

УДК 519.672

А.И. Боровков, В.В. Грунин, Ю.Л. Рутман

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПАДЕНИЯ КОНТЕЙНЕРА С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

Ежегодно в мире транспортируется около 10 млн упаковок с радиоактивными веществами различного вида [5]. Обеспечение безопасности транспортирования радиоактивных веществ и изделий на их основе имеет большое значение в связи с потенциальным риском нанесения ущерба людям, окружающей среде и имуществу при их перевозке, выполнении погрузочно-разгрузочных операций и промежуточном хранении. Мировое сообщество выработало ряд правил для хранения и перевозки радиоактивных веществ, такие, например, как правила МАГАТЭ [1].

Разработан так называемый сухой метод хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в специальных контейнерах [6]. Эти контейнеры могут использоваться для транспортировки ОЯТ в места их переработки или захоронения. Для этого было спроектировано множество разновидностей контейнеров (металлобетонные, чугунные, металлические). К контейнерам предъявляются серьезные требования по ударостойкости при возможных аварийных ситуациях. Одно из требований — сохранение прочности контейнеров при падении с 9 метров на абсолютно жесткую преграду. При таких падениях накапливается большая кинетическая энергия. Для ее поглощения разрабатывается специальная система амортизации (демпфирующие устройства), которая позволяет поглощать эту энергию и сокращать максимальные перегрузки, действующие на контейнер при падении. Демпфирующее устройство и контейнер вместе составляют транспортный упаковочный комплект (ТУК).

Данная статья посвящена исследованию системы упругопластической амортизации транспортного упаковочного контейнера ТУК-109, разработанной ОАО «КБСМ» и предназначеннной для защиты контейнера с отработавшим ядерным топливом при вертикальном падении с 9 м [3]. В предварительных исследованиях был проведен ряд расчетов, которые позволили подобрать оп-

тимальные параметры конструкции амортизации для ТУК-109. В процессе данных исследований был создан опытный образец ТУК и проведены испытания. В статье приведено описание конструкции транспортного упаковочного комплекта и строения его отдельных элементов. С помощью конечно-элементного пакета ANSYS/LS-DYNA выполнено исследование напряженно-деформированного состояния для пространственной модели транспортного упаковочного комплекта с учетом контактного взаимодействия [2]. Приведено сравнение с экспериментальными данными.

### Описание конструкции ТУК. Формирование и расчет динамической модели

Защитно-демпфирующий кожух (ЗДК) ТУК-109 состоит из трех соединенных между собой частей — корпуса, днища и крышки [3].

Защита боковой поверхности и торцевых поверхностей МБК осуществляется специальными пластическими амортизаторами, выполненным из труб. Материал труб — сталь.

Защита боковой поверхности ТУК осуществляется двумя поясами из 30 труб (292S8,5), установленных плотно (с минимально возможным по допускам зазором) на внутренней поверхности корпуса ЗДК.

Трубы в каждом поясе приварены через продольные прорези к оболочке корпуса и соединены между собой внутренними обечайками. Защита торцевых поверхностей ТУК осуществляется с помощью восьми радиально и восьми тангенциально установленных на днище и крышке ЗДК труб 299S12. Трубы соединены между собой на уровне середины сегментными пластинами. Днище и крышка ЗДК выполнены из двух пластин, соединенных между собой центральной втулкой, радиальными и тангенциальными ребрами, расположенными под трубами.

Днище и крышка через специальные фланцы соединяются с корпусом ЗДК, выполненным в виде цилиндрической оболочки с шпангоутно-

