

УДК 539.3

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ УДАРОПРОЧНОСТИ И ТЕРМОСТОЙКОСТИ АВИАЦИОННОГО КОНТЕЙНЕРА РАТ-2

© 2016 г. **Рябов А.А., Романов В.И., Куканов С.С.,
Спиридонов В.Ф., Циберев К.В.**

*Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, Саров, Российская Федерация*

AAryabov@vniief.ru

Поступила в редакцию 07.12.2015

Контейнер РАТ-2 для транспортировки, в том числе воздушным транспортом, малых количеств урана или плутония разработан и экспериментально исследован в Сандийских национальных лабораториях США. Полученная при проведении испытаний контейнера информация может быть использована для верификации и валидации компьютерных программ численного моделирования динамического деформирования и анализа термостойкости конструкции.

В статье 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 длительностью 1 час с температурой 1010 °С. Анализ термостойкости конструкции в пожаре выполнен с учетом изменения формы и теплофизических свойств материалов контейнера после соударений с преградой. Численные исследования проведены на основе детальных компьютерных моделей с помощью высокопараллельного пакета программ ЛОГОС, разрабатываемого в Российском федеральном ядерном центре – Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики. Достоверность компьютерного моделирования подтверждается близостью результатов расчетов и экспериментальных данных.

Ключевые слова: авиационный контейнер, комплексное термосиловое нагружение, высокоскоростной удар, авиационный пожар, метод конечных элементов, численное моделирование, анализ динамических напряжений, анализ термостойкости.

Введение

Проблема создания надежных авиационных контейнеров для воздушной транспортировки радиоактивных материалов является весьма актуальной в связи с повышенными требованиями безопасности окружающей среды и привлекает внимание исследователей [1–9]. Ее сложность обусловлена высокими уровнями воздействий, характерными 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 длительно-стью до 1 часа с температурой горения углеводородного топлива 1010 °С.

Современные технологии компьютерного моделирования являются эффективными инструментами анализа прочности и термостойкости контейнеров в экстремальных условиях, при этом весьма важным является 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 деформируемого твердого тела и теплопроводности [11].

В настоящей статье представлены результаты компьютерного моделирования динамического деформирования при ударах о преграду и тепловых режимах исходной и деформированной после ударов конструкции РАТ-2, демонстрирующие достоверность численных расчетов и особенности поведения конструкции.

Контейнер РАТ-2 [12] является многослойной конструкцией (рис. 1), состоящей из наружного тонкостенного стального корпуса 1, внутри которого 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 располагается капсула из нержавеющей стали с ампулой для радиоактивного материала.

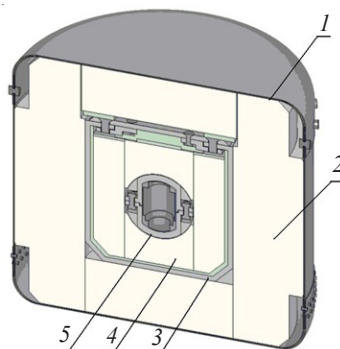


Рис. 1. Авиационный контейнер РАТ-2

Контейнер РАТ-2 испытан на прочность при различных ориентациях ударов о жесткую преграду со скоростью 132–139 м/с. Деформированные после ударов контейнеры были последовательно испытаны на раздавливание, пробитие, рассечение, термостойкость при пожаре и затопление. Перед испытаниями на стойкость в пожаре деформированные конфигурации конструкций фиксировались рентгеновскими снимками. После завершения всех испытаний проводилась проверка целостности содержимого.

1. Определяющие соотношения и методики решения задач

Для моделирования и анализа динамического деформирования при ударах и тепловых режимах 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 деформа-

ции. 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:

$$\int_V \rho \ddot{u}_i \delta \dot{u}_i dv + \int_V \sigma_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dv - \int_V F_i \delta \dot{u}_i dv - \int_{\Gamma_1} P_i \delta \dot{u}_i ds = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала; u_i ($i = 1, 2, 3$) – компоненты вектора перемещений; σ_{ij} , ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и деформаций; F_i , P_i – массовые и поверхностные силы. 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:

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

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, 14]. 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:

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

где E , G – модуль Юнга и модуль сдвига для сжатого вещества; E_{aau} , E_{bbu} , E_{ccu} , G_{abu} , G_{bcu} , G_{cau} – модули Юнга и модули сдвига для каждого из направлений ортотропии пористого вещества в исходном состоянии.

