

УДК 539.3

Компьютерное моделирование разрушающей нагрузки на топливный бак

В. И. Гнитко, К. Г. Дегтярев, А. М. Тонконоженко

Национальный технический университет «ХПИ», Украина

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина

Государственное конструкторское бюро «Южное», Украина

Рассмотрена упруго-пластическая задача поиска разрушающего внутреннего давления в цилиндрическом топливном баке с торосферическими днищами. Решение выполнено с использованием метода конечных элементов.

Ключевые слова: метод конечных элементов, разрушающая нагрузка, оболочка вращения, математическая модель, пластическая деформация

Розглянуто пружно-пластичну задачу пошуку руйнівного внутрішнього тиску в циліндричному паливному баці з торосферичними днищами. Розв'язок знайдено з використанням методу скінченних елементів.

Ключові слова: метод скінченних елементів, руйнівне навантаження, оболонка оберту, математична модель, пластична деформація

The elasto-plastic problem of destructive internal pressure evaluation is considered for cylindrical tank with a torispherical ends. The solution was received by finite element method.

Key words: finite element method, breaking load, shell of revolution, mathematical model, plastic deformation

1. Истоки исследования и его актуальность

В различных областях инженерной практики, таких как авиастроение, транспорт, энергетическое машиностроение широко применяются элементы ответственных тонкостенных конструкций, которые функционируют в условиях повышенных технологических нагрузок. К числу таких объектов относятся топливные баки, цистерны, резервуары, корпуса энергетических установок, насосов, компенсаторы сдвиговых и осевых перемещений, колонны выпарных аппаратов, нефтехранилища и т.п. Элементами этих конструкций являются оболочки вращения с различными формами меридиана.

Использование компьютерных средств для проведения виртуального эксперимента позволяет не только получить необходимые результаты без испытания реальной конструкции, но и сделать это значительно быстрее, что несет несомненную выгоду как во временном, так и в денежном эквиваленте.

Анализ работ [1-4], посвященных расчету оболочек, в том числе моделирующих сосуды и резервуары с опасными заполнителями, позволяет выделить в настоящее время в качестве основных и наиболее эффективных методов расчета на прочность методы численного интегрирования, метод конечных разностей и метод конечных элементов (МКЭ).

В первых работах [1, 2] по расчету оболочек вращения МКЭ поверхность оболочки описывали ансамблем простейших плоских треугольных и четырехугольных конечных элементов с линейной аппроксимацией поля перемещений. Применение этих элементов обеспечивало приемлемую точность

расчета только при исследовании узкого класса оболочек с небольшими градиентами напряжений.

Со временем эффективность конечных элементов для расчета оболочек на основе теории Кирхгофа-Лява повышалась как за счет увеличения порядка аппроксимирующих искомым функций, так и благодаря более точной аппроксимации геометрии оболочки, в связи с чем стали применяться сначала плоские, а затем и неплоские криволинейные элементы с достаточно большим числом степеней свободы [6-8].

Одновременно с усложнением геометрии конечных элементов происходило и повышение порядка аппроксимирующих полиномов как за счет увеличения числа степеней свободы в узлах, так и путем введения дополнительных узловых точек [1, 2], что позволяло обеспечить лучшую сходимость и точность метода.

За сравнительно короткий период существования, использования и постоянного усовершенствования МКЭ были решены многие теоретические вопросы, предложено большое количество различных типов конечных элементов, разработаны программные пакеты, обеспечивающие проектирование сложных современных конструкций. Опубликовано большое количество монографий, обзоров и статей, среди которых известные монографии О. Зенкевича, Дж. Одена, В.А. Постнова и И.Я. Харахурима, Г. Стренга и Дж. Фикса, К. Бате и Е. Вилсона, А.С. Сахарова и И. Альтенбаха. Многие теоретические разработки стали основой для создания мощных программных комплексов решающих самые сложные задачи.

Полученные в последнее десятилетие теоретические результаты и построенные на основе метода конечных элементов программные комплексы позволили ставить и решать задачи о предельном равновесии, определять разрушающие нагрузки на элементы конструкций. Среди таких работ отметим [9, 10]. Но до сих пор не нашли должного отражения вопросы прочности и определения критических нагрузок на оболочечные конструкции с учетом влияния пластических деформаций, остаточных напряжений, наличия дефектов, особенно важные для тех элементов конструкций, которые работают в условиях повышенных технологических нагрузок.

