

**С.Ю.САЕНКО**, канд. техн. наук, нач. отдела, ННЦ «ХФТИ», Харьков;  
**О.К.МОРАЧКОВСКИЙ**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**Д.В.ЛАВИНСКИЙ**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»;  
**В.Н.СОБОЛЬ**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

## **АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОГО И УДАРНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

Проведено аналіз статичного і ударного деформування керамічного контейнера для транспортування й захоронення радіоактивних матеріалів, з метою оцінювання міцності й герметичності за умов нормативних вимог щодо проектів таких об'єктів. Одержані оцінки міцності та герметичності проекту контейнера, що на відміну від існуючих, виготовлено з кераміки типу  $ZrO_2$  [1]. Представлено комплексні результати аналізу, які отримано на базі методу скінчених елементів, програмних комплексів COSMOS/ANSYS та КІДИМ.

The static and impact deformation analysis of the ceramic container for transporting and burial of radioactive materials have been done. The strength and tightness estimations taking to account normative standards for designing of such objects are given. Such estimations have been given for container, which unlike to existing ones, made from ceramic type  $ZrO_2$  [1]. The comprehensive results of analysis, obtained on the basis of finite elements method by using COSMOS / ANSYS and KIDYM software, are presented.

**Актуальность и состояние проблемы.** В Украине при эксплуатации атомных электростанций накоплено значительное количество опасных радиоактивных отходов (РАО) – более 50 тыс. м<sup>3</sup>. Для реакторов ВВЭР-1000, которыми в основном оснащены украинские АЭС, количество РАО постоянно возрастает и составляет сотни кубометров в год. В настоящее время такие отходы в основной своей массе хранятся на промышленных площадках атомных станций в спецхранилищах с использованием бетонных упаковок емкостью от 40 до 200 литров. Наиболее вероятным событием, связанным с радиационной опасностью при хранении РАО является угроза отказа в штатном режиме использования бетонных упаковок хранения, за счет их механического разрушения под действием облучения и агрессивной среды. В Украине, как и во многих других странах в настоящее время актуальны вопросы 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. Этим обусловлена актуальность темы работы [1,2].

**Постановка задач и метод их решения.** Общий вид рассматриваемого

в работе керамического контейнера и размеры его элементов деталей представлены на рис. 1.

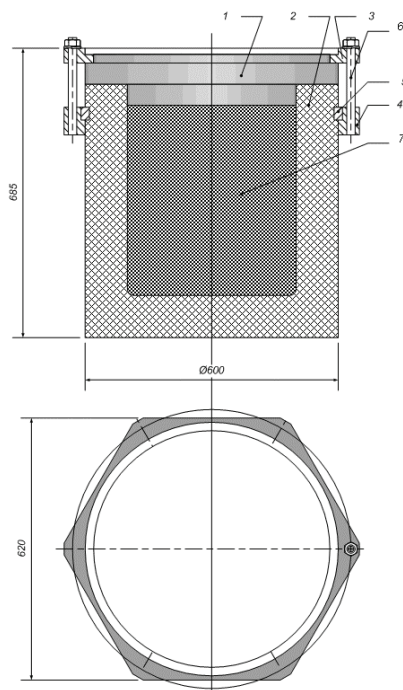


Рисунок 1 – Сборочный чертеж контейнера-упаковки

1 – крышка, 2 – корпус, 3 – фланец, 4 – фланец,  
5 – кольцо разрезное, 6 – шпилька, 7 – радиоактивный материал

Массы и физико-механические характеристики свойств материалов деталей контейнера приведены в табл. 1 и табл. 2 соответственно.

Таблица 1 – Масса деталей керамического контейнера

№ п/п	Наименование	m, кг
1	Крышка	149,544
2	Корпус	626,923
3	Фланец	17,0683
4	Фланец	19,13
5	Кольцо разрезное	6,45
6	Шпилька	0,337
7	Радиоактивный материал	141,37

Всего: 962,5

Таблица 2 – Физико-механические характеристики свойств материалов

Свойства материалов	Сталь 30X13	Керамика $ZrO_2$
Прочность при сжатии $(\sigma_B)_c$ , МПа		1400
Прочность при изгибе $(\sigma_B)_b$ , МПа		750
Модуль упругости $E$ , ГПа	210	200
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,3	0,28-0,36
Ударная прочность $a_u$ , ГПа		4,2 - 7
Массовая плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	7,8	5,8-6
Коэффициент трения		0,2-0,3

В расчетах приняты физико-механические характеристики спеченной керамики состава ( $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ ), плотность радиоактивных отходов – 2,5 г/см<sup>3</sup>.