Компоненты тензора напряжений находятся следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{aa}^{n+1*} &= \sigma_{aa}^n + E_{aa} \Delta \varepsilon_{aa}, & \sigma_{ab}^{n+1*} &= \sigma_{ab}^n + 2G_{ab} \Delta \varepsilon_{ab}, \\ \sigma_{bb}^{n+1*} &= \sigma_{bb}^n + E_{bb} \Delta \varepsilon_{bb}, & \sigma_{bc}^{n+1*} &= \sigma_{bc}^n + 2G_{bc} \Delta \varepsilon_{bc}, \\ \sigma_{cc}^{n+1*} &= \sigma_{cc}^n + E_{cc} \Delta \varepsilon_{cc}, & \sigma_{ca}^{n+1*} &= \sigma_{ca}^n + 2G_{ca} \Delta \varepsilon_{ca}. \end{aligned}$$

Далее для каждой компоненты тензора напряжений проверяется условие

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

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

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

Если вещество полностью сжимается ($\beta = 1$), то его деформирование описывается моделью идеального упругопластического материала.

Эксперименты показывают, что деформационные свойства древесины приемлемо описываются двумя трехзвенными линейными диаграммами $\sigma \sim \varepsilon$, полученными в направлениях 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 при пожаре используется классическое уравнение теплопроводности:

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

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

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_S + (\alpha_c + \alpha_r)(T - T_m) = 0, \quad \bar{X} \in S. \quad (4)$$

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

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

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

Для дискретизации определяющих соотношений по пространственным переменным применяется метод конечных элементов (МКЭ). 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 для численного решения связанных 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, лагранже-эйлеровой и эйлеровой постановках на неструктурированных сетках с возможностью использования механизмов подсеточного разрешения (для лагранжевой постановки). Его основными особенностями являются:

- использование аппроксимаций МКЭ;
- возможность выделения контактных границ методом концентраций;
- моделирование процессов контактного взаимодействия элементов с возможностью проскальзывания, отскока и трения.

В пакете прикладных программ ЛОГОС (ППП 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 эффективно использовать его для решения задач динамической прочности и термостойкости авиационных контейнеров в условиях авиационной аварии. Пример использования 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), позволяющей проводить трехмерное комплексное моделирование на суперЭВМ 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 $\sim 8\,000\,000$ конечных элементов (КЭ), включающая все основные элементы конструкции: корпуса, слой теплоизоляции, болты, заклепки и т. д. Общий вид модели (без КЭ-сетки) и фрагмент КЭ-сетки показаны на рис. 2. Характерный масштаб дискретизации составляет $1,5 \times 1,5 \times 1,0$ мм. Динамические расчеты проводятся в параллельном режиме с использованием 240 процессорных ядер. Время одного расчета составляет 1 час. Эффективность распараллеливания – 70%.

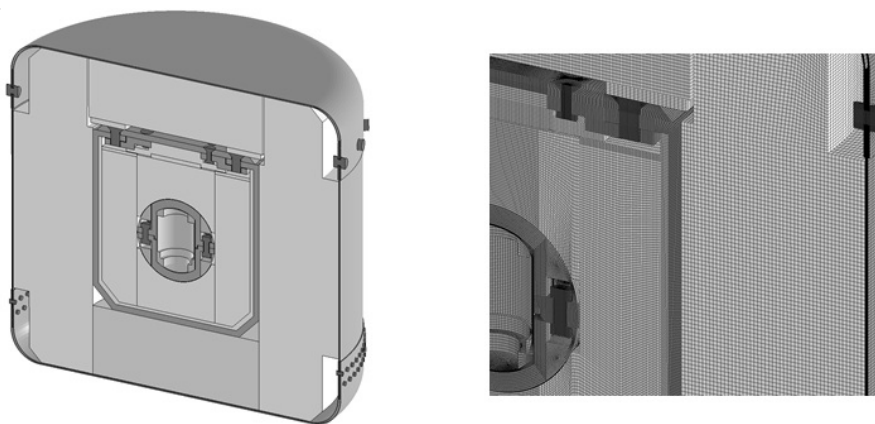


Рис. 2. Общий вид компьютерной модели и фрагмента

Нагружение конструкции осуществляется приложением равномерного поля начальной скорости амплитудой $V = 132\text{--}139$ 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 приведенных рисунков, в целом результаты расчетов качественно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

