

УДК 621.039: 621.726

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

О.К. Морачковский¹, С.Ю. Саенко²

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

²Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»

Представлены результаты расчетного моделирования методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния керамического контейнера под действием статических и динамических нагрузок, возникающих при отклонениях от штатных эксплуатационных условий.

Введение

Одним из наиболее вероятных событий, связанных с радиационной опасностью при хранении радиоактивных отходов (РАО), является угроза отказа в штатном режиме использования бетонных упаковок хранения за счет их механического разрушения, например, при штабелированном хранении, падении в ходе крановой перезагрузки, транспортировки или ударного воздействия на контейнеры в целях их разрушения.

Учитывая большие количества хранящихся в Украине РАО, можно сделать вывод, что ущерб и масштабы радиационного загрязнения в случае деградации емкостей хранения и рассеяния радиоактивных веществ могут быть значительными. Поэтому в Украине, как и во многих других странах, в настоящее время стоит вопрос снижения радиационной опасности существующих критически важных объектов, таких как хранилища радиоактивных отходов. Одним из вариантов достижения этого является разработка новых защитных материалов и конструкций на их основе для создания контейнеров для хранения РАО, отличающихся повышенной прочностью по сравнению с традиционными бетонными [1]. Наибольший интерес в ряду таких материалов занимают керамические борсодержащие композиты систем $B_4C - MeB_2$ ($Me - Ti, Zr, Hf$) и $B_4C - W_2B_5 - TiB_2$, получаемые методами горячего прессования и реакционного горячего прессования порошковых компонентов на основе бора, углерода, вольфрама, карбида бора, оксидов титана, циркония и гафния.

Сказанное выше обуславливает целесообразность продолжения ранее проведенных исследований [2] и разработки методов моделирования поведения контейнеров из керамических композитов под действием различных механических нагрузок для рационализации конструкции и состава материалов этих контейнеров.

Целью работы является разработка эффективного метода моделирования напряженно-деформированного состояния керамического контейнера под действием статических и динамических нагрузок как при его падении с высоты, так и при внешнем ударе в контейнер.

Постановка задач и исходные данные

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка математического и на базе современных компьютерных программных комплексов COSMOS и ANSYS конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния керамического контейнера под действием статических и динамических нагрузок;
- проведение численных расчетов для анализа прочности, жесткости и герметичности конструкции контейнера, узла герметизации крышки и корпуса;
- численный анализ влияния толщины стенки контейнера в диапазоне 100...50 мм на его прочностные характеристики.

Основные конструктивные особенности контейнера представлены на рис. 1, а обобщенные исходные данные для проведения расчетов представлены в табл. 1.

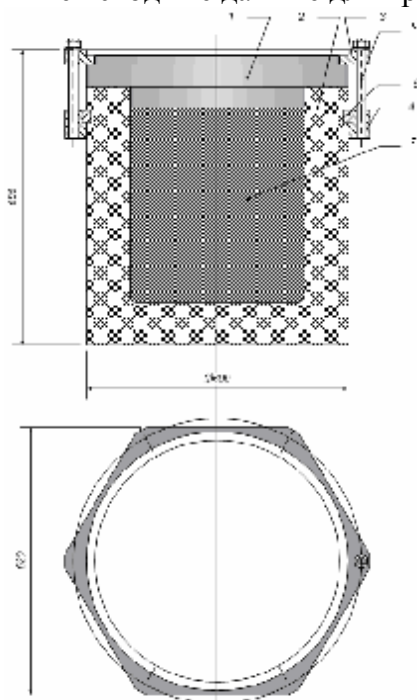


Рис. 1. Конструкция керамического контейнера: 1 – крышка; 2 – корпус; 3 – фланец; 4 – фланец; 5 – кольцо разрезное; 6 – шпилька; 7 – РАО