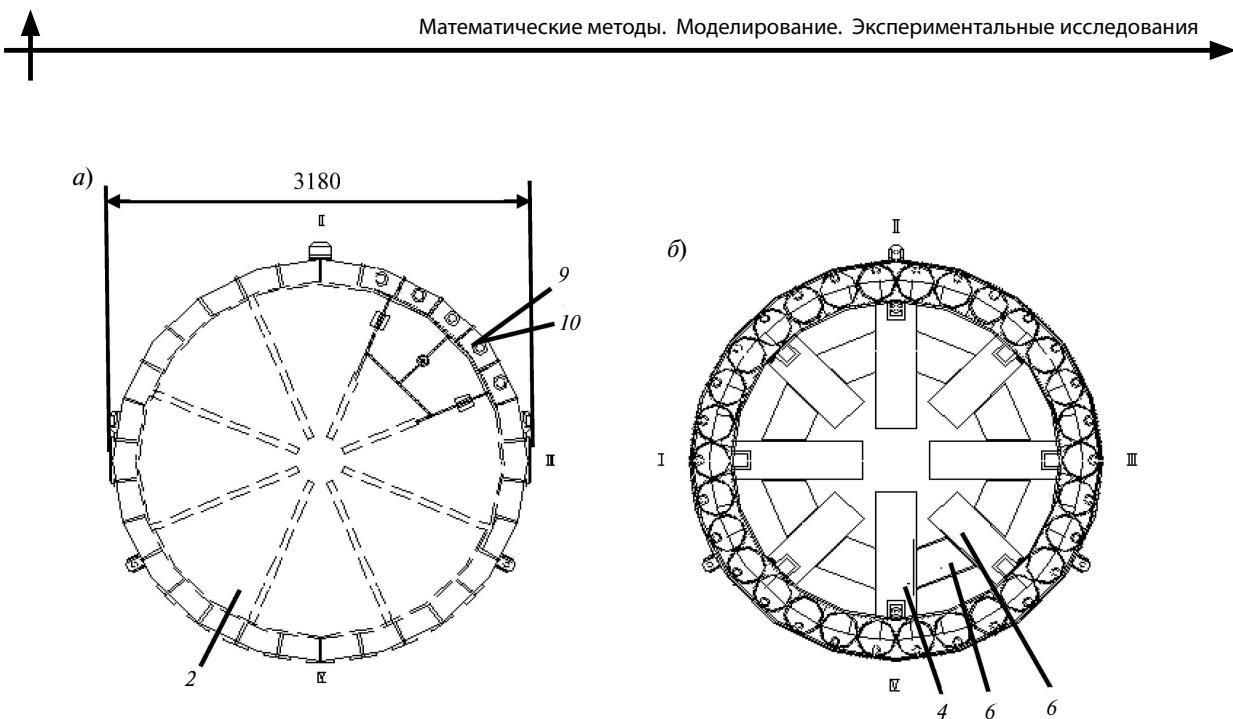


Рис. 1. Вид на крышку (а) и поперечный разрез ЗДК (б):  
2 — крышка; 4 — труба; 5 — труба; 6 — вставка; 9 — втулка; 10 — гайка

стрингерным набором. Металлоконструкции ЗДК выполнены из стали.

На рис. 1 изображены вид на крышку и поперечный разрез ЗДК.

Как видно из рисунка, в силу того, что модель ТУК имеет восемь радиально расположенных ребер, четыре радиально расположенных трубы одной длины и еще другие четыре радиально расположенных трубы, то в силу циклической симметрии мы можем рассмотреть одну

четвертую часть модели контейнера. При этом в модели учтены только те демпфирующие элементы ЗДК, которые находятся в зоне деформирования. Вертикальный пояс демпфирующих элементов, находящийся вне зоны деформирования и не влияющий на торможение контейнера, не рассматривается.

На рис. 2 представлена полная пространственная модель конструкции. Конечно-элементная модель ТУК (рис. 3) состоит из 8-узловых