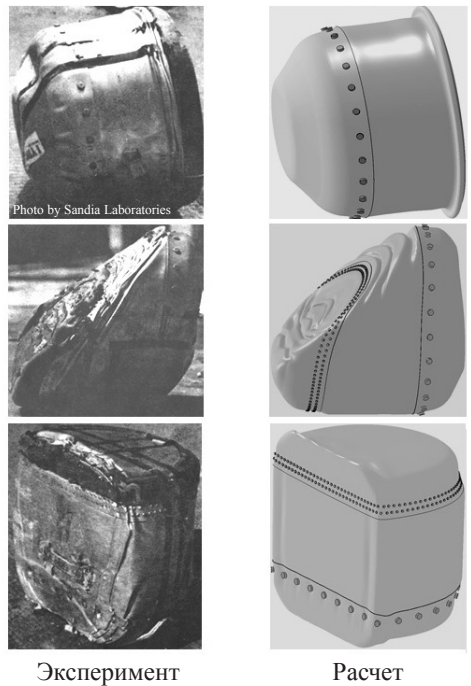


Рис. 3. Общая деформация контейнера после ударов

На рис. 4 приведено сравнение расчетных деформированных форм с рентгеновскими снимками деформированных конфигураций контейнера после осевого и углового ударов о днище, а также углового удара о крышку.

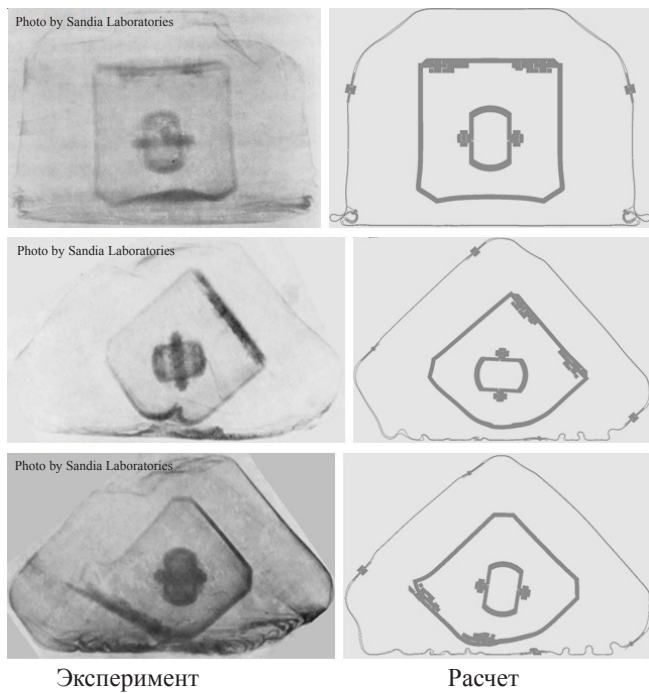


Рис. 4. Внутренняя деформация контейнера

Отметим, что рентгеновские снимки сделаны после тестов на удар, раздавливание, пробитие и рассечение, тогда как расчетные сечения показывают деформированную конфигурацию конструкции только после удара. По этой причине, а также по причине того, что в расчетах не учитывается разрушение элементов конструкции, между рисунками есть определенные различия, однако в целом результаты расчетов и экспериментов весьма близки.

Количественное сравнение результатов расчетов и экспериментов представлено в таблице 1, где приведены расчетные и экспериментальные остаточные толщины древесных слоев и высота деформированного контейнера в направлении удара. Анализ представленных в таблице результатов показывает, что расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются. Максимальное отличие результатов расчетов от результатов экспериментальных исследований 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%.

Таблица 1

Остаточные размеры элементов контейнера

Ориентация удара	Толщина кленового слоя, мм		Толщина слоя красного дерева, мм		Высота контейнера в направлении удара, мм	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
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

2.2. Расчеты термостойкости. Для расчетов термостойкости на основе ППП ЛОГОС разработаны две компьютерные тепловые модели. Первая соответствует контейнеру в исходном состоянии, а вторая модель построена для деформированной формы контейнера, полученной в прочностном расчете. Рассматривается деформированный контейнер РАТ-2 после осевого удара о донную часть со скоростью $V = 133,6$ м/с. Вид разработанных моделей показан на рис. 5.