2. Общая постановка задачи

Необходимо определить разрушающее внутреннее давление в сосуде, наполненном жидкостью. Первоначально этот сосуд представляет собой оболочечную конструкцию длиной $L = 0,524$ м, диаметром $D = 0,134$ м. Крышка и днище имеют торосферический профиль, созданный путем совмещения двух дуг радиуса 0,085 м и 0,025 м. Первый патрубок впаян в крышку посередине, параллельно к оси X, а второй в днище под углом 15° к оси X. Сосуд заполнен жидкостью и имеет еще один патрубок, а также кронштейн крепления на крышке.

Для упрощения расчета пренебрегали влиянием гидростатического давления жидкости, как несоизмеримо малым по сравнению с искомым разрушающим давлением: 0,005 МПа против 27 МПа, а также не рассматривался патрубок на теле конструкции, находящийся в слабо нагруженном месте. В последствии также не учитывались кронштейн и патрубок, вызывающие

неосесимметричность, которая практически не сказывается на результате расчета.

Материал сосуда – сталь 25ХГСА.

Приведем характеристики этого материала: модуль упругости $E = 209$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, предел текучести $\sigma_{\tau} = 834$ МПа, предел прочности $\sigma_{вр} = 1080$ МПа.

Диаграмма деформирования была построена в Институте механики им. С.П. Тимошенко по данным испытаний КБ "Южное, а также по известным литературным данным [5]. Значения напряжений одноосного растяжения и соответствующих деформаций представлены на рис.1.

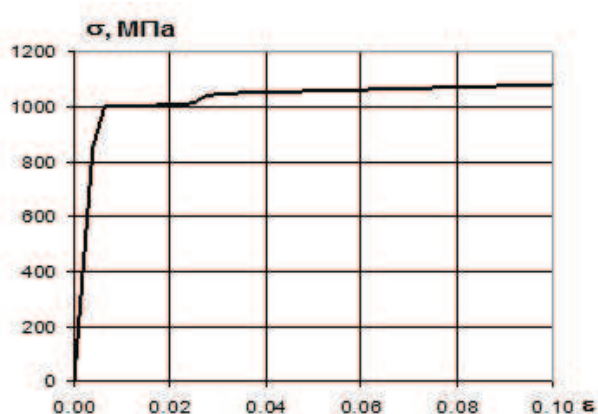


Рис.1. Диаграмма деформирования стали 25ХГСА

Задача рассматривалась в упругопластической постановке.

Поскольку реальная конструкция представляет собой тонкую оболочку ($h/R=4/67.1=0.05$ для участка с наибольшей толщиной), для расчета с использованием ANSYS Multiphysics была выбрана оболочечная модель. При этом учитывалось реальное неосесимметричное закрепление.

Задача решалась при помощи программного комплекса, основанного на методе конечных элементов, с проведением двух независимых расчетов. В первом используется плоский конечный элемент Shell281, который является наиболее подходящим как для анализа тонких оболочек, так и оболочечных конструкций. Элемент имеет восемь узлов с шестью степенями свободы в каждом: перемещения по осям X, Y, Z и повороты вокруг них.

Shell281 позволяет также учитывать изменения толщины оболочки в нелинейном анализе.

На рис. 2 показаны конфигурация, местонахождение узлов, и система координат элемента. Элемент определяется толщиной и восемью узлами (I, J, K, L, M, N, O и P). Он может принимать треугольную форму.

