

ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ

И. И. Каныгин, М. Ф. Абдуллин, Р. А. Барабанов, А. Ю. Еременко, Д. Д. Кварацхелия, С. С. Косарим, А. О. Наумов, Е. А. Филимонкин, К. В. Циберев, А. В. Юлин, В. А. Юносова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл

Введение

В «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разрабатывается пакет программ (ПП) ЛОГОС [1], предназначенный для комплексного математического моделирования процессов аэро-, гидро-, газодинамики, тепломассопереноса, турбулентного перемешивания и прочности с использованием ресурсов современных супер-ЭВМ. Разработка ведется в тесном сотрудничестве с научно-исследовательскими организациями и промышленными предприятиями.

Одной из составных частей пакета программ ЛОГОС является модуль решения задач статической, динамической и вибрационной прочности конструкций. В докладе представлено описание функциональных возможностей модуля пакета программ ЛОГОС в части решения статических задач прочности [2–3].

Особое внимание в докладе уделено описанию новых функциональных возможностей, реализованных в 2017–2018 гг. и направленных на расширение классов решаемых задач в интересах внедрения на предприятия авиационной, космической и судостроительной отраслей промышленности. К данным возможностям относится развитие методов моделирования балочных и оболочечных конструкций, методов учета контактного взаимодействия, методов моделирования конструктивных соединений.

Для демонстрации работоспособности представленных функциональных возможностей прочностного модуля ПП ЛОГОС в докладе представлены результаты решения методических и практических задач статического деформирования авиационных конструкций.

Особенности модуля решения статических задач прочности ПП ЛОГОС

В прочностном модуле пакета программ ЛОГОС для описания физических процессов реализуются современные физико-математические модели, подходы и алгоритмы.

- Метод конечных элементов (МКЭ) (явные и неявные схемы с использованием эффективных прямых и итерационных параллельных решателей СЛАУ).

- Методы учета контактного взаимодействия материалов.

- Структурированные и неструктурированные сетки.

- Библиотека универсальных и специализированных конечных элементов.

- Набор моделей деформирования и разрушения конструкционных материалов.

- Алгоритмы взаимодействия твердотельных конструкций с газодинамической средой (Fluid Structure Interaction).

- Распараллеливание с использованием смешанной модели (OpenMP+MPI).

Перечисленные особенности конечно-элементной (КЭ) методики прочностного модуля ПП ЛОГОС обеспечивают решение широкого класса динамических, статических и вибрационных задач прочности, а также позволяют проводить расчеты связанных и сопряженных задач в интересах как оборонных, так и гражданских отраслей промышленности.

В данном докладе представлено описание функциональных возможностей пакета программ ЛОГОС в части решения статических задач прочности, или задач нахождения напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции при воздействии статических (не зависящих от времени) нагрузок.

Можно выделить следующие основные особенности модуля решения статических задач прочности в пакете программ ЛОГОС.

- Библиотека поддерживаемых типов конечных элементов включает в себя набор трехмерных элементов сплошной среды первого и второго порядка аппроксимации по пространству (шестигранники, треугольные призмы, тетраэдры и пирамиды с четырехугольным основанием), а также плоские оболочечные элементы и одномерные балочные элементы; для шестигранников реализован учет дополнительных функций формы и стабилизирующих добавок.

- Реализован широкий набор граничных условий и прикладываемых нагрузок, а также набор функциональных возможностей для моделирования конструктивных элементов расчетных моделей: жесткие связи, заклепочные и болтовые соединения, многоточечные ограничения и т. д.

- Набор моделей материального деформирования включает в себя модели упругого изотропно-

го/ортотропного/анизотропного материала, упруго-пластического материала (билинейная/мультилинейная диаграмма деформирования, изотропное/кинематическое упрочнение), набор моделей ползучести. Все модели материального деформирования предполагают зависимость материальных характеристик от температуры.

- Реализован учет эффектов физической (материальной) нелинейности (ползучесть, поврежденность, разномодульность, разрыхление), геометрической нелинейности (большие деформации/вращения), а также учет контактного взаимодействия.

- Адаптивная схема расчета шага статической прочности обеспечивает разбиение прикладываемой нагрузки на шаги и подшаги с процедурой автоматического выбора величины подшага по нагрузке. Использование автоматической схемы выбора подшагов по нагружению позволяет обеспечить сходимость численного линеаризованного решения на сильно нелинейном характере деформирования.