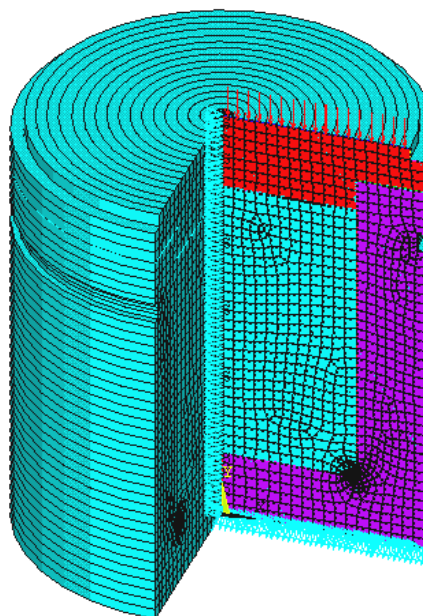


Рис. 2. Конечно – элементная схема керамического контейнера

Т а б л и ц а 1

Свойства материалов контейнера

Параметр	Сталь	Керамика
Прочность при сжатии (σ_B) _с , МПа		1400
Прочность при изгибе (σ_B) _б , МПа		750
Модуль упругости E , ГПа	210	200
Коэффициент Пуассона ν	0,3	0,28 - 0,36
Ударная прочность a_n , ГПа		4,2 - 7
Массовая плотность ρ , г/см ³	7,8	5,8 - 6
Коэффициент трения		0,2 - 0,3

Расчеты выполнены в соответствии с разд. 4.5 руководящих материалов ГОСТ 51824 – 2001 «Контейнеры защитные невозвратные для радиоактивных отходов. Общие технические требования». Эти требования предполагают, что проектируемая конструкция контейнера при испытаниях должна выдерживать:

- статистическую нагрузку на сжатие в течение 24 ч, равную пятикратному значению массы заполненного контейнера, моделирующую нагрузку при штабелировании;
- динамическую нагрузку, возникающую при падении контейнера с отходами на жесткое основание с высоты 0,5 м.

Результаты расчетного моделирования

Решение задачи статического деформирования контейнера. Метод решения математически сформулированной задачи в виде системы соответствующих уравнений согласно [2] в данной работе основан на конечно-элементном моделировании напряженно-деформированного состояния керамического контейнера под действием статических и динамических нагрузок. На базе современных компьютерных программных комплексов COSMOS и ANSYS геометрическая конечно-элементная схема контейнера принята в виде, представленном на рис. 2.

Системы разрешающих дифференциальных уравнений относительно узловых перемещений конструкции для анализа динамических процессов деформирования или алгебраических уравнений при известных силах инерции $\{F^{in}\} = -[M]\{\ddot{u}\}$, в частности для анализа статических процессов деформирования, имеют вид [3]

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^{pr}\} + \{F^{nd}\}, \quad (1)$$

где $[M]$, $[K]$ – матрицы масс и жесткости;

$\{F^{pr}\}$, $\{F^{nd}\}$ – векторы-столбцы поверхностных распределенных и сосредоточенных сил;

$\{u\}$ – вектор-столбец неизвестных узловых перемещений.

Конкретизация физико-механических и геометрических параметров позволяет однозначно определить решение системы уравнений (1) и по численным данным определить напряженно-деформированное состояние керамического контейнера в целях оценки его прочностных свойств.

Вследствие особенностей поведения материала конструкции (различные значения пределов прочности на растяжение и сжатие) для оценки прочности в максимально напряженных местах конструкции и в стенках контейнера эквивалентные напряжения вычислены по теории прочности Губера – Хенки – Мизеса и по теории прочности Мора [4]. Расчетами устанавливались распределения двух характеристик напряженно-деформированного состояния: интенсивности напряжений по Мизесу – σ_i и первого главного напряжения – σ_1 .

Условие прочности должно быть выполнено, когда по критериям прочности выполняются два следующих неравенства:

$$\sigma_i < \sigma_B^C, \quad \sigma_1 < \sigma_B^P, \quad (2)$$

Причем при проверке второго условия важен знак максимального главного напряжения – σ_1 , что дополнительно позволяет оценить опасность разгерметизации соединения корпуса с крышкой, когда эти напряжения будут положительными.

Согласно ГОСТ 51824 – 2001, проектируемый контейнер должен выдерживать статическую нагрузку, равную пятикратной перегрузке массы заполненного контейнера, моделирующую нагрузку при штабелировании. Кроме того, следует отметить, что на прочность конструкции оказывает влияние и степень затяжки фланцевого соединения. Геометрия и условия соединения элементов конструкции, представленные на рис. 1, позволяют рассматривать задачу в осесимметричной постановке. В расчетах использована схема, представленная на рис. 3.