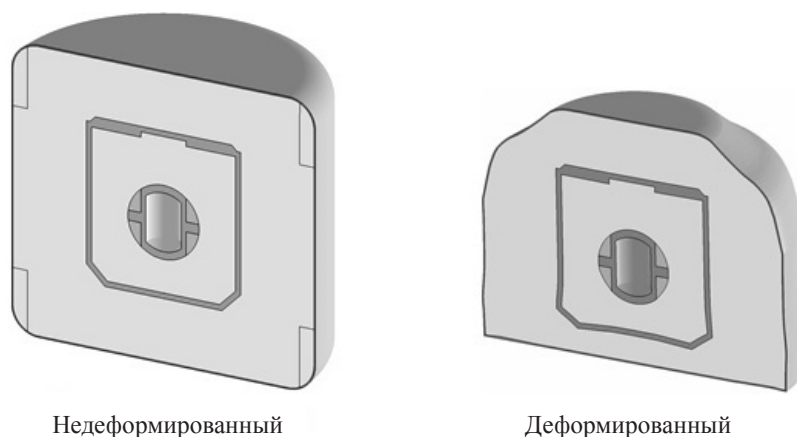


Рис. 5. Тепловые компьютерные модели контейнера

Размерность каждой модели составляет $\sim 1\,000\,000$ КЭ, характерный масштаб дискретизации по пространству составляет $3,0 \times 3,0 \times 1,5$ 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.

На основе модели контейнера в исходном состоянии проведены расчеты его термостойкости в 30-минутном «наземном» пожаре при температуре $800\text{ }^\circ\text{C}$. Результаты расчетов приведены на рис. 6, где показано распределение максимальных температур в сечении контейнера и расчетная область терморазложения слоя красного дерева. В качестве границы зоны терморазложения принята температура начала обугливания $T_{\text{тр}} = 288\text{ }^\circ\text{C}$ [12]. Результаты расчетов показывают, что глубина зоны термического разложения достигает $\Delta h = 41$ мм, что хорошо согласуется с данными испытаний [12], в которых зафиксирована глубина до 38 мм.

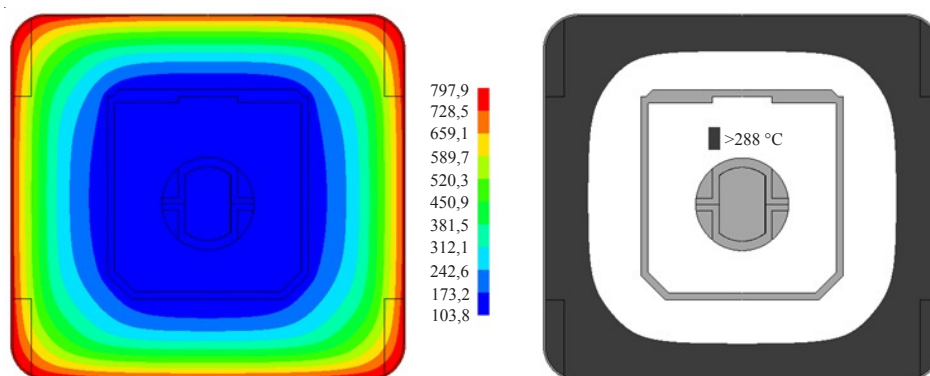


Рис. 6. Максимальные температуры и зона терморазложения в «наземном» пожаре

Расчеты термостойкости в авиационном пожаре ($T = 1010\text{ }^\circ\text{C}$, $t = 1$ час) проведены как для контейнера в исходном состоянии, так и для контейнера, деформированного после осевого удара о донную часть. Распределения температур на момент достижения максимальных значений на корпусе контейнера и зоны терморазложения приведены соответственно на рис. 7 и 8.

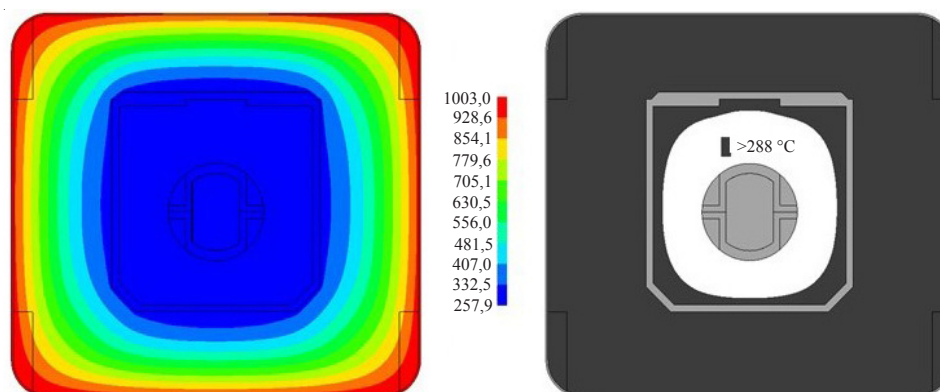


Рис. 7. Максимальные температуры и зона терморазложения исходного контейнера в «авиационном» пожаре