В работе проведен анализ статического и ударного деформирования керамического контейнера для транспортировки и захоронения радиоактивных материалов с целью оценки прочности и герметичности по нормативным требованиям к новым проектам таких объектов. Получены оценки прочности и герметичности проекта контейнера, в отличие от существующих, изготовленного из керамики типа  $ZrO_2$  [1]. Результаты анализа получены на основе метода конечных элементов, на базе современных компьютерных программных комплексов программных комплексов COSMOS / ANSYS и КИДИМ. Геометрическая конечно-элементная схема контейнера представлена на рис. 2.

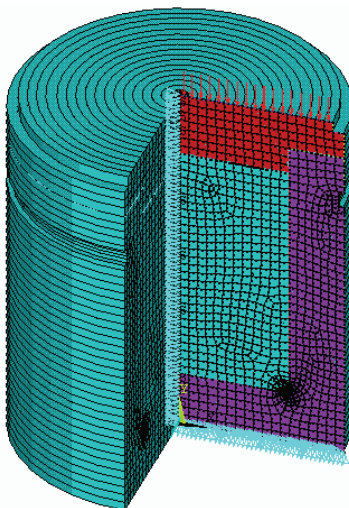


Рисунок 2 – КЭ схема керамического контейнера с отходами

### Оценки прочности и герметичности проектируемого контейнера.

Рассмотрим статическое упругое деформирование контейнера при штабелировании. На внешнюю поверхность крышки действует давление  $p_1$ , моделирующее нагрузку при штабелировании. Влияние содержимого контейнера на НДС конструкции учитывается заданием гидростатического давления на внутренней поверхности корпуса (максимальное значение  $p_0 = \rho gh$ , здесь  $\rho$  – массовая плотность содержимого контейнера,  $g$  – ускорение свободного падения,  $h$  – высота полости корпуса). Ниже приводятся результаты расчетов при различных значениях величины затяжки ( $u_{зат}$ ) с учетом внутреннего гидростатического давления и давления моделирующего пятикратную массу при штабелировании.

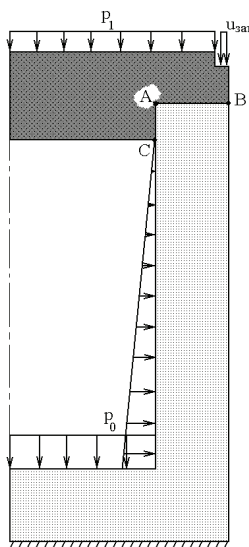


Рисунок 3 – Расчетная схема

Средствами ПК ANSYS выполнено геометрическое моделирование контейнера, согласно рис. 1, и принято конечно-элементное разбиение. Геометрия и условия соединения элементов конструкции, представленные на рис.1 позволяют рассматривать задачу в осесимметричной постановке. При этом в расчетной схеме (рис. 3) непосредственно рассматриваются только крышка (1) и корпус (2). 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.

В расчетах базовым был выбран осесимметричный 8-узловой конечный элемент PLANE82. Явления контактного взаимодействия моделировались

путем введения между крышкой и корпусом слоев контактных элементов CONTA172. и TARGE169. Задавая специальным образом свойства этих контактных элементов, были смоделированы особенности взаимодействия между крышкой и корпусом на горизонтальной поверхности (линия АВ – рис. 3) и на вертикальной поверхности (линия АС – 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 [3].

**Анализ динамических процессов деформирования.** Далее рассмотрим результаты решения задач ударного взаимодействия контейнера с жестким основанием при вертикальном его падении с высоты 0.5 м. Предварительными расчетами в программном комплексе КИДИМ [4] определены величины и распределения нормальных сил-реакций, векторов ускорений и скоростей элементов контейнера в интервале ударного взаимодействия. Для оценки прочности элементов конструкции и герметичности проектируемого контейнера, изготовленного из керамики (КК), эти данные используются для кинестатического расчета методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния в момент времени, когда ударный импульс принимает максимальное значение в интервале времени ударного взаимодействия – 0,3...0,35 сек. Численное значение максимального ускорения контейнера составило  $21700 \text{ м/с}^2$ . Геометрическая конечно-элементная модель и условия закрепления контейнера реализованы в ПК 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. Учтено действие нагрузок при величине затяжки шпилек для прижатия крышки фланцами равной 1 мм. Эти данные заданы в программном комплексе ANSYS. Данные о напряженно-деформированном состоянии контейнера получены в ПК ANSYS для оценки прочности и герметичности проектируемого КК. В максимально напряженных местах конструкции эквивалентные напряжения вычислены по теориям прочности Губера – Генки – Мизеса и по теории прочности Мора. Результаты расчета представлены на рис. 4 в виде распределения интенсивности напряжений. Следует отметить, что максимальное значение интенсивности напряжений ниже по сравнению с предыдущим случаем (без учета действия инерционных сил) и составляет 856 МПа. На рис. 5 приведены распределения контактных давлений.

