

ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕМАТИКИ НЕДЕФОРМИРУЕМЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И МЕХАНИЗМОВ

В. В. Борляев, В. А. Афанасьев, Д. Ю. Дьянов, И. В. Серякова, М. В. Беженцева

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

Доклад посвящен описанию подхода моделирования недеформируемых твердых тел и механизмов в пакете программ ЛОГОС. В докладе приведено описание общих принципов построения аппроксимаций для моделирования твердых тел и механизмов, описаны подходы для моделирования шарнирных соединений, а также методы сопряжения деформируемых и недеформируемых объектов.

Для демонстрации работоспособности реализованного функционала в докладе представлены результаты численных расчетов ряда тестовых и верификационных задач, проведенных с использованием пакета программ ЛОГОС.

Ключевые слова: пакет программ ЛОГОС, программный модуль ЛОГОС-ПА, метод конечных элементов, недеформируемое твердое тело, шарнирные соединения.

Введение

Во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ведется разработка расчетно-математического пакета программ ЛОГОС, предназначенного для инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования в интересах высокотехнологичных отраслей промышленности. Одной из составных частей пакета программ ЛОГОС является программный модуль (далее – ЛОГОС-ПА) для моделирования двумерных и трехмерных задач анализа напряженно-деформированное состояние конструкций при динамических, статических, вибрационных нагрузках [1, 2].

Одним из условий успешного внедрения пакета программ ЛОГОС в полный цикл разработки изделий на предприятиях является наличие широкого набора функциональных возможностей для моделирования задач динамического деформирования. Базовым способом численного решения указанного класса задач в ЛОГОС-ПА является использование лагранжевого подхода на основе метода конечных элементов для аппроксимации по пространству при явной конечно-разностной аппроксимации по времени [3, 4]. При решении динамических задач деформирования конструкций часто возникает потребность в моделировании кинематики движения твердых тел и механизмов, а также возможность связанного моделирования движения деформируемых и недеформируемых твердых тел.

На текущий момент в программном модуле ЛОГОС-ПА существуют два подхода моделирования недеформируемых твердых тел и механизмов. Первый подход основан на использовании программного комплекса EULER [5]. Данный программный комплекс имеет богатый функционал для моделирования кинематики недеформируемых твердых тел и механизмов и связан с пакетом программ ЛОГОС средствами интеграционной платформы ЛОГОС для проведения, в том числе, связанных расчетов. Ограничением для использования данного подхода является то, что связь осуществляется только через специальные интерфейсные узлы и соответственно не учитывается контактное взаимодействие недеформируемых тел с деформируемой частью модели ЛОГОС. Второй подход основан на собственной реализации расчета кинематики недеформируемых твердых тел непосредственно в ЛОГОС-ПА. В данной работе речь пойдет о втором подходе.

В 2018 году в рамках контракта с КНИТУ-КАИ был проведен анализ возможностей пакета программ ЛОГОС для расчетов задач по моделированию крэш-тестов грузовых автомобилей. По результатам этого анализа была создана верификационная база данных различных задач, правильное решение которых необходимо для полноценного моделирования крэш-теста автомобиля. Данная база данных содержит постановки и результаты решения различных задач по пакету программ ЛОГОС и LS-Dyna [6]. Все результаты, приводимые в статье, по пакету программ LS-Dyna взяты из базы данных верификационных задач.

На текущий момент в пакете ЛОГОС-ПА реализован следующий функционал по работе с недеформируемыми объектами:

- объединение нескольких твердых тел в одно;
- расчет узлового твердого тела;
- различные шарнирные соединения между недеформируемыми телами;
- ограничение поступательного или вращательного движения;
- навязанное перемещения или вращения;
- навязанное положение центра масс, тензора инерции;
- инерционная нагрузка.