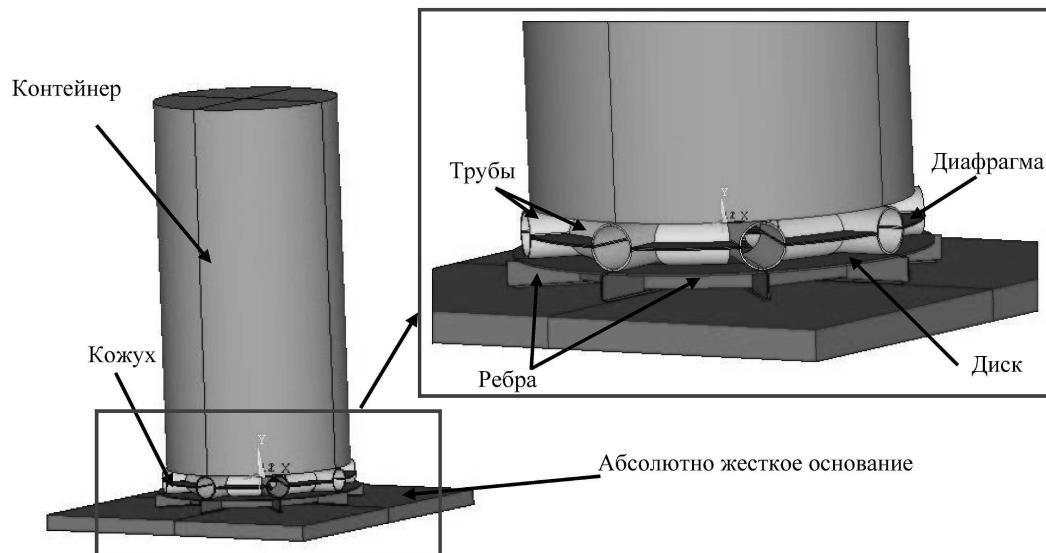


Рис. 2. Пространственная модель полной конструкции ТУК

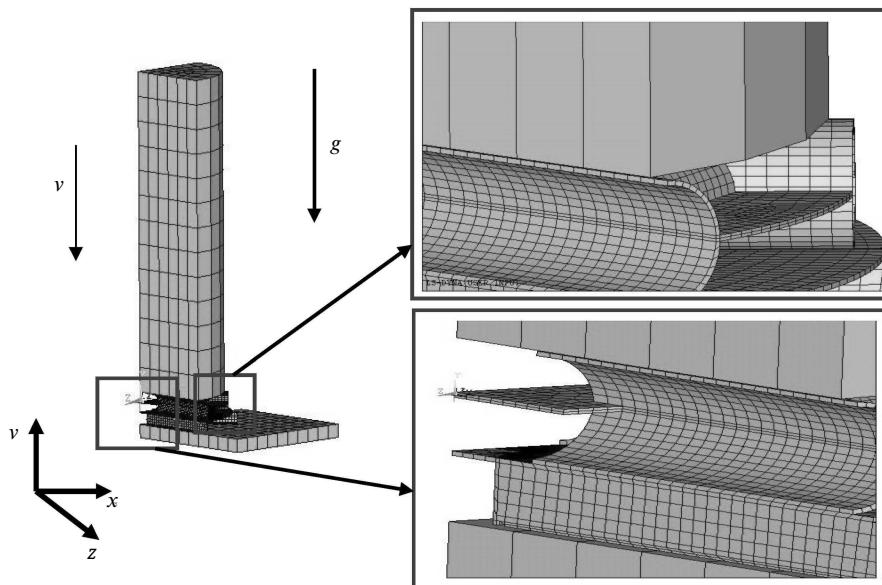


Рис. 3. Конечно-элементная модель пространственной модели ТУК

элементов «SOLID 164» [2]. Так как достаточно сложно предсказать точную зону контакта из-за постоянно меняющейся геометрии конструкции в процессе деформирования, то по всем плоскостям задан автоматический выбор контактных зон с коэффициентом трения  $\mu = 0,15$ . Конечно-элементная модель имеет NDF = 49656 (NDF — общее число степеней свободы), при этом сетка состоит из 16552 узлов и 8953 элементов.

В расчете рассматривалась соответствующая кинематическому упрочнению билинейная упругопластическая диаграмма деформирования для материала элементов амортизации ТУК-109, труб и ребер.

Материал, из которого изготовлены трубы, — сталь 10Г2 [3].

При этом характеристики материала труб приняты следующими: модуль Юнга  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ; плотность  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>; предел текучести  $\sigma_{02} = 370$  МПа; предел временного сопротивления  $\sigma_b = 516$  МПа.

Материал, из которого изготовлены ребра, — сталь 09Г2С-СА. При этом характеристики материала ребер приняты следующими [3]: модуль Юнга  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ , плотность  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>, предел текучести  $\sigma_{02} = 455$  МПа, предел временного сопротивления  $\sigma_b = 576$  МПа.

Контейнер моделировался упругим телом с соответствующими обобщенными физико-механическими и массовыми свойствами. Диски, диафрагмы, соединяющие ребра и трубы в кожухе, имеют материал ребер, т. е. сталь 09Г2С-СА, и такие же физико-механические характеристики.

Жесткое основание моделировалось как недеформируемое объемное твердое тело с помощью модели материала Rigid [2].