- Для решения глобальной системы линейных алгебраических уравнений реализованы интерфейсы к библиотекам прямых и итерационных решателей.

Следует отметить, что в ранних версиях (до 2017 года) прочностного модуля пакета программ ЛОГОС учет эффектов нелинейного деформирования (материальная, геометрическая нелинейность,

контактное взаимодействие) был реализован лишь для моделей, состоящих из объемных конечных элементов, а моделирование балочных и оболочечных конструкций осуществлялось лишь в линейном приближении. Это существенно ограничивало классы решаемых задач статического деформирования конструкций и препятствовало внедрению прочностного модуля ПП ЛОГОС в расчетную деятельность предприятий авиационной, космической, судостроительной, автомобильной отраслей промышленности, т. е. предприятий, где значительная часть конструкций и конструктивных элементов моделируется балочными и оболочечными элементами. Примеры линейных практических расчетов в балочном и оболочечном приближении приведены на рис. 1–2.

Развитие функциональных возможностей в интересах моделирования тонкостенных и балочных конструкций

Для расширения класса решаемых задач и в интересах внедрения в расчетную деятельность предприятий аэрокосмической и автомобильной отраслей промышленности основное развитие модуля решения статических задач прочности ПП ЛОГОС в 2017–2018 гг. было направлено на расширение

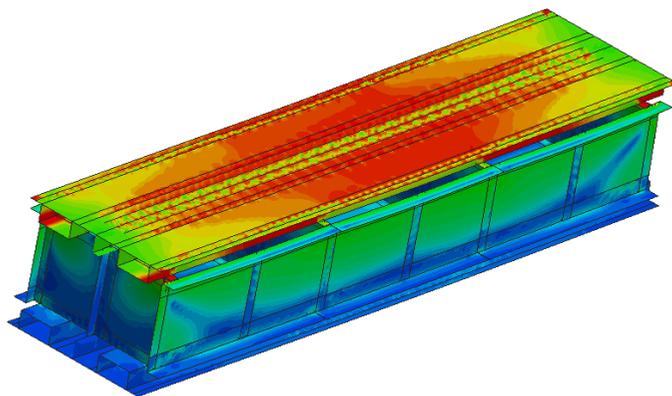


Рис. 1. Линейный расчет НДС отсека авиационной панели

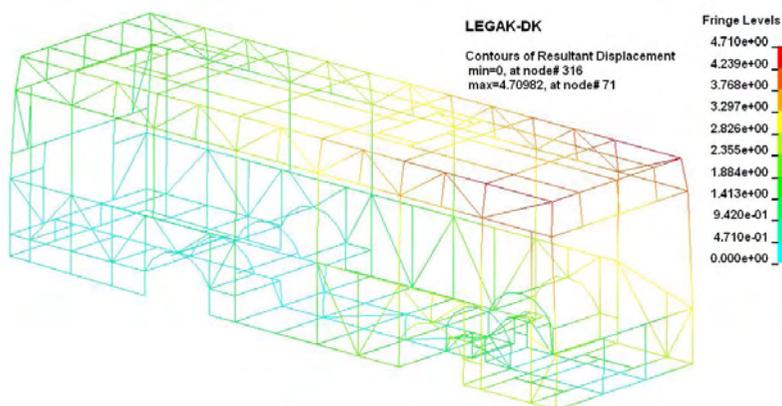


Рис. 2. Линейный расчет НДС силового каркаса автобуса

функциональных возможностей для моделирования в балочно-оболочечном приближении. Можно отметить следующие основные направления развития: моделирование балочных и оболочечных конструкций с учетом эффектов физической и геометрической нелинейностей; моделирование слоистых композиционных материалов; учет контактного взаимодействия между телами, моделируемыми в оболочечном приближении; развитие методов моделирования конструктивных соединений (болтовое, шарнирное, заклепочное соединения). Далее представлено описание особенностей реализации в ПП ЛОГОС данных функциональных возможностей.