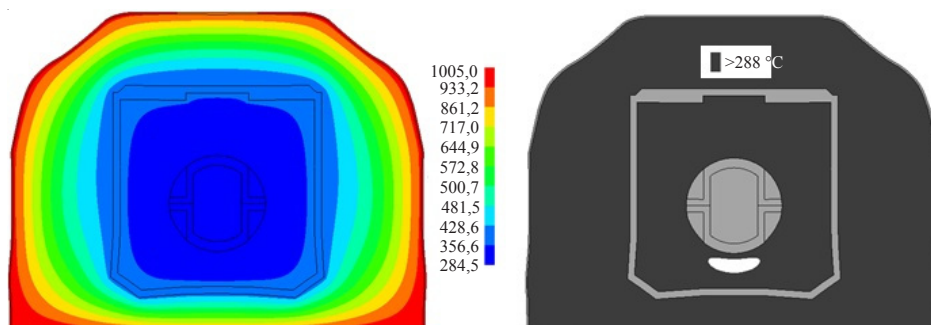


Рис. 8. Максимальные температуры и зона терморазложения деформированного контейнера в «авиационном» пожаре

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 $T_{тр} = 288$ °C лежит на поверхности гермосферы, тогда как в исходной конструкции она отстоит на 35–50 мм.

По результатам испытаний деформированных контейнеров в авиационном пожаре отмечается [12], что слои красного дерева и клена полностью обуглились, что качественно подтверждает правильность полученных численных результатов. В испытаниях ни в одном из деформированных контейнеров не обнаружено плавления алюминиевых обтекателей на гермосферах. Максимальная температура на гермосфере не превысила температуру плавления $T_{пл} = 582$ °C и находилась в интервале 288 °C $< T_{max} < 582$ °C. По результатам моделирования максимальная температура T_{max} на гермосфере исходного контейнера составляет ~ 258 °C, а деформированного ~ 296 °C, что согласуется с экспериментальными данными и указывает на снижение термостойкости деформированной конструкции примерно на 15%.

Выводы

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

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

Список литературы

1. Adalian C., Morlier P. Modeling the behaviour of wood during the crash of a cask impact limiter. *PATRAM'98. Conference Proceedings*. Paris. France. May, 1998. Vol. 1.

2. Bolshakov A.P., Gerdjukov N.N., Zotov E.V., Novikov S.A., Scherbak Yu.I. Damping properties of sequoia and birch under shock loading. *PATRAM'98 Conference Proceedings*. Paris. France. May, 1998. Vol. 1.
3. Рябов А. А. Численный анализ тепловой энергоемкости защитного контейнера. *Вестник ННГУ. Серия Механика*. 2000. Вып. 2. С. 171–178.
4. Рябов А. А. Компьютерный анализ термостойкости авиаконтейнера. *II науч. конф. по механике и прочности конструкций, посвященная 80-летию акад. Е.А. Негина*: Сб. докл. Саров, 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 Conference*. Tucson, AZ. February 23–27, 2003.
6. Ryabov A., Romanov V., Roschikhmarov D. Optimization of protective container subjected to thermal and impact loads. *WM'04 Conference*. Tucson, AZ. February 29–March 4, 2004.
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. *Patram'2004. Conference Proceedings*. Berlin, Germany. September, 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. *9-th International LS-DYNA Users Conference*. Dearborn, Michigan, USA. June 4–6, 2006. P. 9–51.
9. Ryabov A.A., Romanov V.I., Kukanov S.S., Spiridonov V.F., Dyanov D.Yu. Numerical simulation of dynamic deformation of air transport package in high-speed accidental impact. *PATRAM'2010. Conference Proceedings*. London, UK. October, 2010.
10. International atomic energy agency (IAEA): Regulations for the safe transport of radioactive material. 2009. Edition. *Safety Standard Series No. TS-R-1*. Vienna, Austria. 2009.
11. Дьянов Д.Ю., Спиридонов В.Ф., Циберев К.В., Корсакова Е.И., Борляев В.В., Стародубов С.В., Симонов Г.П., Волков А.Ю., Шувалова Е.В., Рябов А.А., Романов В.И., Куканов С.С. Пакет программ ЛЮГОС. Модуль решения динамических задач прочности. *Супервычисления и математическое моделирование: Тр. XIII Междунар. семинара*. Саров. 3–7 октября, 2011. С. 208–219.
12. Anderson J.A., Davis E.J., Duffey T.A., Dupree S.A., George O.L., Ortiz Jr. Z. PAT-2 (Plutonium air transportable model 2). *Safety Analysis Report, Sandia Laboratories, SAND81-0001 Unlimited Release*. Albuquerque, NM, USA. 1981.
13. Forest products laboratory. *Wood handbook – Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1999.
14. John O. Hallquist. LS-DYNA® theory manual. Livermore Software Technology Corporation, 2006. http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/trent001/manuals/ls-dyna_theory_manual_2006.pdf