Расчет движения недеформируемого тела

Уравнения движения недеформируемого тела записываются через движение центра масс и выглядят следующим образом [7]:

$$M\ddot{\vec{x}} = \vec{f}^x, \quad (1)$$

$$J\dot{\vec{\omega}} + \vec{\omega} \times J\vec{\omega} = \vec{f}^\omega. \quad (2)$$

Здесь M – масса недеформируемого объекта, J – тензор инерции, \vec{f}^x – результирующая сила, \vec{f}^ω – результирующий момент, \vec{x} – координаты центра масс, $\vec{\omega}$ – угловая скорость.

$$I_{ij} = \sum_k (m_k (\delta_{ij} r_k^2 - r_{ik} r_{jk})). \quad (3)$$

Здесь m_k – масса узла k , r_{ik} – i -ая компонента радиус-вектора узла k , δ_{ij} – символ Кронекера.

При переходе в локальную систему координат, расположенную в точке центра масс, уравнения (1) и (2) примут вид:

$$M\ddot{\vec{x}}_c = \vec{f}_c^x, \quad (4)$$

$$J\dot{\vec{\omega}}_c = \vec{f}_c^\omega. \quad (5)$$

Положение центра масс вычисляется следующим образом:

$$\vec{x}_c = \frac{\sum_k m_k \vec{r}_k}{M}. \quad (6)$$

Из уравнений (4), (5) получаем поступательные и вращательные ускорения для центра масс:

$$\ddot{\vec{x}}_c = \vec{f}_c^x / M, \quad (7)$$

$$\dot{\vec{\omega}}_c = J^{-1} \vec{f}_c^\omega. \quad (8)$$

Далее вычисляются изменения поступательной и угловой координаты Δx и $\Delta \theta$ для нахождения нового положения центра масс и всех точек недеформируемого тела.

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \Delta x + (A - I)r_i^n, \quad (9)$$

где A – матрица преобразования, рассчитываемая по формуле Hughes-Winget [6, 8]:

$$A = I + \frac{1}{1 + \frac{\Delta \theta^T \Delta \theta}{4}} \left(I + \frac{1}{2} \Delta S \right) \Delta S. \quad (10)$$

$$\Delta S r = \Delta \theta \times r. \quad (11)$$

Новые скорости в узлах тела находятся по формуле

$$\dot{x}_t = \frac{(x_t^{n+1} - x_t^n)}{\Delta t}. \quad (12)$$

На каждом шаге по времени происходит изменение тензора инерции:

$$J^{n+1} = A J^n A^T, \quad (13)$$

Шарнирные соединения

Шарнирное соединение – кинематическая пара, то есть подвижное соединение двух частей конструкции, которое обеспечивает им вращательное и/или поступательное движение относительно друг друга [6, 9]. Шарниры используются для задания кинематических ограничений между различными твердыми телами. Основные виды шарнирных соединений представлены на рис. 1: сферический (шаровой) (а), поворотный (шарнирная петля) (б), цилиндрический (в), плоский (г), универсальный (д) (кардан) и поступательный (е).