Учет физической и геометрической нелинейностей в расчетах на оболочечных и балочных элементах

Среди результатов работ, проводимых в 2017–2018 гг. в рамках развития модуля статической прочности пакета программ ЛОГОС, необходимо выделить существенное расширение функциональных возможностей в части учета эффектов нелинейного деформирования тонкостенных и стержневых конструкций.

Для оболочечного и балочного конечных элементов реализована возможность проведения расчетов с учетом эффектов геометрической и физической нелинейностей.

Учет геометрической нелинейности выполнен на основе метода Corotational [4], использующегося для описания процесса деформирования, в котором реализуются большие повороты конструкции при малых деформациях.

Программная реализация алгоритмов расчета упругопластического деформирования базируется на теории течения [5–6] с изотропным и кинематическим видами упрочнения. При этом вычислительный алгоритм расчета параметров упругопластического деформирования в каждой точке интегрирования оболочечного элемента обеспечивает расчет компонент НДС, удовлетворяющих как соотношениям теории течения, так и условию плоского напряженного состояния.

При реализации конечно-элементных аппроксимаций оболочечного и балочного элементов для учета нелинейного характера распределения величин по толщине оболочки и профилю балки обеспечен учет расширенного числа точек интегрирования по толщине и профилю.

Модель слоистого композиционного материала

Авиационные композиты по большей части имеют слоистую структуру, а изделия являются тонкостенными конструкциями, поэтому для численного расчета поведения конструкций из слоистых тонкостенных композиционных материалов (КМ) широкое использование получили вычислительные методы теории многослойных оболочек.

В модуле решения задач статической прочности пакета ЛОГОС модель многослойного КМ основана на представлении композита как пакета слоев, уложенных под различными углами укладки (рис. 3) и использовании теории оболочек при следующих предположениях.

- Слоистый КМ рассматривается как неоднородный по материальным свойствам монолит.
- Материал каждого слоя считается однородным и ортотропным, с осями упругой симметрии, направленными вдоль и поперек волокон.
- Деформации по толщине пакета непрерывны.
- Напряжения по толщине слоя непрерывны и связаны с деформациями уравнениями обобщенного закона Гука для плосконапряженного состояния оболочек.

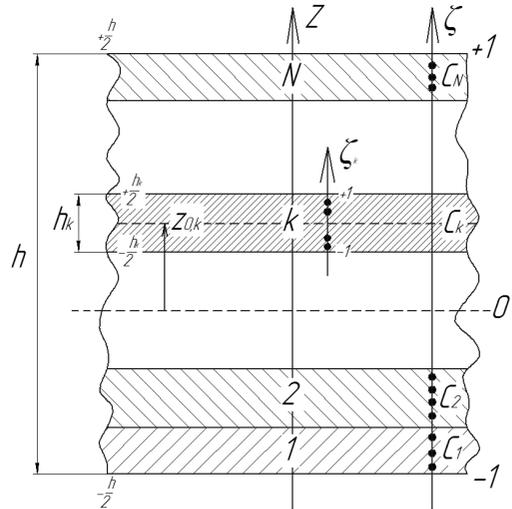


Рис. 3. Модель многослойного композитного материала в модуле решения задач статической прочности ПП ЛОГОС

В качестве модели слоя КМ используется модель ортотропного оболочечного элемента со смещением срединной плоскости. Реализованная в ПП ЛОГОС конечно-элементная аппроксимация оболочечного элемента в слое КМ построена на использовании следующих принципов.

- Использование трехмерных уравнений механики деформируемого твердого тела с использованием численного интегрирования с возможностью задания произвольного количества точек интегрирования по толщине оболочки.
- Использование изопараметрического представления конечного элемента, линейной аппроксимации геометрии оболочки, линейной аппроксимации вектора перемещений по толщине оболочки.
- Применение специальных методов учета малости напряжений (напряжения обжатия вдоль направления толщины в локальной системе координат пренебрежительно малы).
- Учет разнотолщинности оболочки в узлах конечного элемента.
- Учет смещения срединной плоскости как слоя, так и композита в целом.

- Учет модели материала слоя (изотропный, ортотропный плосконапряженный материал) с учетом материальной системы координат композита и слоя.

- Использование ковариантного метода расчета тензора деформации.

- Использование специальных методов стабилизации против заклинивания при поперечном сдвиге (метод MITC), против заклинивания при мембранной деформации (метод EAS).

