УДК 539.3

Численный анализ ударопрочности и термостойкости авиационного контейнера РАТ-2

А. А. Рябов, В. И. Романов, С. С. Куканов, В. Ф. Спиридонов, К. В. Циберев Представлены результаты численных исследований напряженно-деформированного и теплового состояний контейнера РАТ-2 при комплексном аварийном термосиловом нагружении: удары о жесткую преграду со скоростью более 130 м/с под различными углами и авиационный пожар часовой длительности при температуре 1010 °С. Анализ термостойкости конструкции в пожаре выполнен с учетом изменения формы и теплофизических свойств материалов контейнера после соударений с преградой. Численные исследования выполнены на основе детальных компьютерных моделей и высокопараллельного пакета программ ЛОГОС. Достоверность компьютерного моделирования подтверждается близостью расчетных и экспериментальных данных.

Введение

Проблема создания надежных авиационных контейнеров для воздушной транспортировки радиоактивных материалов рассматривается в связи с повышенными требованиями безопасности окружающей среды и привлекает внимание исследователей [1–9]. Ее сложность обусловлена высоким уровнем воздействия, характерным для авиационной аварии. Так, в соответствии с нормами МАГАТЭ [10] авиаконтейнер должен выдерживать удар о жесткую преграду под любым углом со скоростью не менее 90 м/с и последующий авиационный пожар длительностью до 1 ч с температурой горения углеводородного топлива 1010 °C.

Современные технологии компьютерного моделирования являются эффективным инструментом анализа прочности и термостойкости контейнеров в экстремальных условиях, при этом весьма важен вопрос о достоверности численных результатов, который можно решить путем сравнения численных и экспериментальных данных. В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ разрабатывается высокопараллельный комплекс программ ЛОГОС, ориентированный в том числе на решение нелинейных задач механики деформируемого твердого тела и теплопроводности [11]. В данной работе представлены результаты компьютерного моделирования динамического деформирования при ударах о преграду и тепловых режимов исходной и деформированной после ударов конструкции контейнера РАТ-2, демонстрирующие достоверность численных расчетов и особенности поведения конструкции.

Контейнер РАТ-2 для транспортировки, в том числе воздушным транспортом, малых количеств урана или плутония разработан и экспериментально исследонациональных Сандийских лабораториях в ван (США) [12]. Это многослойная конструкция (рис. 1): внутри тонкостенного стального корпуса *l* размещаются защитные вкладыши из красного дерева 2. В этих вкладышах располагается титановый бюкс 3, в котором установлены кленовые вкладыши 4 и гермосфера 5 из высокопрочной стали. В гермосфере находится капсула из нержавеющей стали с ампулой для радиоактивного материала.

Контейнер РАТ-2 испытан на прочность при различных ориентациях ударов о жесткую преграду со скоростью 132–139 м/с. Деформированные контейнеры были последовательно испытаны на раздавливание, пробитие, рассечение, затопление и термостойкость при пожаре. Перед испытаниями на стойкость при пожаре,



Рис. 1. Авиационный контейнер РАТ-2

деформированные конфигурации конструкций фиксировались рентгеновскими снимками. По завершении всех испытаний проводилась проверка целостности содержимого.

1. Определяющие соотношения и методики решения задач

Для моделирования и анализа динамического деформирования при ударах и тепловых режимов деформированной конструкции контейнера в пожаре используется закон сохранения энергии. Для механической системы он дополняется соотношениями неразрывности деформируемых элементов и уравнениями состояния, учитывающими зависимость механических свойств материалов от скорости деформации. Тепловой анализ проводится с учетом зависимости теплофизических свойств материалов от температуры.

1.1. Ударопрочность

Динамическое деформирование контейнера описывается в переменных Лагранжа на основе вариационного принципа Журдена:

$$\int_{V} \rho \ \ddot{u}_{i} \delta u_{i} dv + \int_{V} \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dv - \int_{V} F_{i} \delta u_{i} dv - \int_{\Gamma_{1}} P_{i} \delta u_{i} ds = 0,$$
(1)

где ρ – плотность материала, u_i (i = 1...3) – компоненты вектора перемещений, σ_{ij} , ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и деформаций. Наряду с общей неподвижной системой координат $X = [X_1 X_2 X_3]$ вводится локальный ортогональный базис $x = [x_1 x_2 x_3]$, отслеживающий движение элементарного объема dv как жесткого целого. Кинематические соотношения формулируются в текущей метрике