Эквивалентное напряжение σ_e определяется в зависимости от используемого критерия длительной прочности:

- критерий максимального главного нормального напряжения

$$\sigma_e = \sigma_{\max}; \quad (1)$$

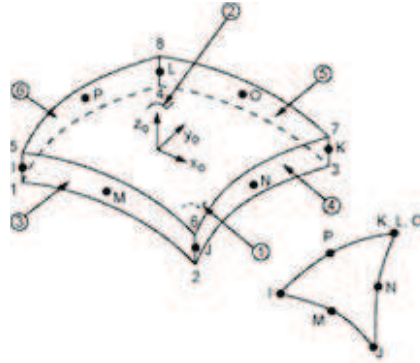


Рис.2. Конечный элемент SHELL281

- критерий интенсивности нормальных напряжений (критерий Мизеса)

$$\sigma_e = \sigma_i = S\sqrt{3}; \quad (2)$$

- критерий Сдобырева

$$\sigma_e = \frac{1}{2}(\sigma_i + \sigma_{\max}). \quad (3)$$

Могут быть использованы и другие критерии прочности (Треска, максимальных деформаций и др.).

3. Построение конечно-элементной модели

Были проведены расчеты для 3-х разных моделей (рис. 3. а, б, в):

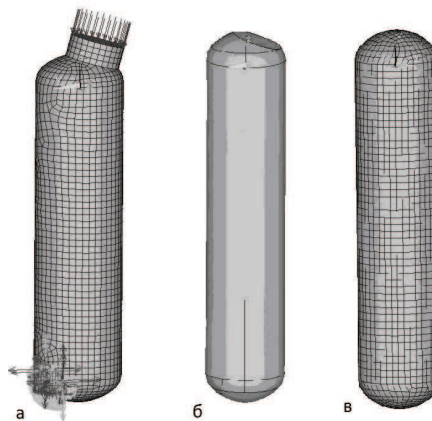


Рис.3. Модели конструкций

а) С горловиной и крышкой. Нагрузка: усилие, действующее на бак, моделируется распределенной нагрузкой по горловине бака;

б) С крышкой без горловины. Нагрузка: усилие, действующее на бак (моделируется распределенной нагрузкой по крышке бака) и внутреннее давление;

в) упрощенная модель конструкции без горловины и крышки. Нагрузка: внутреннее избыточное давление.

При этом геометрические характеристики оболочечной конструкции и параметры материала (сталь 25ХГСА) приведены выше. Крепление бака для всех 3-х случаев одинаковое – жесткая заделка в месте приложения кронштейна.

Следует отметить, что расчет проводился для разных сеток, из которых была выбрана оптимальная с размером элемента 0.01 м.

Для решения данной задачи был выбран оболочечный восьми узловой конечный элемент Shell281. Толщины задавались функцией BOT, т.е. откладывались от внутренней поверхности.

4. Описание процесса нагружения

Нагружение для всех трех моделей, описанных выше, определялось согласно данным, предоставленным КБ "Южное":

- а) действие сжимающей силы R согласно табл. 1.;
- б) одновременное действие сжимающей силы R и внутреннего избыточного давления P согласно табл. 1.;
- в) внутреннее избыточное давление вплоть до разрушения.

Нагружение во всех случаях происходило пошагово: шаг соответствовал 0.01 МПа, при необходимости шаг измельчался автоматически

Давление P, МПа	Сжимающая сила R, Н
0	0
2.5	6250
5.0	12500
7.5	18750
10.0	25000
17.0	42500
0	0

Из данных эксперимента и проведенных расчетов было установлено, что после разгрузки в оболочке не осталось остаточных пластических деформаций. Поэтому, на третьем этапе нагружения (от 17 МПа), мы можем упростить расчетную схему до рассмотрения осесимметричной конструкции (оболочечной конструкции, состоящей из цилиндрической, тороидальной и сферической частей), при осесимметричном нагружении и закреплении.

5. Анализ численных результатов

Далее приведем результаты расчетов для 3-х разных моделей, описанных в разд. 3:

- а) в результате расчетов конструкции с горловиной, на которую действует только сжимающая сила, стало очевидным, что вклад усилий, переданных через горловину, ничтожно мал. На рис. 4 видно, что данное усилие не вызывает пластических деформаций, т.к. $\sigma_{e\max} = 371$ МПа, что значительно меньше предела текучести;



Рис.4. Эквивалентные напряжения по Мизесу

б) из предыдущего расчета следует, что влиянием горловины можно пренебречь. Поэтому был проведен расчет конструкции без горловины, нагруженной усилием на крышку и внутренним избыточным давлением. Из полученных результатов видно, что основной вклад в нагружение идет от внутреннего давления. Незначительные пластические деформации возникают только вблизи кронштейна (рис. 5), поэтому целесообразно проводить расчет без учета сжимающей силы. Это позволяет рассчитывать конструкцию как оболочку вращения, нагруженную внутренним давлением.