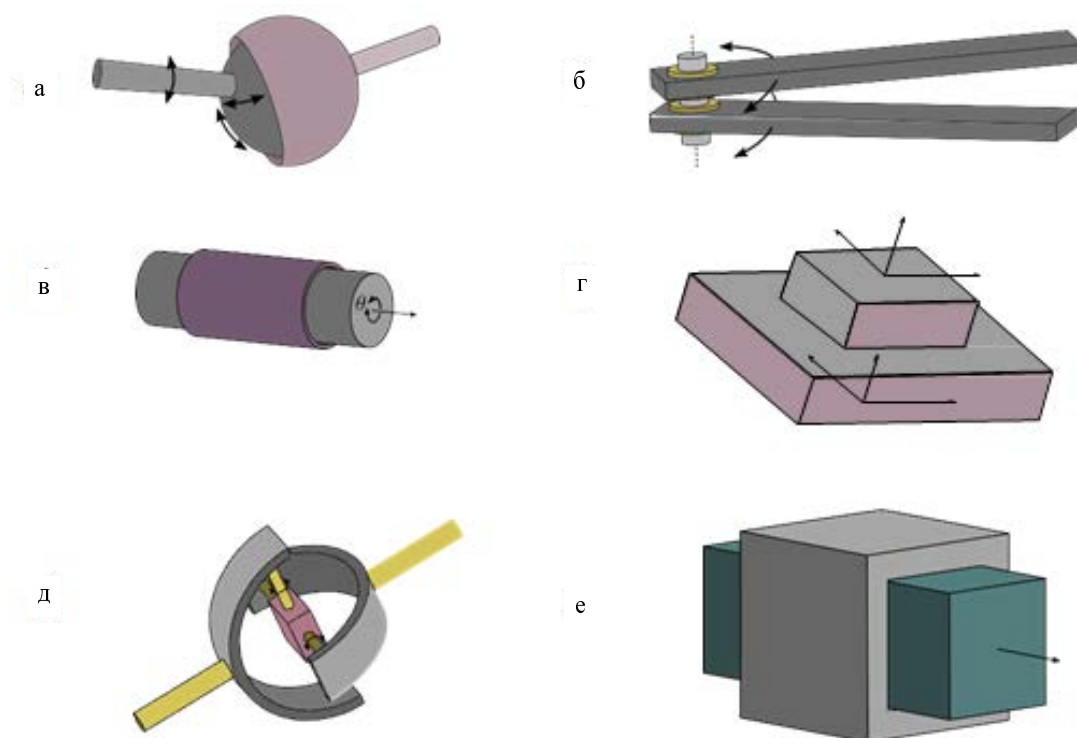


Рис. 1. Примеры реализованных шарнирных соединений

Основным методом моделирования шарнирного соединения в явных схемах является использование метода штрафных функций (метод штрафа [6]). Сила штрафа для узла k , возникающая в результате работы шарнирного соединения, вычисляется по формуле

$$f_k = \frac{K \cdot d_k}{\tau^2}, \quad (14)$$

где K – коэффициент жесткости, d_k – расстояние отклонения узла шарнира от заданного положения, τ – шаг интегрирования по времени.

Задание жесткостных и демпфирующих ограничений для шарнирных соединений

В ЛОГОС-ПА реализован метод, который позволяет отслеживать изменение положения недеформируемых тел при их вращении друг относительно друга [6]. Это бывает необходимо, например, для корректного описания поведения суставов манекена, задания трения при работе шарнирного соединения.

Для каждой из трех осей координат можно задать допустимые углы поворота, при превышении которых будет появляться момент в обратном направлении. Диаграмма зависимости момента от угла приведена на рис. 2.

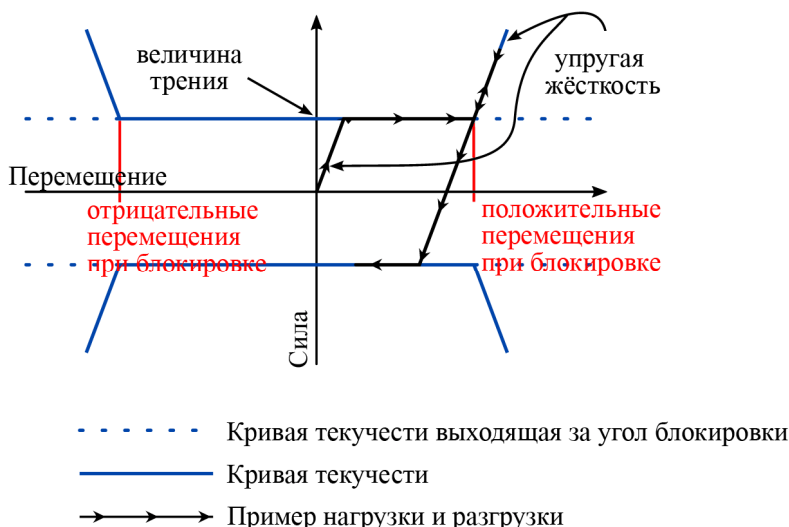


Рис. 2. Модель трения и жесткости для шарнирных соединений

Пример расчета недеформируемых тел с использованием шарниров

На рис. 3 приведена система недеформируемых тел, соединенных шарнирами.