- Использование итеративно-инкрементального метода пошагового нагружения для расчета нелинейных задач механики деформируемого твердого тела.

- Использование метода Update Lagrangian и Corotational для расчета геометрически нелинейных задач тонкостенных конструкций (учет больших перемещений/вращений).

Учет контактного взаимодействия между телами, моделируемыми в оболочечном приближении

На практике при решении задач статического деформирования часто необходимо учитывать контактные явления, возникающие между различными телами. При моделировании контактного взаимодействия учитываются такие основные факторы, как обеспечение непроникновения тел друг в друга, а также возможные силы трения, возникающие между ними. Ранее в ПП ЛОГОС учет контактного взаимодействия при статическом деформировании был реализован для тел, аппроксимируемых объемными конечными элементами. В связи с развитием методов моделирования в оболочечном приближении возникла необходимость реализации методов учета контактного взаимодействия между телами, представленными с использованием оболочечных элементов.

Существуют разные подходы для определения величины контактного взаимодействия между телами. Для реализации в ПП ЛОГОС был выбран метод штрафных функций (Penalty Method), как наиболее надежный и универсальный. Кроме того, существуют различные алгоритмы для определения точек приложения контактных сил. К реализации в ПП ЛОГОС взят метод сегмент-в-сегмент, в котором контактные силы рассчитываются в точках интегрирования оболочечных элементов.

На рис. 4 представлен результат решения статической задачи на учет контактного взаимодействия между двумя цилиндрами, моделируемыми в оболочечном приближении, демонстрирующий работоспособность реализации в ПП ЛОГОС.

Развитие методов моделирования конструкционных соединений при решении задач статической прочности

В машиностроении конструкции, состоящие из нескольких составных частей, соединяются специальными конструкционными соединениями. Поэтому одним из условий применимости пакета программ прочностного анализа к решению промышленных задач является наличие методов моделирования разнообразных конструкционных соединений.

Текущая версия пакета программ ЛОГОС обеспечивает следующий набор возможностей для моделирования конструкционных соединений, таких как: болтовые, заклепочные, шарнирные соединения, элементы жесткой связи RBE2 и RBE3, явно задаваемые многоточечные ограничения, и др. Методы расчета болтовых, заклепочных, шарнирных соединений добавлены к функциональным возможностям в 2016–2018 гг.

Методология расчета болтового соединения с учетом преднатяга, реализованная в пакете программ ЛОГОС, основана на работах [7–8]. Каждая зона преднатяжения определяется двумя поверхностями и определяющим узлом, в котором задается направление и величина нагрузки, с помощью которой обеспечивается затяжка данного соединения. Определяющий узел связан с узлами поверхностей посредством автоматически формируемых многоточечных ограничений MPC (multi-point constraint), обеспечивающих, с одной стороны, связность сетки двух поверхностей преднатяга, а с другой, передающих усилие преднатяга на все узлы из зоны преднатяга.

Модель заклепочного соединения, введенная в пакет программ ЛОГОС, основана на работах [9–10]. Данная модель с одной стороны, описывает основные особенности деформирования данного соединения, а с другой является менее затратной с точки зрения ресурсов, чем прямое моделирование заклепочного соединения. Тело заклепки моделируется балочными элементами с характеристиками поперечного сечения (площадь, моменты инерции), соответствующими сечению данного крепежного элемента. Со всеми деталями стягиваемого данным крепежом пакета балочные элементы соединяются элементами жесткой связи. Данные элементы жесткой связи связывают степени свободы узла на теле заклепки со степенями свободы узлов деталей по периметру отверстия заклепки, обеспечивая тем самым условия совместности деформирования соединения.