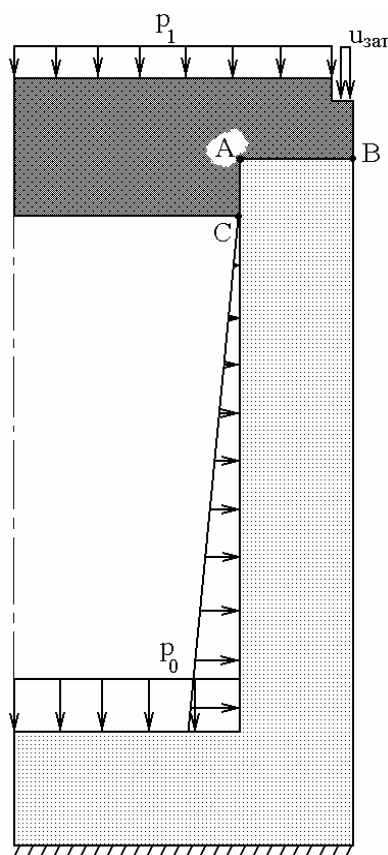
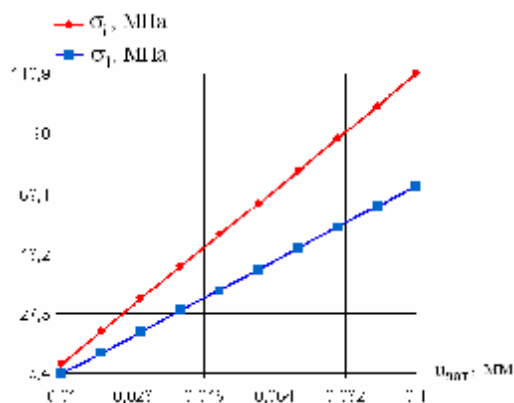
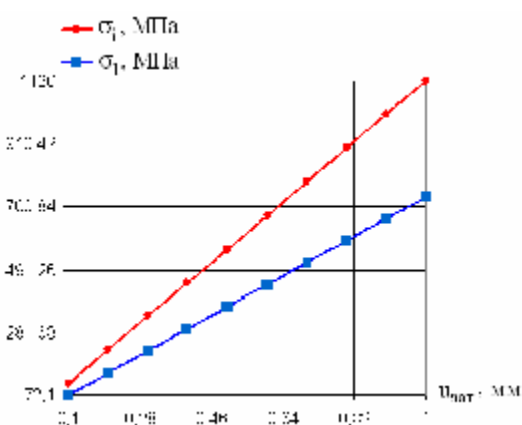


Рис. 3. Расчетная схема

Рис. 4. Зависимость интенсивности напряжений σ_1 и первого главного напряжения σ_1 от величины затяжки в диапазоне 0,01...0,1 ммРис. 5. Зависимость интенсивности напряжений σ_1 и первого главного напряжения σ_1 от величины затяжки в диапазоне 0,1...1 мм

При этом в расчетной схеме (рис. 3) непосредственно рассматриваются только крышка и корпус. Крышка и корпус находятся в условиях контактного взаимодействия по линиям АВ и АС. Нижний торец корпуса в расчетах при статической нагрузке считается неподвижным. В точках выступа крышки считается заданным вертикальное перемещение $u_{зат}$, которое возникает вследствие затяжки шпилечных соединений. На внешнюю поверхность крышки действует давление p_1 , моделирующее нагрузку при штабелировании. Влияние содержимого контейнера на напряженно-деформированное состояние конструкции учитывается заданием гидростатического давления на внутренней поверхности корпуса (максимальное значение $p_0 = \rho gh$, здесь ρ – массовая плотность содержимого контейнера, g – ускорение свободного падения, h – высота полости корпуса).

Путем задания специальным образом свойств этих контактных элементов были смоделированы особенности взаимодействия между крышкой и корпусом на горизонтальной поверхности (линия АВ на рис. 3) и на вертикальной поверхности (линия АС на рис. 3). Особенности взаимодействия на горизонтальной поверхности заключаются в том, что крышка не может перемещаться по отношению к корпусу, в противном случае можно говорить о разрушении шпилечного соединения. Для горизонтального слоя контактных элементов необходимо задавать сдвиговую жесткость, по крайней мере, на порядок большую, чем у взаимодействующих элементов конструкции.

Пятикратное значение суммарной массы увеличивает давление на крышку контейнера при штабелировании до 0,2 МПа, внутреннее гидростатическое давление составляет 11048 Па. В расчетах величина затяжки ($u_{\text{зат}}$) варьировалась в диапазоне 0,01...1 мм. Следует отметить, что качественная картина распределения напряжений в конструкции не меняется в зависимости от величины затяжки. Максимумы интенсивности напряжений и первого главного напряжения наблюдаются в крышке (рис. 4 и 5).