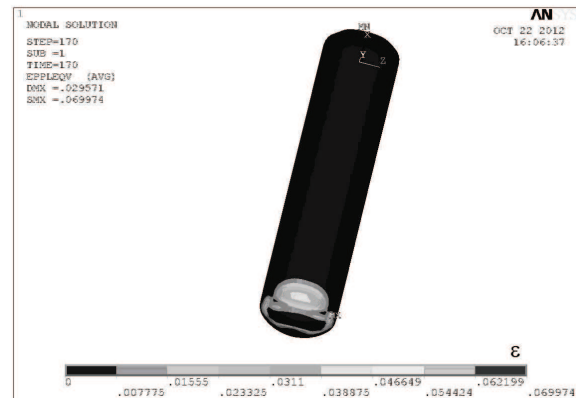


Рис.5. Эквивалентные пластические деформации по Мизесу.

в) Ввиду вышесказанного, далее будем рассматривать упрощенную конструкцию.

Разрушающая нагрузка по критерию Мизеса достигнута на 280-ом шаге, при этом $P_{\max} = 27,342$ МПа.

Это последний шаг по нагрузке перед разрушением. На рис. 6,7 показаны напряжения и деформации вдоль меридиана оболочки соответствующие этому моменту нагружения. Результаты приведены для точек наружной - TOP и внутренней - BOT поверхности.

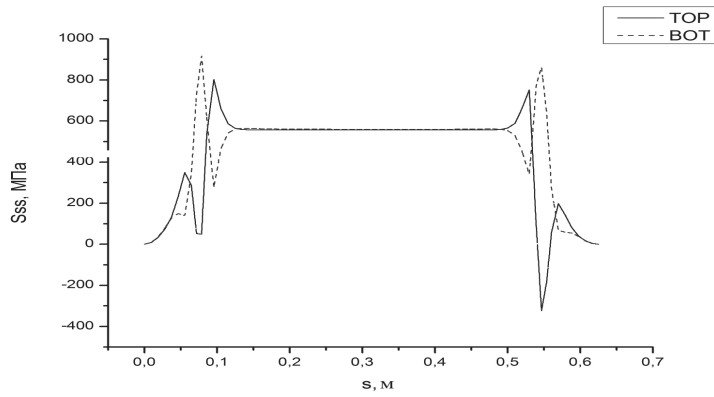


Рис.6. Меридиональные напряжения

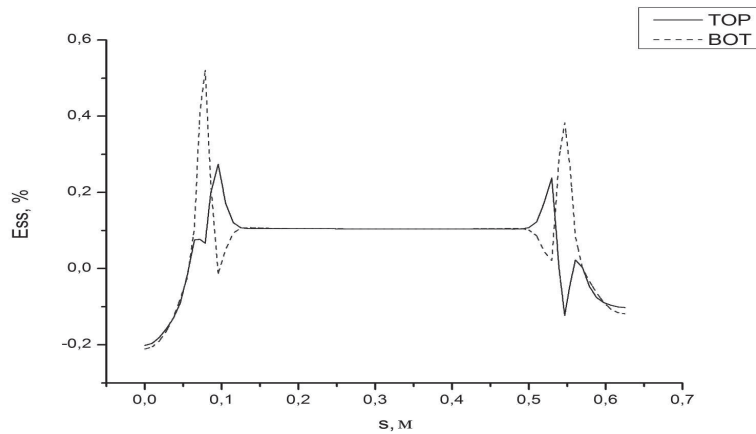


Рис.7. Меридиональные деформации

Для сравнения расчетных и экспериментальных данных выбраны показания двух датчиков E35, E36 установленных в наиболее опасных местах по величине деформации в меридиональном и окружном направлении для разных уровней давления.