Шарнирное соединение – кинематическая пара, то есть подвижное соединение двух частей конструкции, которое обеспечивает им вращательное и/или поступательное движение относительно друг друга. Моделирование шарнирных соединений в па-

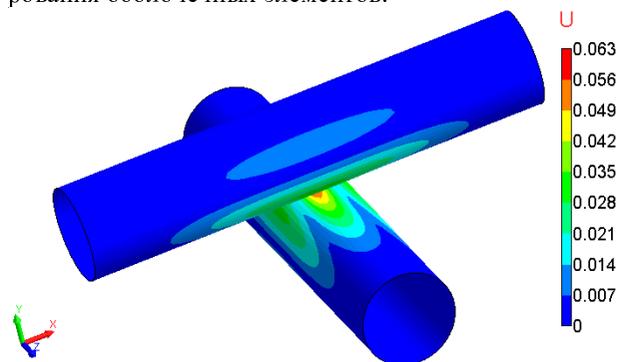


Рис. 4. Результирующее поле перемещений в задаче об учете контактного взаимодействия между цилиндрами, представленными оболочечными КЭ

кете программ ЛОГОС обеспечивается с помощью многоточечных ограничений, которые связывают между собой узел, лежащий на подвижной части конструкционного соединения с узлом, лежащим на его неподвижной части. Каждому типу шарнирного соединения соответствует индивидуальный набор уравнений связи, формирующих набор многоточечных ограничений. Поскольку в общем случае для таких многоточечных ограничений невозможно выразить одну из переменных через линейную комбинацию других переменных, учет многоточечных ограничений для шарнирных соединений в пакете программ ЛОГОС осуществляется с использованием метода множителей Лагранжа.

Результаты решения практических и методических задач по пакету программ ЛОГОС версии 2018 года

Приведенные в данном разделе примеры демонстрируют работоспособность представленных в докладе функциональных возможностей и их применимость к решению сложных практических задач.

Численное моделирование процесса статического деформирования квадратной композитной пластины под действием приложенного давления в геометрически нелинейной постановке

Решается задача статического деформирования квадратной композитной пластины под действием

приложенного давления в геометрически нелинейной постановке. Задача предназначена для демонстрации работоспособности методов и алгоритмов расчета многослойного композитного упругого материала, а также работоспособность оболочечного конечного элемента в геометрически нелинейной постановке.

Геометрические размеры: длина – 12 м, толщина оболочки: 0,096 м (вариант № 1); 0,3 м (вариант № 2).

Проведено 2 варианта расчета с использованием модели композитного материала:

1) для варианта № 1, Композит А – состоит из 4 слоев [0/90/0/90];

2) для варианта № 2, Композит Б – состоит из 6 слоев [0/90/0/90/0/90].

Физико-механические характеристики материала слоев приведены в таблице.

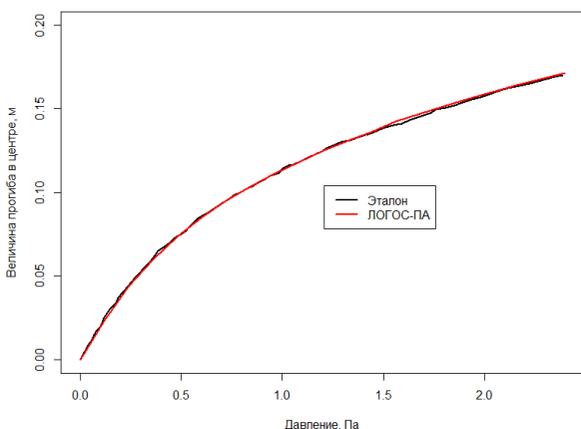
По контуру узлы пластины закреплены от перемещений по всем степеням свободы. К поверхности пластины приложено давление $P = 2,4$ Па (вариант № 1), $P = 1800$ Па (вариант № 2).

Конструкция разбивается регулярным образом по 16 элементов на сторону квадрата. Общее число конечных элементов 256.

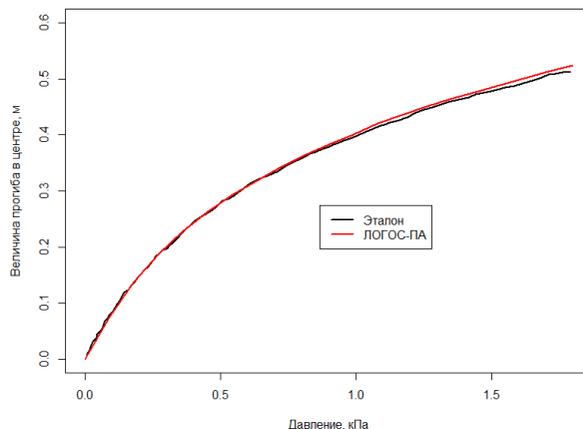
На рис. 5 приведены графики зависимости величины прогиба в центре пластины в зависимости от приложенного давления по результатам расчетов задачи по ПП ЛОГОС для Композита-А (а) или для Композита-Б (б). Также приведен эталонный график зависимости [4].