Как видно из рис. 3, трехмерная модель имеет две плоскости симметрии —  $xy$  и  $yz$ , нормальные перемещения и касательные напряжения равны нулю. На границе, полученной в результате разреза модели плоскостями симметрии, поставлены условия симметрии. К узлам элементов, моделирующих контейнер и кожух (рис. 3), приложены гравитация в виде ускорения свободного падения  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> и начальная скорость  $v_y = -13,288$  м/с<sup>2</sup>, равная скорости падения ТУК в момент удара о землю при вертикальном падении с 9 м. Длительность процесса составляет 30 мс.

На рис. 4 представлено поле вертикальных перемещений для трехмерной модели в момент, когда скорость контейнера равна нулю.

На рис. 5 представлено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу для трехмерной модели в момент, когда скорость контейнера равна нулю.

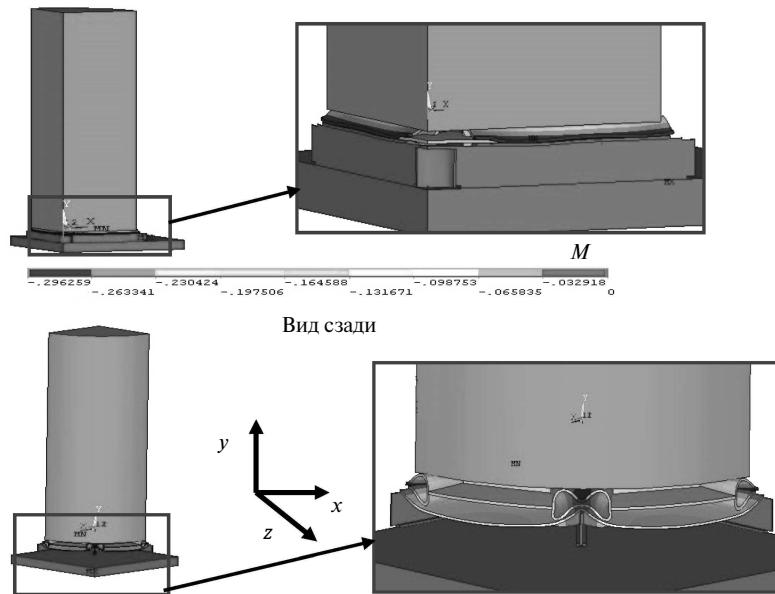
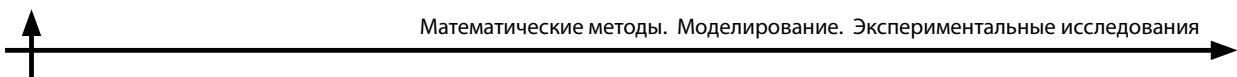


Рис. 4. Распределение вертикальных перемещений в момент равенства нулю скорости контейнера

Как видно из рис. 5, напряжения в элементах кожуха в процессе деформирования не превышают 544 МПа для материала ребер и соединительных элементов (диафрагма, диски) из стали 09Г2С-СА и 465 МПа для материала труб 10Г2. Поэтому можно сделать вывод, что не происходит разрушения элементов кожуха, т. к. не превышается предел прочности, но при этом возможны потрескивания в особенно напряженных местах. Поскольку кожух служит для обеспечения поглощения кинетической энергии при падении и уменьшения перегрузок, действую-

щих на контейнер, то непревышение предела прочности для элементов кожуха — достаточное условие соблюдения прочности для его элементов [4], так как требования к прочности элементов кожуха не предъявляются [3]. Ход контейнера по вертикали составляет примерно 0,21 м (см. рис. 4), при этом трубы сжимаются не полностью, не происходит жесткого удара и амортизация сохраняет свою работоспособность в процессе всего времени падения.

На рис. 6 представлен график зависимости ускорения контейнера от времени.