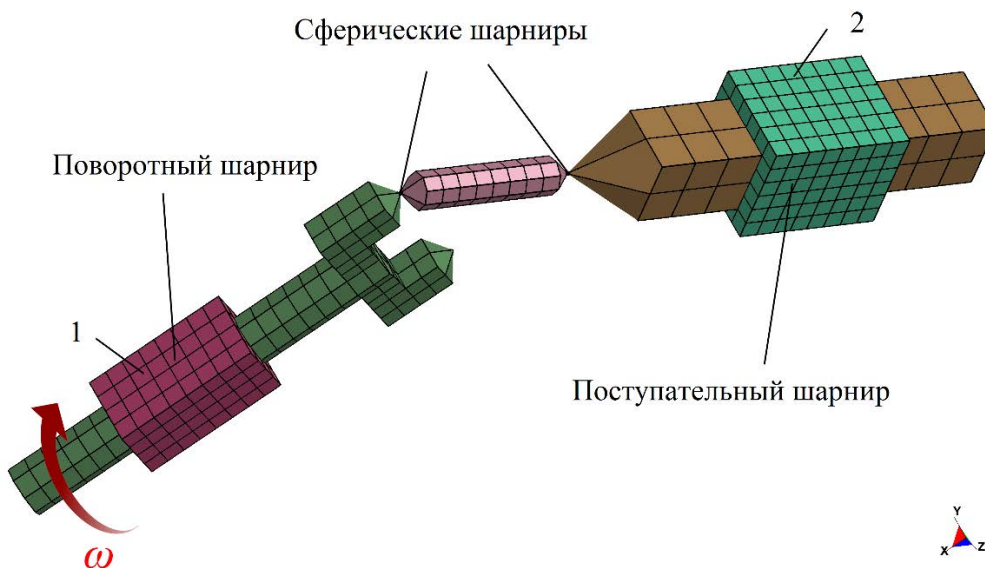


Рис. 3. Модель для тестирования шарниров

Детали 1 и 2 неподвижны. В данной модели используются два сферических, поворотный и поступательный шарниры. На входном валу (деталь слева) задается начальная угловая скорость $\omega = 50$ рад/с. В результате работы данного механизма вращательное движение преобразуется в поступательное. На рис. 4 приведены зависимости результирующей поступательной скорости на выходном звене (деталь справа), полученные по LS-DYNA [6] и ЛОГОС-ПА.