Табл. 2. Сравнение результатов					
Результаты эксперимента			Результаты в ANSYS		
P, МПа	E35, %	E36, %	P, МПа	E35, %	E36, %
16.98	0.09	0.315	17.10	0.0658169	0.277345
17.27	0.091	0.32	17.60	0.0677266	0.285488
17.39	0.095	0.335	20.10	0.0773571	0.326223
18.13	0.1	0.357	20.60	0.0792843	0.334377
19.18	0.103	0.37	21.10	0.0812112	0.342533
19.73	0.113	0.414	21.60	0.0831388	0.350692
22.67	0.127	0.484	24.10	0.0928259	0.405258
24.24	0.135	0.585	24.60	0.0947605	0.430416

На рис. 8 приведені графіки, побудовані по табл. 2., характеризуючі розрахункові та експериментальні дані для окружних та меридіональних деформацій. Сплошні лінії відповідають результатам розрахунків, точки – експериментальним даним.

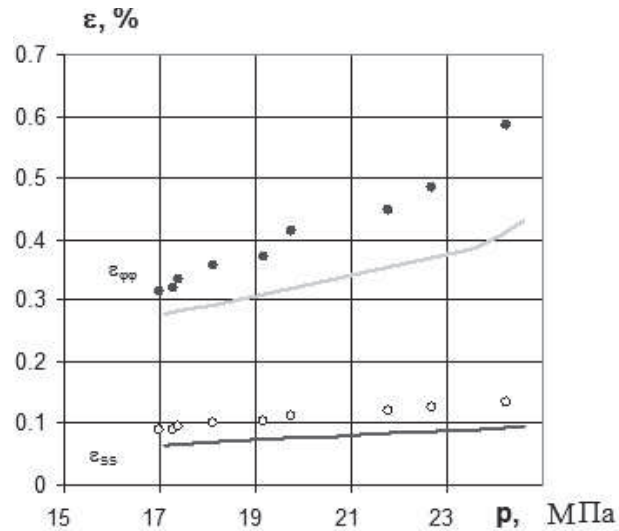


Рис.8. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Таким образом, по данным эксперимента разрушающая нагрузка составляет около 25 МПа, а по результатам расчета выходит 27,34 МПа. Различие результатов составило примерно 10 %.

6. Выводы и направления дальнейших исследований

1. Разработана методика расчета разрушающей нагрузки на оболочечную конструкцию на основе конечно-элементного ПК, соответствующая этапам проведения эксперимента КБ «Южное».

2. Данные расчетов показали, что при определении разрушающего давления задачу определения разрушающей нагрузки можно рассматривать в осесимметричной постановке.

3. Установлено, что использование трехмерных элементов нецелесообразно, так как различие данных расчетов по определению разрушающей нагрузки с использованием оболочечных и пространственных элементов составляет не более 1 %.

4. По данным расчетов разрушение начинается на внутренней поверхности сосуда, однако интенсивности напряжений по Мизесу на внутренней и внешней поверхностях отличаются в четвертом знаке.

5. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными КБ «Южное» (различие составляет 10 %).

В дальнейшем методика может быть доработана и расширена на более широкий спектр задач, как например нестандартные тела вращения с разветвленным меридианом или толстостенные оболочки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред / О. Зенкевич, И. Чанг. – М.: Недра, 1974. – 239 с.
3. Шимановский А. О., Путято А.В. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики / А.О. Шимановский, А.В. Путято. - Беларусь, БелГУТ, 2008. – 61 с.
4. Reddy J.N. Nonlinear finite element analysis. Oxford University press, 2004 – 221с.
5. Куркин С.А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением / С.А. Куркин. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
6. Раджу И. Матрицы жесткости элементов в форме сектора / И. Раджу, А. Рао // Ракет. техника и космонавтика. – 1961. – Т. 7, № 1. – С.195–196.
7. Меламед Э.Ш. Расчет тонких оболочек с использованием конечного элемента естественной кривизны / Э.Ш. Меламед // Тр. МИИТ. –1969. –Вып.342. – С.64–80.
8. Городецкий А.С. К расчету пространственных тонкостенных конструкций методом конечных элементов / А.С. Городецкий // Тр. Киев. Ин-та электросварки им. Б.Е. Патона АН УССР. –1971. –Вып. 2. – С.37–45.
9. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения / Ю.Г. Матвиенко. – М. : Физматлит, 2006. – 320 с.
10. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н.А. Махутов. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.