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$
(2)

Для металлических материалов используются уравнения состояния теории течения с линейным кинематическим упрочнением. Для описания динамического деформирования древесных материалов используется ортотропная модель материала, учитывающая ячеистую структуру древесины [13]. Для определения степени сжатия пористого вещества вводится следующий параметр:

$$\beta = \max\left[\min\left(\frac{1-V_{\min}}{1-V_f}, 1\right), 0\right],$$

где V_{\min} – минимальное значение относительного объема, достигнутое за время счета; V_f – относительный объем, при котором пористое вещество полностью сжимается. Модуль Юнга и модуль сдвига рассчитываются для каждого направления и изменяются от исходного значения до значения, соответствующего полному сжатию:

$$\begin{split} E_{aa} &= E_{aau} + \beta \left(E - E_{aau} \right), & G_{ab} &= G_{abu} + \beta \left(G - G_{abu} \right), \\ E_{bb} &= E_{bbu} + \beta \left(E - E_{bbu} \right), & G_{bc} &= G_{bcu} + \beta \left(G - G_{bcu} \right), \\ E_{cc} &= E_{ccu} + \beta \left(E - E_{ccu} \right), & G_{ca} &= G_{cau} + \beta \left(G - G_{cau} \right), \end{split}$$

где *E*, *G* – модуль Юнга и модуль сдвига для сжатого вещества, E_{aau} , E_{bbu} , E_{ccu} , G_{ab} , G_{bc} , G_{ca} – модули Юнга и модули сдвига для каждого из направлений ортотропии пористого вещества в исходном состоянии. Компоненты тензора напряжений находятся следующим образом:

$$\sigma_{aa}^{n+1}^{*} = \sigma_{aa}^{n} + E_{aa}\Delta\varepsilon_{aa}, \qquad \sigma_{ab}^{n+1}^{*} = \sigma_{ab}^{n} + 2G_{ab}\Delta\varepsilon_{ab},$$

$$\sigma_{bb}^{n+1}^{*} = \sigma_{bb}^{n} + E_{bb}\Delta\varepsilon_{bb}, \qquad \sigma_{bc}^{n+1}^{*} = \sigma_{bc}^{n} + 2G_{bc}\Delta\varepsilon_{bc},$$

$$\sigma_{cc}^{n+1}^{*} = \sigma_{cc}^{n} + E_{cc}\Delta\varepsilon_{cc}, \qquad \sigma_{ca}^{n+1}^{*} = \sigma_{ca}^{n} + 2G_{ca}\Delta\varepsilon_{ca}.$$

Далее для каждой компоненты тензора напряжений проверяется условие

$$\left|\sigma_{ij}^{n+1^{*}}\right| > \sigma_{ij}\left(1-V\right),$$

где значение $\sigma_{ij}(1-V)$ определяется из текущего значения относительного объема V и диаграмм деформирования пористого вещества для каждого из направлений ортотропии. Если условие верно, то компоненты тензора напряжений пересчитываются следующим образом:

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij} \left(1 - V \right) \frac{{\sigma_{ij}^{n+1}}^{*}}{\left| \sigma_{ij}^{n+1} \right|^{*}}.$$

Если вещество сжимается полностью (β = 1), то его деформирование описывается моделью идеального упругопластического материала. Сравнение расчетов с экспериментом показывает, что деформационные свойства древесины приемлемо описываются двумя трехзвенными линейными диаграммами σ~ε, полученными в направлении вдоль и поперек волокон [2].

В качестве начальных условий в задаче используется однородное поле скорости соударения. В качестве граничного условия выступает контактное взаимодействие контейнера с плоской недеформируемой поверхностью.