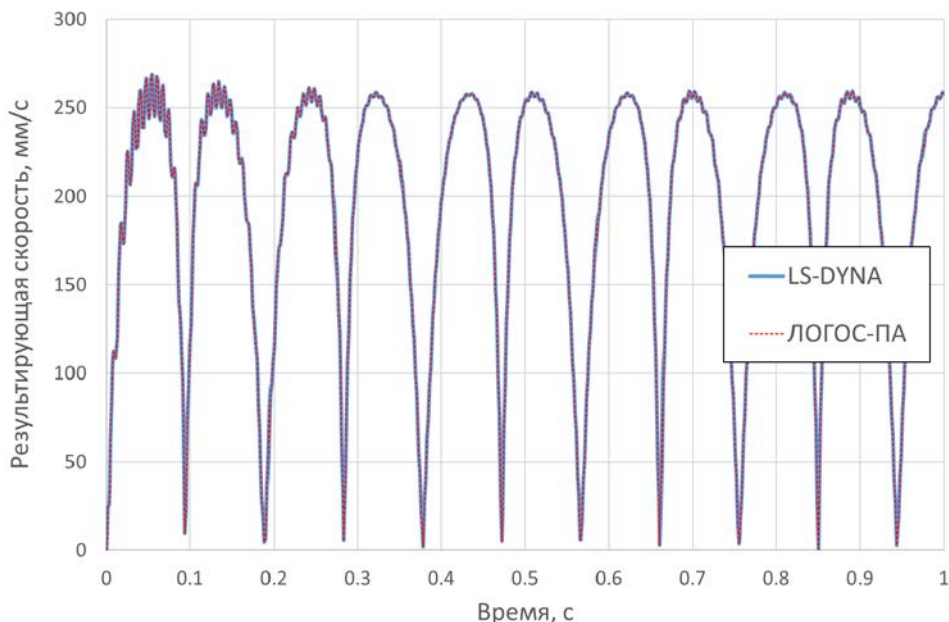


Рис. 4. Зависимость поступательной скорости выходного звена механизма, полученные в LS-DYNA и ЛОГОС

Из рис. 4 видно, что результаты моделирования по LS-DYNA и ЛОГОС-ПА имеют хорошее совпадение. Анализ графиков показал, что разница результатов не превышает 0.01%.

Численное моделирование крэш-теста прототипа автомобиля-тягача

В задаче из верификационной базы данных рассматривается моделирование крэш-теста прототипа автомобиля-тягача. Автомобиль движется с начальной скоростью 30 км/ч и взаимодействует с неподвижным жестким препятствием, расположенным под углом 60° к направлению движения. Постановка задачи представлена на рис. 5.

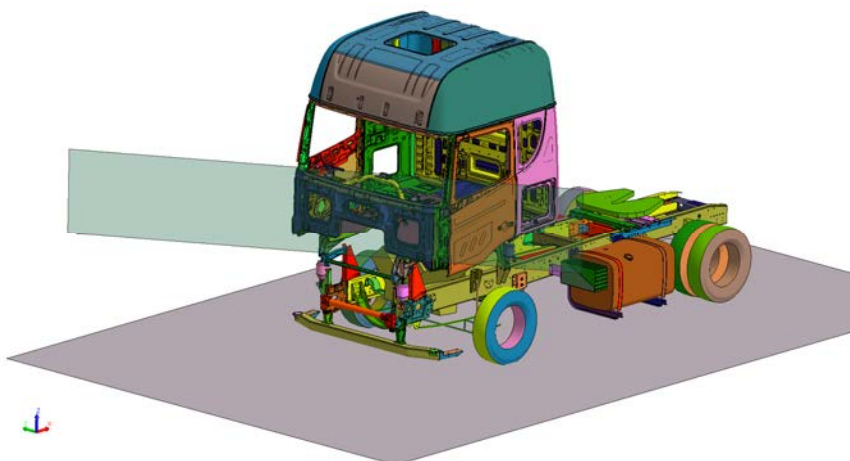


Рис. 5. Постановка задачи

Модель содержит 1 131 089 узел, 1149338 элементов, из которых оболочечных – 927 344, балочных – 4 449, объемных – 217539, дискретных – 6, массовых – 78, жестких узловых связей – 998. В задаче используются как недеформируемые, так и деформируемые элементы конструкции.

Шарниры навесов дверей кабины были смоделированы путем задания недеформируемых систем узлов, представленных на рис. 6.

В каждую такую систему входили узлы кронштейнов навесов дверей и пары узлов на осях шарниров. Пары узлов на осях шарниров навесов использовались для задания цилиндрических шарниров, изображенных на рис. 7.

Болтовые соединения моделировались путем объединения узлов по контуру отверстий жесткой связью, как показано на рис. 8. Болтовые соединения литых кронштейнов (моделировались трехмерными элементами) задавались аналогично, жестким связыванием всех узлов по поверхности отверстий.

Конечно-элементная модель несущей системы с силовым агрегатом, передним противоподкатным защитным устройством, седельным устройством, топливными баками, инструментальным ящиком и колесами изображены на рис. 9. Штампованные детали конструкции и шины моделировались оболочечными конечными элементами, литые кронштейны, двигатель и седло – объемными конечными элементами.

