цилиндрическая оболочка $L/R = 9,28$, $R/h = 255$) при подъеме изгибается. Этот процесс может сопровождаться образованием пластических деформаций в центральной области и потерей устойчивости. Для обоснования соответствия проектируемой конструкции требованиям нормативных документов необходимо решение трехмерной геометрически и физически нелинейной задачи устойчивости замкнутой оболочки вращения с учетом моментности напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки.

Рассматривается динамическая постановка задачи. Система уравнений, описывающая движение оболочечной конструкции, формулируется в переменных Лагранжа [1 – 3]. Уравнения состояния устанавливаются отдельно для шаровых и девиаторных составляющих скоростей деформаций и напряжений. Зависимость шаровых компонент скоростей деформаций и напряжений предполагается линейной. Девиаторные составляющие тензора напряжений вычисляются с помощью соотношений теории течения с кинематическим и изотропным упрочнением [3], [4]. Уравнение движения выводится из баланса виртуальных мощностей работы. Система уравнений дополняется начальными и кинематическими граничными условиями. В зоне контакта рассматривается непроникание по нормали и свободное скольжение вдоль касательной к поверхности контакта.

Оценка предельной нагрузки осуществляется методом продолжения по параметру [5]. В соответствии с этим методом вес груза увеличивается пропорционально одному параметру (в данном случае времени) и из анализа формы конструкции, распределения поля перемещений определяется критическое значение весовой нагрузки.

Решение определяющей системы уравнений основано на методе конечных элементов и явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа “крест” [3], реализованных в рамках вычислительной системы “Динамика-3” [6]. Численное определение контактного давления в зонах взаимодействия деформируемых тел и статически эквивалентных ему сил в узлах кэ-сетки осуществляется из условий непроникания и законов сохранения массы и количества движения [4].

В расчетах емкость моделировалась замкнутой цилиндри-

чекой оболочкой ($h = 0,5$ см, $R/h = 255$, $L/R = 9,28$), которая на торцах опиралась на неподвижные, недеформируемые плиты. Оболочка выполнена из сплава АМг5.

Рассматривалось два варианта нагружения оболочки: весовая нагрузка и внутреннее давление плюс весовая нагрузка. Предполагалось, что венсовая нагрузка приложена на нижней половине оболочки и равномерно распределена вдоль оси вращения. Во втором варианте задачи при комбинированном нагружении на начальном этапе на поверхности оболочки задавалось внутреннее давление, которое постепенно увеличивалось до 0,1 МПа, после чего сохранялось постоянное значение. Затем прикладывалась весовая нагрузка, нарастающая по линейному закону.

Анализ результатов расчета показывает следующее. При отсутствии внутреннего давления при начальном этапе ($P/P_0 \geq 0,8$) поперечное сечение в средней части цилиндрической оболочки принимает каплевидную форму: по вертикали размер сечения увеличивается, а по горизонтали верхняя часть оболочки сужается. При $P/P_0 \approx 3$ в средней части цилиндрической оболочки образуются вертикальные складки. Последующее нагружение приводит к увеличению числа складок и их размеров. При $P/P_0 \approx 5$ в верхней части оболочки образуется горизонтальная вмятина. Со временем она увеличивается и приводит к общей потере устойчивости оболочки. В нижней части оболочки растягивающие продольные напряжения в центральном поперечном сечении превышают предел текучести, что приводит к появлению пластических деформаций. Продольные напряжения в зоне гофров после потери устойчивости меняют знак. При этом их величина также достигает предела текучести. Таким образом, в первом варианте задачи

коэффициент запаса (отношение критической нагрузки к допустимому весу перевозимого груза) рассматриваемой тонкостенной конструкции равен 5.

Внутреннее давление при комбинированном нагружении существенно влияет на устойчивость оболочки. Значение критической нагрузки увеличивается в 1,76 раза и коэффициент запаса становится равным 8,8. Зона складкообразования сужается и размеры складок уменьшаются. Избыточное внутреннее давление приводит к изменению НДС цилиндрической оболочки. В частности, нижняя растягиваемая часть оболочки деформируется упруго. Амплитуда колебаний продольных напряжений в зоне складкообразования до потери устойчивости существенно уменьшается.

Для сравнения были проведены численные исследования деформирования и потери устойчивости замкнутой цилиндрической оболочки $L/R = 12,5$, $R/h = 255$ (длина оболочки увеличена в 1,35 раза). Допустимый вес транспортируемого груза в этом случае равен 40 т. Получаем, что увеличение длины оболочки в 1,35 раза снижает значение критической нагрузки более чем в 2 раза. С учетом данных расчетно-экспериментальных исследований [7] для рассматриваемой цистерны можно рекомендовать усиление конструкции для обеспечения ее устойчивости при разрузке.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0227, гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ НШ-2843.2012.8, РФФИ (проекты №№ 11-08-00557-а, 12-08-33106-мол_a_вед, 13-08-90733 мол_рф_нр, 13-08-90732 мол_рф_нр).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Belytschko T., Liu W. K., Moran B. *Nonlinear finite elements for continua and structures*. – New York: John Wiley Sons, 2000. – 600 p.
2. Bathe K-Y. *Finite element procedures*. – New Jersey: Upper Saddle River “Prentice Hall”, 1996. – 1037 p.
3. Артемьева А. А., Баженов В. Г., Кибец А. И., Лаптев П. В., Шошин Д. В. *Верификация конечно-элементного решения трехмерных нестационарных задач упругопластического деформирования, устойчивости и закритического поведения оболочек* // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3. – № 2. – С. 5–14.
4. Баженов В. Г., Кибец А. И., Цветкова И. Н. *Численное моделирование нестационарных процессов ударного взаимодействия деформируемых элементов конструкций* // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1995. – № 2. – С. 20–26.
5. Шалашилин В. И., Кузнецов Е. Б. *Метод продолжения решения по параметру и наилучшая параметризация в прикладной математике и механике*. – М: Эдиториал УРСС, 1999.
6. Сертификат соответствия Госстандарта России № РОСС RU.ME20.H00338.
7. Баженов В. Г., Кибец А. И., Петров М. В., Шошин Д. В., Федорова Т. Г. *Теоретическое и экспериментальное исследование потери устойчивости и закритического поведения тонкостенной цилиндрической оболочки при изгибе* // Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2009. – Вып. 71. – С. 77–83.