Следующая серия расчетов была проведена в целях оценки влияния толщины стенки на прочность контейнера. Толщина стенки варьировалась с шагом 10 мм в пределах 50...100 мм. Причем внешние (габаритные) размеры оставались неизменными. Так как в этом случае изменялся объем внутренней полости контейнера, то в расчетах учитывалось изменение массы наполнения и, как следствие, изменение максимума гидростатического давления. Расчеты проводились для трех значений затяжки: 0,1 мм, 0,5 мм и 1 мм. В табл. 2, на рис. 6 и 7 представлены полученные зависимости σ_1 и σ_1 от толщины стенки контейнера при затяжке 0,1 мм, 0,5 мм и 1 мм.

Т а б л и ц а 2

Влияние толщины стенки на прочность корпуса при различных величинах затяжки шпилек

h , мм	$u_{\text{зат}} = 0,1$ мм		$u_{\text{зат}} = 0,5$ мм		$u_{\text{зат}} = 1$ мм	
	σ_1 , МПа	σ_1 , МПа	σ_1 , МПа	σ_1 , МПа	σ_1 , МПа	σ_1 , МПа
50	73	51,5	372	264	746	525
60	84	60	425	304	851	609
70	93	65	469	332	940	665
80	100	69,2	506	351	1013	702
90	106	71,4	536	361	1072	724
100	111	72,4	560	365	1120	733

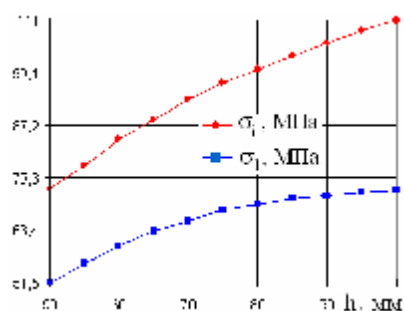


Рис. 6. Зависимость интенсивности напряжений и первого главного напряжения от толщины стенки при затяжке 0,1 мм

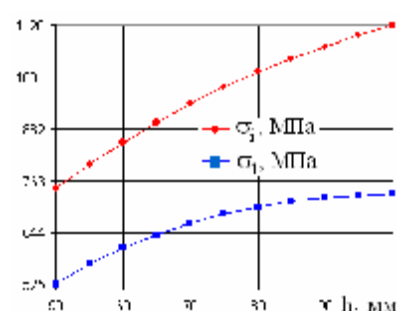


Рис. 7. Зависимость интенсивности напряжений и первого главного напряжения от толщины стенки при затяжке 1 мм

Отметим, что зависимости имеют нелинейный характер, причем для σ_1 нелинейность выражена более явно, а при увеличении толщины стенки до 90...100 мм его изменение становится незначительным. При всех рассмотренных сочетаниях толщины стенки корпуса контейнера и величины затяжки максимальные напряжения не превышают предельных значений, тем самым обеспечивается работоспособность конструкции контейнера при хранении РАО.

Решение задачи динамического деформирования контейнера. Для оценки прочности и герметичности элементов контейнера, изготовленного из керамики, выполнен анализ напряженно-деформированного состояния в интервале времени ударного взаимодействия контейнера с жестким основанием при вертикальном его падении с высоты 0,5 м. Предварительными расчетами в программном комплексе КИДИМ [3] определены распределения нормальных сил-реакций, векторов ускорений и скоростей элементов контейнера. Для оценки прочности элементов конструкции и герметичности контейнера эти данные используются для кинестатического расчета методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния в момент времени, когда ударный импульс принимает максимальное значение в интервале времени контактного взаимодействия 0,3...0,35 с. Численное значение максимального ускорения контейнера составило 21700 м/с^2 . Геометрическая конечно-элементная модель и условия закрепления контейнера реализованы в программном комплексе ANSYS и сохранены теми же, что и при исследованиях статического нагружения. Условия нагружения приняты отвечающими весу и силам инерции, распределенным по объему конструкции, подсчитанным по максимальному ускорению из интервала времени взаимодействия днища контейнера с основанием. Результаты расчета с помощью комплекса ANSYS в виде распределения интенсивности напряжений в максимально напряженных местах конструкции представлены на рис. 8. Следует отметить, что максимальное значение интенсивности напряжений составляет 856 МПа.