Физико-механические характеристики материала слоя

	E_1 , Па	E_2 , Па	G_{12} , Па	G_{13} , Па	G_{23} , Па	ν
вар. 1	$1,8282 \cdot 10^6$	$1,8348 \cdot 10^6$	$0,3125 \cdot 10^6$	$0,3125 \cdot 10^6$	$0,3125 \cdot 10^6$	0,2395
вар. 2	$40 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$0,6 \cdot 10^6$	$0,6 \cdot 10^6$	$0,5 \cdot 10^6$	0,25



а



б

Рис. 5. Графики зависимости величины прогиба в центре пластины от приложенного давления: а – для Композита-А, б – для Композита-Б

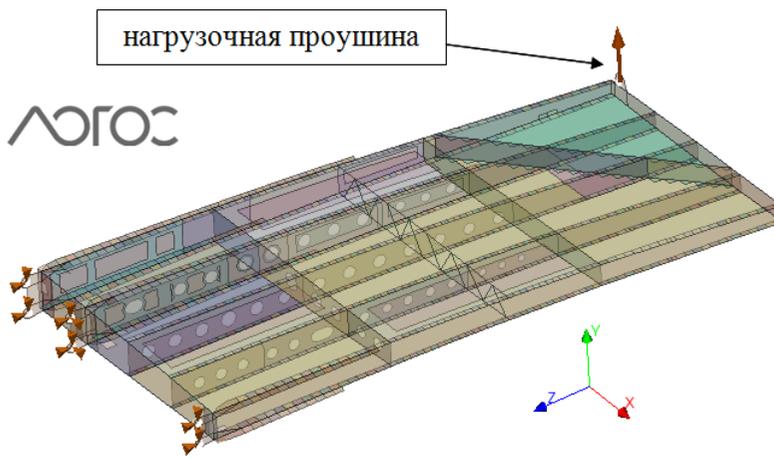


Рис. 6. Постановка задачи о деформировании панели из композитного материала

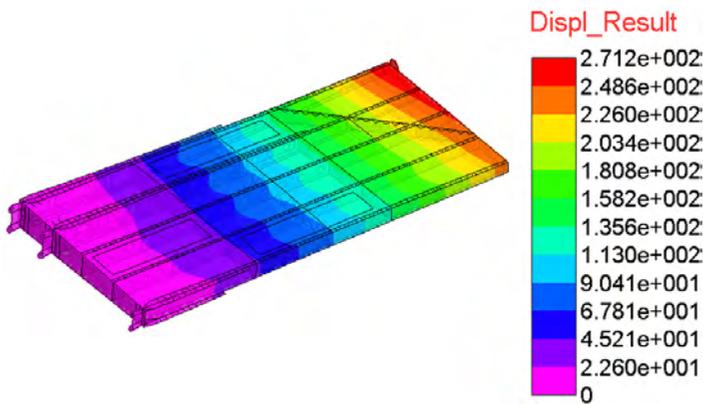


Рис. 7. Поле результирующих перемещений в задаче численного моделирования деформирования панели из композитного материала

Численное моделирование деформирования панели из композитного материала

В данной задаче проводится расчет характеристик статического деформирования типовой авиационной панели из композитного материала. Один конец панели закреплен, ко второму концу приложена сила (рис. 6).

На рис. 7 приведены результаты решения данной задачи, полученные по ЛОГОС, в виде распределения по конструкции величины результирующего перемещения.

Решение данной задачи показывает работоспособность реализованных функциональных возможностей пакета программ ЛОГОС в части анализа прочности отдельных элементов авиационных конструкций.

Расчет характеристик нелинейного деформирования пассажирского самолета под действием нагрузок, имитирующих статические испытания

Численное моделирование процесса деформирования конструкции самолета проводилось с использованием высокодетализированной конечно-

элементной модели самолета, включающей балочные элементы (силовой каркас, элементы шасси), оболочечные элементы (обшивка корпуса), элементы сплошной среды, а также спецэлементы для описания конструктивных соединений. Задача решалась в нелинейной постановке с учетом больших деформаций и перемещений.