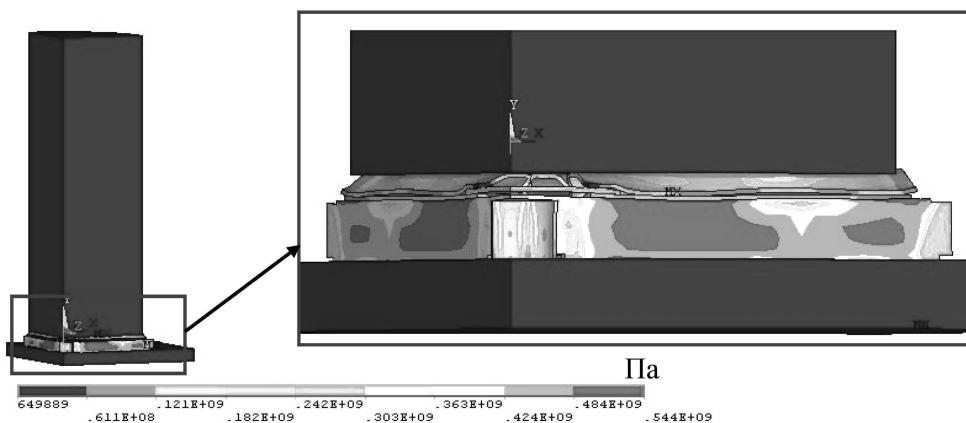


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в момент равенства нулю скорости контейнера

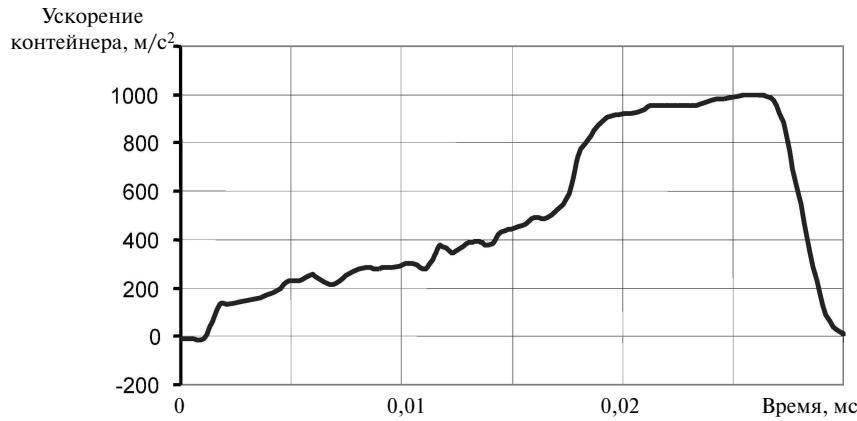


Рис. 6. График зависимости ускорения контейнера от времени

Как видно из графика, представленного на рис. 6, процесс до момента, когда скорость контейнера станет равной нулю, длится 27 мс. При этом максимальное ускорение, которое действует на контейнер и составляет  $998 \text{ м/с}^2$  (перегрузка 102g), достигается в тот момент, когда скорость контейнера равняется нулю. Допускаемое максимальное ускорение, действующее на контейнер, составляет 200g. Как показали эксперименты, проведенные для экспериментального образца ТУК, перегрузки для различных вариантов падения не превышают 100g [3].

В результате проведенных исследований была разработана методика проведения конечно-элементного исследования напряженно-деформированного состояния ТУК с учетом пространственного контактного взаимодействия и меняющейся в процессе деформирования геометрии. Оценка сравнительно с экспериментальными данными показала достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных — расхождение составляет не более 5 %. На основании проведенных расчетов можно утверждать, что безопасность контейнера обеспечена при падении с 9 м.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Нормы МАГАТЭ по безопасности. Правила безопасности перевозки радиоактивных материалов. Требования безопасности. № TS-R-1 [Текст] / Международное агентство по ядерной безопасности.— 2009.
- ANSYS 14.0 Manual.
- Комплект транспортный упаковочный для хранения и транспортирования ОЯТ АЭС с реакторами РБМК-1000. Технический проект. Расчет нагрузок [Текст] / ГП КБСМ.— СПб., 1999.— 210 с
- Колмогоров, В.П. Напряжения, деформации, разрушения [Текст] / В.П. Колмогоров.— М.: Металлургия, 1970. — 2 29 с.
- Ядерная опасность. Вопросы транспортировки ОЯТ [Текст].— М.: Эпицентр, 2003.
- Вудвард, Б. Технологии сухого хранения и транспортировки отработавшего ядерного топлива и высокоактивных отходов компаний [Текст] / Holtec International 555.— Линкольн Драйв Уэст Марлтон.— Нью-Джерси, США. 2011.— М.: Атомэко, 2011.