1.2. Термостойкость

Анализ термостойкости контейнера проводится на основе решения задачи теплопроводности многослойной конструкции, состоящей из разнородных материалов. Для численных расчетов нестационарных температурных полей при нагреве и остывании в пожаре используется классическое уравнение теплопроводности

$$\rho \cdot C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \lambda \nabla T = Q , \qquad (3)$$

где $Q = Q(\overline{X}, t)$ – удельное объемное тепловыделение; плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность являются нелинейными функциями температуры: $\rho = \rho(T)$, C = C(T), $\lambda = \lambda(T)$. Для решения нелинейного уравнения (3) используются граничные условия 3-го рода (условия Коши) на поверхности *S*:

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{S} + (\alpha_{c} + \alpha_{r})(T - T_{m}) = 0, \quad \overline{X} \in S.$$
(4)

Коэффициенты конвективного α_c и лучистого α_r теплообменов на границе *S* связаны с окружающей температурой T_m :

$$\alpha_c = \alpha_c \left(\overline{X}, T, t\right), \ \alpha_r = \varepsilon \sigma \left(T^2 - T_m^2\right) \left(T + T_m\right), \ \varepsilon = \varepsilon \left(\overline{X}, T, t\right), \ \overline{X} \in S,$$
(5)

где ε – степень черноты поверхности, σ – постоянная Стефана.

Для дискретизации определяющих соотношений по пространственным переменным применяется метод конечных элементов. Численное решение по времени уравнения (1) строится на основе явной, а уравнения (3) – неявной схем интегрирования по времени. Вычислительные алгоритмы реализованы в программном комплексе ЛОГОС [11], разрабатываемом РФЯЦ-ВНИИЭФ для численного решения связных задач газодинамики, теплопроводности, статического и динамического упругопластического деформирования и разрушения конструкций на многопроцессорных вычислительных ресурсах. Пакет программ ЛОГОС ориентирован на решение задач механики сплошных сред в лагранжевой, лагранжево-эйлеровой и эйлеровой постановках на неструктурированных сетках с возможностью использования механизмов подсеточного разрешения (для лагранжевой постановки). Его основными особенностями являются:

- использование аппроксимаций метода конечных элементов (МКЭ);

– возможность выделения контактных границ методом концентраций;

 – моделирование процессов контактного взаимодействия элементов с возможностью проскальзывания, отскока и трения. В пакете программ «ЛОГОС» реализована библиотека конечных элементов, включающая 2D и 3D элементы сплошной среды, оболочечные и балочные элементы с полным и одноточечным интегрированием. В качестве начальных и граничных условий могут задаваться давление, сосредоточенные и распределенные узловые нагрузки, закрепления по вращательным и/или поступательным степеням свободы, скользящая граница, навязанная скорость, температура/поток/конвекция.

Функциональные возможности пакета программ ЛОГОС позволяют его эффективное использование для решения задач динамической прочности и термостойкости авиационных контейнеров в условиях авиационной аварии. Пример использования пакета программ ЛОГОС для расчета высокоскоростного соударения контейнера с преградой представлен в работе [9]. Одной из особенностей пакета программ ЛОГОС является высокий уровень распараллеливания на смешанной модели (OpenMP + MPI), позволяющий проводить трехмерное комплексное моделирование на супер-ЭВМ с использованием сотен процессорных ядер.

2. Компьютерные модели и численные результаты

2.1. Расчеты ударопрочности

Для моделирования динамического деформирования контейнера при соударении с преградой разработана трехмерная компьютерная модель размерностью ~8 000 000 конечных элементов (КЭ), включающая все основные элементы конструкции: корпуса, слои теплоизоляции, болты, заклепки и т. д. Общий вид модели (без конечно-элементной сетки) и фрагмент КЭ-сетки показаны на рис. 2. Характерный масштаб дискретизации 1,5×1,5×1,0 мм. Динамические расчеты проводили в параллельном режиме с использованием 240 процессорных ядер. Время одного расчета – 1 час. Эффективность распараллеливания – 70 %.



Рис. 2. Общий вид компьютерной модели и фрагмента сетки

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ УДАРОПРОЧНОСТИ И ТЕРМОСТОЙКОСТИ...

Нагружение конструкции осуществляли приложением равномерного поля начальной скорости амплитудой 132–139 м/с. Вектор скорости направлен по нормали к преграде. Сравнение расчетных и экспериментальных деформированных конфигураций конструкции после осевого и углового ударов о днище, а также бокового удара приведены на рис. 3. Как видно из рисунка, в целом результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.