Размерность матрицы СЛАУ составила 941 000 строк, общее время решения составило 74 минуты в многоядерном режиме на ПК.

Заданные в модели условия закрепления и нагружения соответствуют одному из видов статических испытаний, проводимых для оценки прочностных характеристик конструкции самолета.

На рис. 8 приведены результаты решения данной задачи, полученные по ЛОГОС, в виде распределения по конструкции величины результирующего перемещения.

Результаты решения данной задачи в полномасштабной постановке демонстрируют общую работоспособность новых функциональных возможностей пакета программ ЛОГОС в части решения задач статической прочности.

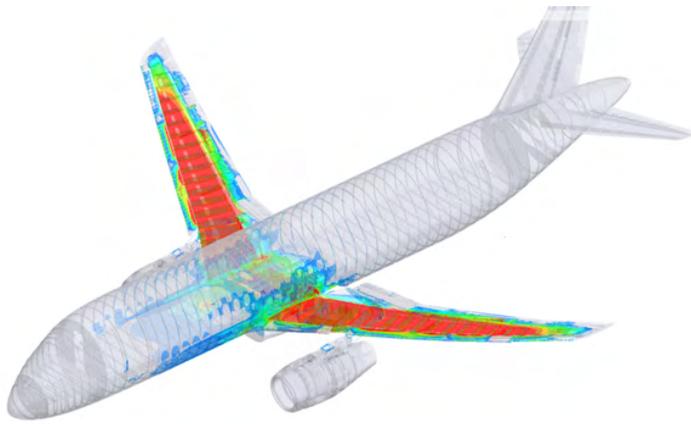


Рис. 8. Результирующее поле перемещений в задаче расчета характеристик нелинейного деформирования пассажирского самолета

Заключение

В данной работе приведено описание основных подходов и алгоритмов, используемых в пакете программ ЛОГОС для решения задач статической прочности конструкций. Отдельно выделены функциональные возможности, реализованные разработчиками в 2017–2018 гг. и направленные на расширение области применимости данного пакета программ на предприятиях высокотехнологичных отраслей промышленности. Работоспособность реализованного функционала показана на примерах решения практических задач деформирования элементов авиационных конструкций.

Литература

1. Циберев К. В., Авдеев П. А., Александрова О. Л., Артемова Е. О. и др. Обзор возможностей моделирования задач прочности с использованием пакета программ ЛОГОС // Труды XV международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» - Саров, 2014.
2. Речкин В. Н., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения квазистатических задач прочности и модального анализа // Труды XIII международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» - Саров, 2011.
3. Филимонкин Е. А., Барабанов Р. А., Дьянов Д. Ю., Спиридонов В. ., Циберев К. В., Наумов А. О., Косарим С. С., Александрова О. Л., Рябов А. А., Вяткин Ю. А., Речкин В. Н. Пакет

программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач статической прочности конструкций с учетом физической и геометрической нелинейностей // Сборник докладов XI научно-технической конференции «Молодежь в науке» / секция «Теоретическая и математическая физика». Саров, 2012 г.

4. Yang JinSong, Xia PinQi. Finite element corotational formulation for geometric nonlinear analysis of thin shells with large rotation and small strain // Science China. Technological Sciences, 2012. N. 55(11). P. 3142–3152.

5. Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. Математическая теория пластичности // М.: Физматлит, 2001.

6. Kojic M. and Bathe K.-J. Inelastic Analysis of Solids and Structures // Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.

7. Hibbitt, Karlsson and Sorenson. Computer process for prescribing an assembly load to provide pre-tensioning simulation in the design analysis of load-bearing structures // United States Patent, patent number: 5.920.491, date of patent: Jul.6, 1999.

8. Fukuoka T., Analysis of the Tightening Process of Bolted Joint With a Tensioner Using String Elements, Journal of Pressure Vessel Technology. – 1994. – Vol. 116. – P. 443–448.

9. A. Rutman, J. B. Kogan. Multi-Spring Representation of Fasteners for MSC/NASTRAN Modeling. Proceedings of The First MSC Conference for Aerospace Users, Los Angeles, CA, 1997.

10. A novel finite element for modeling a fastener in a lap joint assembly. A dissertation by Brian D. Foster, 2014.