NODAL SOLUTION

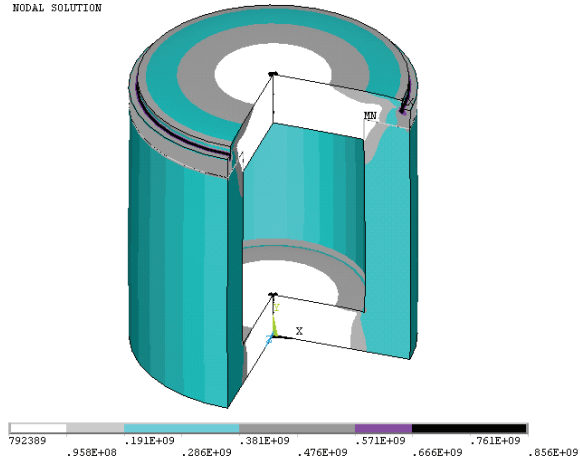


Рисунок 4 – Распределение интенсивности напряжений, Па (затяжка 1 мм)

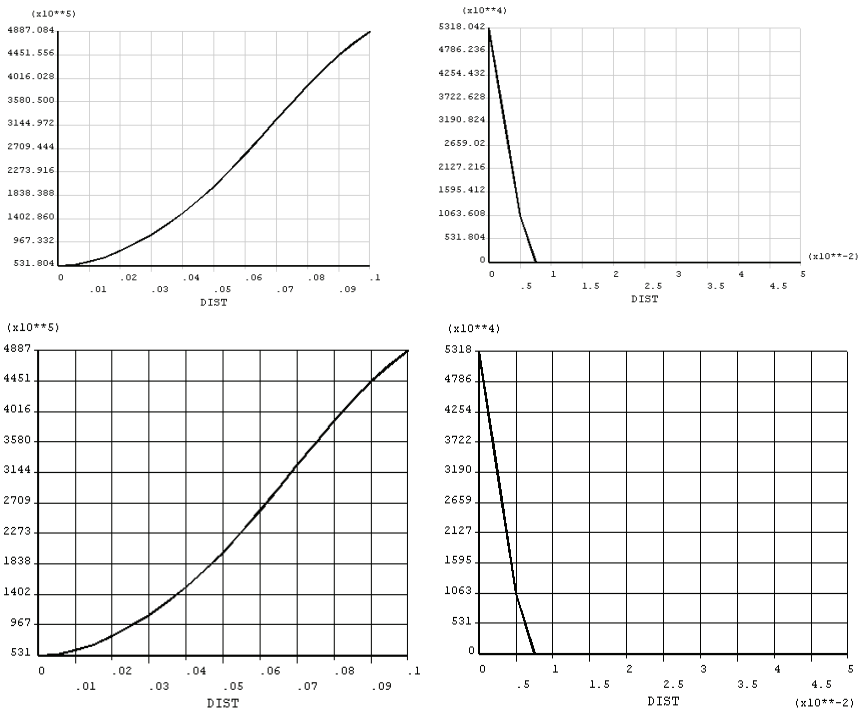


Рисунок 5 – Распределение контактного давления, Па:

слева – горизонтальная поверхность, справа – вертикальная поверхность контакта

**Выводы.** На базе метода конечных элементов, с использованием компьютерных комплексов COSMOS и ANSYS, представлено комплексное решение прикладной задачи моделирования статических и ударных процессов деформирования керамического контейнера, Установлено, что оценки прочности контейнера по теориям прочности Губера – Хенки – Мизеса и по теории прочности Мора не превышают предельных значений, соответствуют нормативными требованиям.

**Список литературы:** 1. Саенко С.Ю. Технологические подходы для обеспечения безопасности при обращении с радиоактивными отходами // Энергетика, экономика, технологии, экология. – 2007. – № 2 (21). – С. 27-35. 2. Неклюдов И.М., Морачковский О.К., Андреев Ю.М., Саенко С.Ю., Бирюков О.В. Динамическое моделирование по испытанию на прочность контейнеров-упаковок для высокоактивных отходов атомных станций // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – № 6/4 (30) – 2007. – С.4-7. 3. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 509 с. 4. Андреев Ю.М., Ларин А.О. Морачковский О.К. Система компьютерной алгебры для досліджень механіки машин // Машинознавство. – 2005. – № 7 (95). – С. 3-8.

*Поступила в редколлегию 09.07.2010*