Эксперимент



Расчет

Рис. 3. Деформация контейнера после ударов

На рис. 4 сравниваются расчетные деформированные формы с рентгеновскими снимками деформированных конфигураций контейнера после осевого и углового ударов о днище, а также углового удара о крышку. Отметим, что рентгеновские снимки сделаны после тестов на удар, раздавливание, пробитие и рассечение, а расчетные сечения показывают деформированную конфигурацию конструкции только после удара. По этой причине, а также потому, что в расчетах не учитывается разрушение элементов конструкции, между изображениями есть определенные различия, однако в целом результаты расчетов и экспериментов весьма близки.

ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ



Рис. 4. Внутренняя деформация контейнера

Количественное сравнение расчетных и экспериментальных результатов представлено в таблице, где приведена остаточная толщина древесных слоев и высота деформированного контейнера в направлении удара. Из таблицы видно, что расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются. Максимальное отличие расчетных данных от экспериментальных по остаточной толщине кленового слоя не превышает 10 %, по толщине слоя красного дерева – 8,3 %, а по высоте деформированного контейнера в направлении удара – 7,5 %.

Ориентация удара	Толщина кленового		Толщина слоя красного		Высота контейнера	
	слоя, мм		дерева, мм		в направлении удара, мм	
	Экспери-	Расчет	Экспери-	Расчет	Экспери-	Расчет
	мент		мент		мент	
Осевой о днище	29	29	30	28	292	292
Угловой о днище	38	38	17	16	292	314
Боковой	34	36	12	12	286	295
Угловой о крышку	37	34	12	11	318	315
Осевой о крышку	30	33	20	21	292	295

Остаточные размеры элементов контейнера

2.2. Расчеты термостойкости

Для расчетов термостойкости на основе пакета программ ЛОГОС построены две компьютерные тепловые модели: первая соответствует контейнеру в исходном состоянии, а вторая – деформированной форме контейнера, полученной в прочностном расчете (рис. 5). Рассматривается деформированный контейнер РАТ-2 после осевого удара о донную часть со скоростью 133,6 м/с. Размерность каждой модели составляет ~1 000 000 КЭ, характерный масштаб дискретизации по пространству $3,0\times3,0\times1,5$ мм. Как видно из рис. 5, тепловые модели точно отражают форму исходной и деформированной конструкций. Они отличаются от деформационной модели только отсутствием крепежа, который не оказывает заметного влияния на температурное поле.



Рис. 5. Тепловые компьютерные модели контейнера

На основе модели контейнера в исходном состоянии проведены расчеты его термостойкости в 30-минутном пожаре при температуре 800 °C. Результаты расчетов приведены на рис. 6 и 7 (см. также цв. вкл.), где показано распределение максимальных температур в сечении контейнера и расчетная область терморазложения слоя красного дерева. За границу зоны терморазложения принята температура начала обугливания $T_{\rm rp}$ = 288 °C [12]. Результаты расчетов показывают, что глубина зоны термического разложения достигает 41 мм, что хорошо согласуется с данными испытаний [12], в которых зафиксирована глубина до 38 мм.



Рис. 6. Максимальная температура и зона терморазложения в наземном пожаре



Рис. 7. Максимальная температура и зона терморазложения исходного контейнера в авиационном пожаре



Рис. 8. Максимальная температура и зона терморазложения деформированного контейнера в авиационном пожаре

Для контейнера, деформированного после осевого удара о донную часть, также проводили расчеты термостойкости в авиационном пожаре (T = 1010 °C, t = 1 ч). Распределение температур на момент достижения максимальных значений на корпусе контейнера и зоны терморазложения показаны на рис. 8 (см. также цв. вкл.). Анализ расчетной зоны обугливания исходного контейнера показывает, что она полностью охватывает слой наружной теплоизоляции из красного дерева. Термическое разложение внутренних вкладышей из древесины клена наблюдается только на их внешней поверхности и распространяется на глубину ~9 мм. В деформированном контейнере зона терморазложения охватывает оба слоя теплозащиты практически полностью. Таким образом, деформирование контейнера в результате высокоскоростного удара о преграду значительно снижает его термостойкость. В деформированном контейнере изотерма $T_{\rm rp} = 288$ °C лежит на поверхности гермосферы, тогда как в исходной конструкции она отстоит на 35–50 мм. По результатам испытаний деформированных контейнеров в авиационном пожаре отмечено [12] полное обугливание слоев красного дерева и клена, что качественно подтверждает правильность полученных численных ре-

зультатов. В испытаниях ни в одном из деформированных контейнеров не обнаружено плавление алюминиевых обтекателей на гермосферах. Максимальная температура на гермосфере не превышала температуру плавления (582 °C) и находилась в интервале $288 < T_{max} < 582$ °C. По результатам моделирования максимальная температура на гермосфере исходного контейнера составляет ~258 °C, а деформированного ~ 296 °C, что согласуется с экспериментальными данными и свидетельствует о снижении термостойкости деформированной конструкции примерно на 15 %.