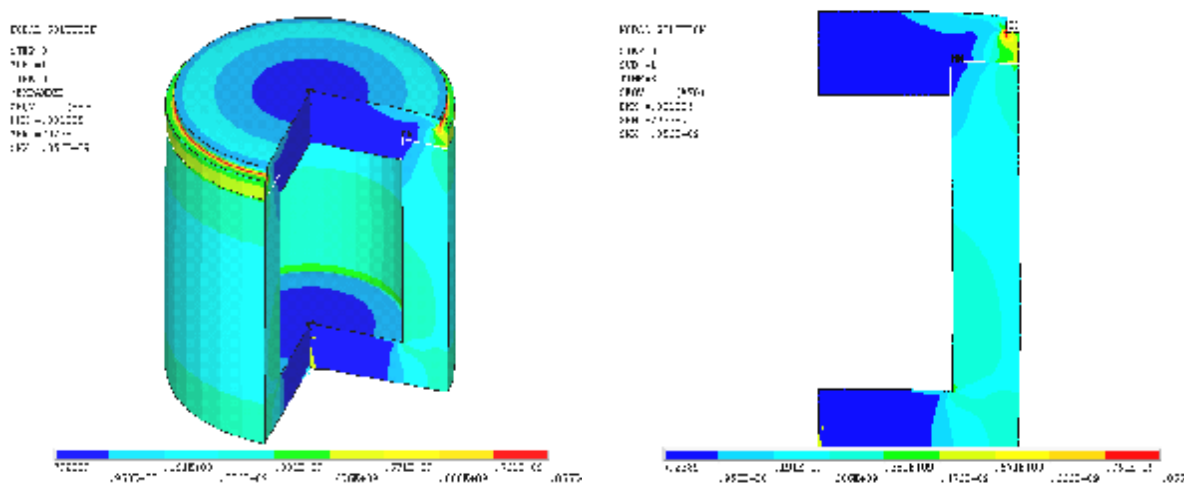


Рис. 8. Распределение интенсивности напряжений, Па (затяжка 1 мм)

Выводы

Разработана методика, базирующаяся на методе конечных элементов, с использованием компьютерных комплексов COSMOS и ANSYS для анализа напряженно-

деформированного состояния керамического контейнера при статическом нагружении. Представлено комплексное решение прикладной задачи моделирования ударных процессов деформирования контейнера, выполнен анализ напряженно-деформированного состояния при динамическом нагружении. Расчетами установлено, что эквивалентные напряжения при динамическом нагружении не превышают предельных значений, что свидетельствует о динамической прочности контейнера из керамических композитов в соответствии с нормативными требованиями.

Авторы выражают благодарность сотрудникам НТУ «ХПИ» Д.В. Лавинскому, В.Н. Соболю и Ю.М. Андрееву за помощь в обсуждении и оформлении полученных результатов.

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ КЕРАМІЧНОГО КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ ПРИ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

О.К. Морачковський, С.Ю. Саєнко

Надані результати розрахункового моделювання методом кінцевих елементів напружено-деформованого стану керамічного контейнера під дією статичних і динамічних навантажень, що виникають при відхиленнях від штатних експлуатаційних умов.

MODELLING OF THE CERAMIC CONTAINER BEHAVIOUR FOR STORAGE OF RADIOACTIVE WASTES AT STATIC AND DYNAMIC LOADS

O. Morachkovsky, S. Saenko

The design modelling by means of finite-element method of deflected mode of the ceramic container under static and dynamic loads arising at the deviations from regular operational conditions were resulted.

Список использованных источников

1. *Саєнко С.Ю.* Технологічні підходи для забезпечення безпеки при обробці радіоактивними відходами // *Енергетика, економіка, технології, екологія.* - 2007. – № 2 (21). – С. 27 - 35.
2. *Неклюдов И.М.* Динамічне моделювання по испытанию на прочность контейнеров-упаковок для высокоактивных отходов атомных станций / И.М. Неклюдов [и др.] // *Восточно-европейский журнал передовых технологий.* - 2007. – № 6/4 (30). – С. 4 – 7.
3. *Андреев Ю.М.* Система комп'ютерної алгебри для досліджень механіки машин / Ю.М. Андреев, А.О. Ларін, О.К. Морачковський // *Машинознание.* - 2005. – № 7 (95). – С. 3 - 8.
4. *Джонсон К.* Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 509 с.

Надійшла до редакції 27.07.10 р.