Двигатель с кронштейнами и его крепления на раме задавалась моделями абсолютно жесткого тела.

Расчет выполнялся на 84 процессорах в параллельном режиме в модели распределенной памяти с использованием интерфейса передачи сообщений MPI [10], время счета 2 суток.

Деформирование грузового автомобиля, полученные по LS-DYNA и ЛОГОС-ПА на моменты времени $t = 0.06$ с и $t = 0.09$ с показаны на рис. 10–11 и 12–13 соответственно. Из приведенных рисунков видно, что результаты расчетов качественно совпадают между собой.

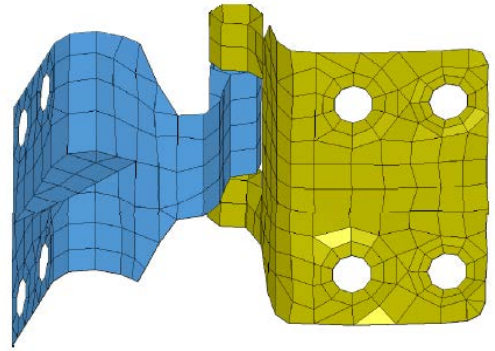


Рис. 6. Конечно-элементная модель навеса двери на кабину

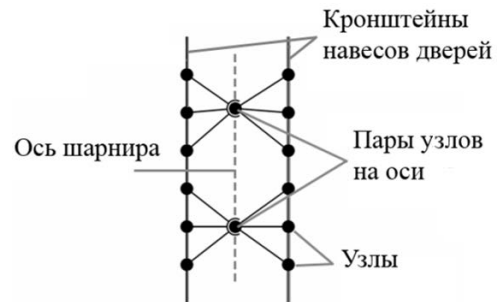


Рис. 7. Схема моделирования шарниров навески дверей

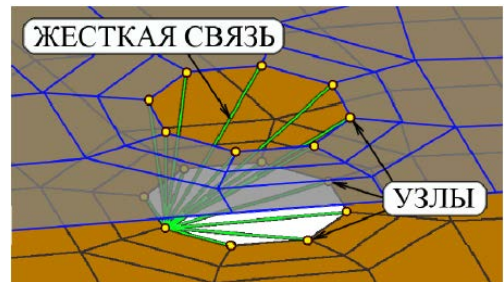


Рис. 8. Моделирование болтового соединения тонкостенных деталей

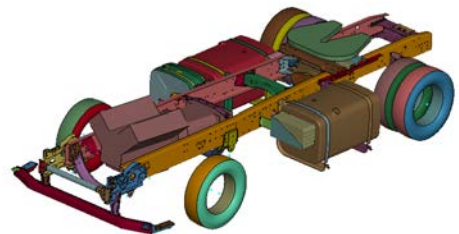


Рис. 9. Конечно-элементная модель несущей системы с силовым агрегатом, ППЗУ, Баками