Заключение

Проведена верификация отечественного высокопараллельного пакета программ ЛОГОС, подтверждающая достоверность компьютерного моделирования динамического деформирования и тепловых режимов авиационного контейнера РАТ-2 на основе близости численных и экспериментальных данных в пределах 8–10 %.

Численные исследования показывают, что в результате интенсивного динамического деформирования контейнера при ударе о жесткую преграду на скорости ~130–140 м/с и значительного изменения формы конструкции и теплофизических свойств материалов в зоне удара снижается термостойкость конструкции в пожаре.

Список литературы

1. Adalian C., Morlier P. Modeling the behaviour of wood during the crash of a cask impact limiter // Proc. of the PATRAM'98. (The 12^{th} Int. Conf. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials). Vol. 1. – Paris, 1998.

2. Bolshakov A. P., Gerdjukov N. N., Zotov E. V. et al. Damping properties of sequoia and birch under shock loading // Ibid.

3. Рябов А. А. Численный анализ тепловой энергоемкости защитного контейнера // Вестник ННГУ. Сер. Механика. 2000: Вып. 2. С. 171–178.

4. Рябов А. А. Компьютерный анализ термостойкости авиаконтейнера // Сб. докл. II Науч. конф. по механике и прочности конструкций. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. С. 172–178.

5. Ryabov A., Romanov V., Sotskov G. Numerical simulations of dynamic deformation of air transport fresh fuel package in accidental impacts // WM'03 Conf. February 23–27, 2003. Tucson, AZ, USA.

6. Ryabov A., Romanov V., Roschikhmarov D. Optimization of protective container subjected to thermal and impact loads // WM'04 Conf. February 29 – March 4, 2004. Tucson, AZ, USA.

7. Romanov V., Ryabov A., Barkanov B., Skurikhin S. Numerical simulation of dynamic deformation of spent fuel transport packages for nuclear power plants in accidental mechanical impacts // Proc. of the PATRAM'04. – Berlin, 2004.

8. Ryabov A. A., Romanov V. I. Kukanov S. S. Skurikhin S. G. Numerical simulations of dynamic deformation of air transport package PAT-2 in accidental impacts // 9th Int. LS-DYNA Users Conf. June 4–6, 2006. Dearborn, Michigan, USA. P. 9-43–9-51.

9. Ryabov A. A., Romanov V. I., Kukanov S. S. et al. Numerical simulation of dynamic deformation of air transport package in high-speed accidental impact // Proc. of the PATRAM'2010. – London, 2010.

10. Regulations for the safe transport of radioactive material. Safety Standard Series # TS-R-1. – Vienna: IAEA, 2009.

11. Дьянов Д. Ю., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения динамических задач прочности // Труды XIII Международ. семинара «Супервычисления и математическое моделирование». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. С. 208–219.

12. Anderson J. A., Davis E. J., Duffey T. A. et al. PAT-2 (Plutonium Air Transportable Model 2). Safety Analysis Report. Sandia Laboratories, 1981. SAND81-0001 Unlimited Release.

13. Hallquist J. O. LS-DYNA® theory manual. Livermore Software Technology Corporation, 2006 [Electronic resource]. – http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/trent001/manuals/ls-dyna_theory_manual_2006.pdf.

Numerical Analysis of Impact and Thermal Resistances of Air Transport Package PAT-2

A. A. Ryabov, V. I. Romanov, S. S. Kukanov, V. F. Spiridonov, K. V. Tsiberev

The paper presents the results of numerical investigations of the PAT-2 package under combined mechanical and thermal loadings: impact to the hard surface at different angles with the velocity of >130 m/s and following 1-hour 1010 °C fire. Deformed shape of the package and the materials thermal properties changed after the impact are used for the thermal analysis. The numerical investigations are carried out using detailed computer models and HPC finite element code LOGOS. High accuracy of the numerical simulation results is validated by good agreement of numerical and experimental data.