References

1. Adalian C., Morlier P. Modeling the behaviour of wood during the crash of a cask impact limiter. *PATRAM'98. Conference Proceedings*. Paris. France. May, 1998. Vol. 1.
2. Bolshakov A.P., Gerdjukov N.N., Zotov E.V., Novikov S.A., Scherbak Yu.I. Damping properties of sequoia and birch under shock loading. *PATRAM'98 Conference Proceedings*. Paris. France. May, 1998. Vol. 1.
3. Ryabov A. A. Chislennyy analiz teplovoy energoemkosti zashchitnogo konteynera. *Vestnik NNGU. Seriya Mekhanika*. 2000. Vyp. 2. S. 171–178.
4. Ryabov A. A. Komp'yuternyy analiz termostoykosti aviakonteynera. *II nauch. konf. po mekhanike i prochnosti konstruksiy, posvyashchennaya 80-letiyu akad. E.A. Neginu*: Sb. dokl. Sarov, VNIIEF. 2002. S. 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 Conference*. Tucson, AZ. February 23–27, 2003.
6. Ryabov A., Romanov V., Roschikhmarov D. Optimization of protective container subjected to thermal and impact loads. *WM'04 Conference*. Tucson, AZ. February 29–March 4, 2004.

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. *Patram'2004. Conference Proceedings*. Berlin, Germany. September, 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. *9-th International LS-DYNA Users Conference*. Dearborn, Michigan, USA. June 4–6, 2006. P. 9–51.
9. Ryabov A.A., Romanov V.I., Kukanov S.S., Spiridonov V.F., Dyanov D.Yu. Numerical simulation of dynamic deformation of air transport package in high-speed accidental impact. *PATRAM'2010. Conference Proceedings*. London, UK. October, 2010.
10. International atomic energy agency (IAEA): Regulations for the safe transport of radioactive material. 2009. Edition. *Safety Standard Series No. TS-R-1*. Vienna, Austria. 2009.
11. D'yanov D.Yu., Spiridonov V.F., Tsiberev K.V., Korsakova E.I., Borlyayev V.V., Starodubov S.V., Simonov G.P., Volkov A.Yu., Shuvalova E.V., Ryabov A.A., Romanov V.I., Kukanov S.S. Paket programm LOGOS. Modul' resheniya dinamicheskikh zadach prochnosti. *Supervychisleniya i matematicheskoe modelirovanie: Tr. XIII Mezhdunar. seminara*. Sarov. 3–7 oktyabrya, 2011. S. 208–219.
12. Anderson J.A., Davis E.J., Duffey T.A., Dupree S.A., George O.L., Ortiz Jr. Z. PAT-2 (Plutonium air transportable model 2). *Safety Analysis Report, Sandia Laboratories, SAND81-0001 Unlimited Release*. Albuquerque, NM, USA. 1981.
13. Forest products laboratory. *Wood handbook – Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1999.
14. John O. Hallquist. LS-DYNA® theory manual. Livermore Software Technology Corporation, 2006. 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

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

*Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Russian Federation*

The PAT-2 package is designed by Sandia National Laboratories for the safe transportation of plutonium and/or uranium in small quantities, especially as transported by air. It was verified by experiments that the package meets the requirements of 10 CFR 71 for Fissile Class 1 packages. These experimental investigations give a large amount of information, which can be used for verification and validation of computer codes, intended to simulation of structures dynamics and heat transfer. 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 at the velocity more then 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 high performance computing finite element code LOGOS developed at Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics. High accuracy of the numerical simulation results is validated by good agreement of numerical and experimental data.

Keywords: airborne container, complex thermal-stress loading, high-velocity impact, airplane fire, finite element method, numerical modeling, dynamic stress analysis, thermal resistance analysis.