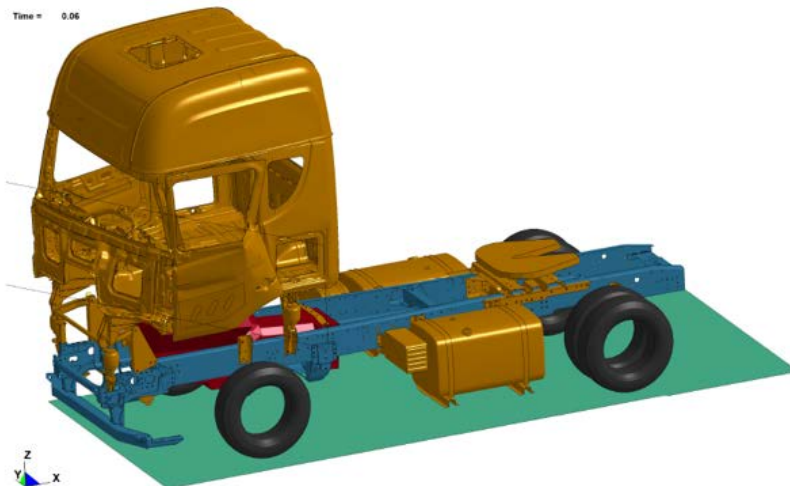


Рис. 10 . Деформированное состояние на момент времени $t = 0.06$ с, LS-DYNA

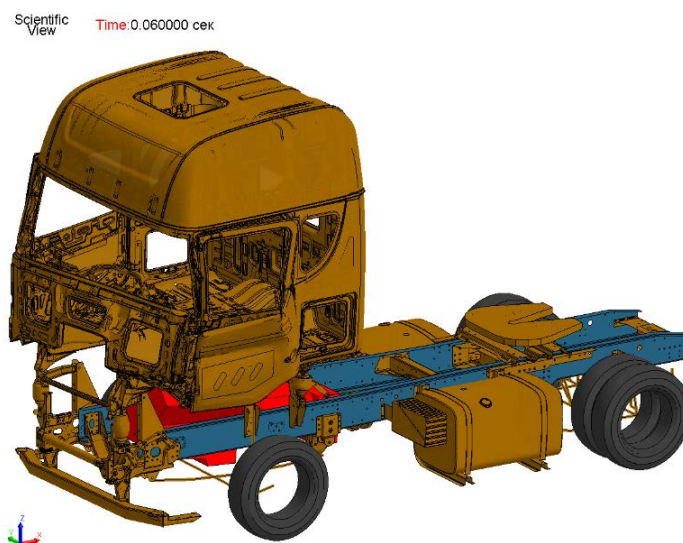


Рис. 11. Деформированное состояние на момент времени $t = 0.06$ с, ЛОГОС-ПА

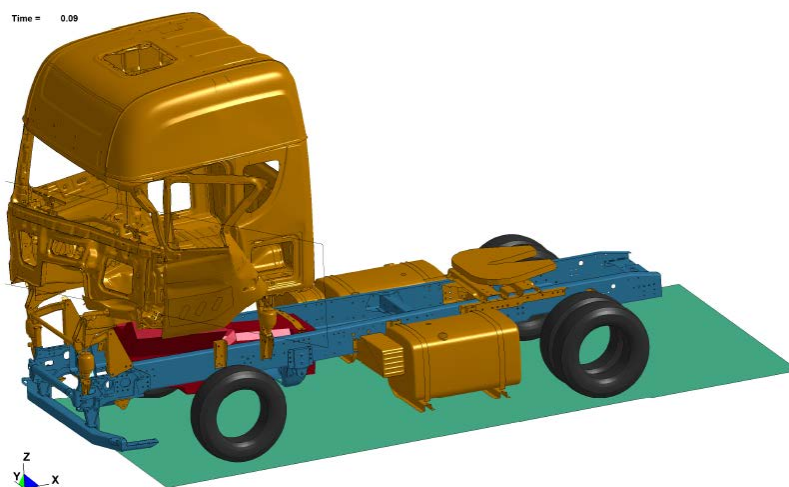


Рис. 12. Деформированное состояние на момент времени $t = 0.09$ с, LS-DYNA

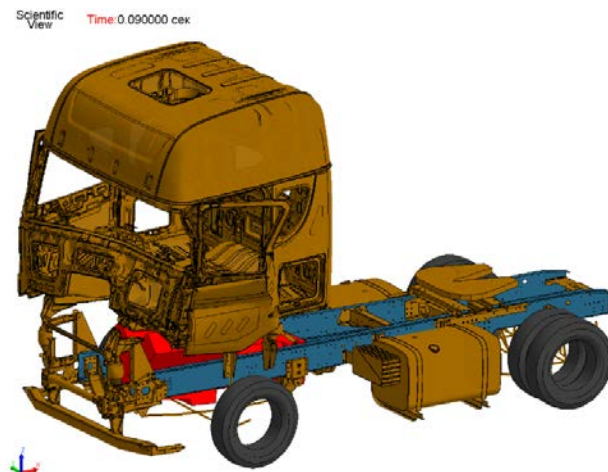


Рис. 13. Деформированное состояние на момент времени $t = 0.09$ с, ЛОГОС-ПА

Заключение

Методы и алгоритмы, описанные в рамках данной работы, предназначены для моделирования в программном модуле ЛОГОС-ПА движения недеформируемых тел как отдельно, так и в составе единой конструкции.

В работе приведено краткое описание алгоритмов моделирования движения недеформируемых тел и шарнирных соединений в пакете программ ЛОГОС. Приведены результаты расчета верификационных задач, подтверждающих работоспособность реализованных алгоритмов. Реализованные возможности позволяют существенно расширить класс решаемых задач.

Литература

1. Циберев К. В., Авдеев П. А., Артамонов М. В., Борляев В. В., Величко С. В., Волков А. Ю., Володина Н. А., Дьянов Д. Ю., Корсакова Е. И., Косарим С. С., Кулыгина О. Н., Мышкина И. Ю., Наумов А. О., Присташ М. М., Резвова Т. В., Резяпов А. А., Родионов А. В., Симонов Г. П., Спиридонов В. Ф., Стародубов С. В., Тарадай И. Ю., Филимонкин Е. А., Челаков А. А., Шувалова Е. В., и др. Пакет программ ЛОГОС. Обзор текущих возможностей для решения задач прочности // XIV международный семинар «Супервычисления и математическое моделирование»: Сборник научных трудов. – Саров, 2013. С. 599–609.
2. Дьянов Д. Ю., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В., Наумова Е. И., Борляев В. В., Стародубов С. В., Шувалова Е. В., Медведкина М. В., Артемова Е. О., Челаков А. А., Казанцев А. В., Рябов А. А., Романов В. И., Куканов С. С. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения динамических задач прочности // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 1. С. 3–13.
3. Дьянов Д. Ю., Казанцев А. В., Циберев К. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения динамических задач прочности // Супервычисления и математическое моделирование: Труды XVII международного семинара, Саров, 15-19 октября, 2018. С. 210–219.
4. Дьянов Д. Ю., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения динамических задач прочности // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 2. С. 3–13.
5. Бойков В. Г., Юдаков А. А. Моделирование динамики системы твердых и упругих тел в программном комплексе EULER // Информационные технологии и вычислительные системы. 2011. № 1. С. 42–52.

6. LS-DYNA [Electronic resource]: Livermore Software Technology Corp. –Mode of Access: <http://www.lstc.com/products/ls-dyna>.
7. Бутенин Н. В., Лунц Я. Л., Меркин Д. Р. Курс теоретической механики: Учебник. В двух томах. Т. II.: Динамика. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. С. 544.
8. Benson D. J., Hallquist J. O. A simple rigid body algorithm for structural dynamics programs // Int. J. Numer. Meth. Eng. 1986. Vol. 22. P. 723–749.
9. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин: Учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 640 с.
10. MPIDocuments [Electronic resource]. Mode of Access: <http://www.mpi-forum.org/docs/docs.html>.

LOGOS SOFTWARE PACKAGE: SIMULATION METHODS FOR THE KINEMATICS OF RIGID BODIES AND DEVICES

V. V. Borlyayev, V. A. Afanasyev, D. Yu., Dyanov, I. V. Seryakova, M. V. Bezhentseva

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

The paper presents an approach to simulating rigid bodies and devices in the LOGOS software package. General ideas of approximations used to simulate rigid bodies and devices and approaches to simulating hinge joints are described, as well as the methods of conjugating deformable and non-deformable parts.

To demonstrate the efficiency of the implemented functionality, the paper presents the LOGOS software package results of numerical simulations for a number of test and variation problems.

Key words: the LOGOS software package, the LOGOS-SA program module, the finite element method, rigid body, hinge joints.