

8. Sergienko, I.V., Iemets, O.O. and Yemets, O.O. (2013), "Optimization problems with interval uncertainty: Branch and bound method", *Kibernetika i sistemnyy analiz*, no. 5, pp. 673-683.
9. Iemets, O.O. and Yemets, O.O. (2011), *Rozvyazuvanna zadach kombinatornoyi optymizatsiyi na nechitkykh mnozhynakh* [Solving combinatorial optimization problems on fuzzy sets], PUET, Poltava, Ukraine.
10. Iemets, O.O. and Barbolina, T.M. (2014), "About optimization problems with probabilistic uncertainty", *Dopovidi Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny*, no. 11, pp. 40-45.
11. Iemets, O.O. and Barbolina, T.M. (2015), "Combinatorial Optimization Model of Packing Rectangles with Stochastic Parameters", *Kibernetika i sistemnyy analiz*, no. 4, pp. 583-593.
12. Stoyan, Yu.G. and Iemets, O.O. (1993), *Teoriya i metody evklidovoyi kombinatornoyi optymizatsiyi* [Theory and methods of euclidian combinatorial optimization], Instytut systemnykh doslidzhen osvity, Ukraine.
13. Ventsel, Ye.S. (1969), *Teoriya veroyatnosti* [Probability theory], Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, Moskow, Russia.
14. Gnedenko, B.V. (2005), *Kurs teorii veroyatnosti* [Course in probability theory], Editorial URSS, Moscow, Russia.

УДК 629.7.01 : 519.876.5 : 621.45.03

СОВРЕМЕННЫЕ САПР В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Борисовская Ю. А., аспирант, Гоменюк С. И., д. т. н., профессор,
Аль-Омари М. А. В., аспирант

*Запорожский национальный университет,
ул. Жуковского, 66, г. Запорожье, 69600, Украина*

julia.borisovskaya@gmail.com, serega@znu.edu.ua

В работе представлен обзор основных коммерческих и свободно распространяемых современных САПР-систем. Рассмотрены их основные возможности и методы, используемые для проведения анализа и расчета конструкций. Проведен анализ программных систем для автоматизированного анализа с точки зрения использования их при проектировании комплексов в аэрокосмической отрасли.

Ключевые слова: метод конечных элементов, САПР, моделирование, аэрокосмическая отрасль, обзор.

СУЧАСНІ САПР В АЕРОКОСМІЧНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Борисовська Ю. О., аспірант, Гоменюк С. І., д. т. н., професор
Аль-Омарі М. А. В., аспірант

*Запорізький національний університет,
вул.Жуковського, 66, м. Запоріжжя, 69600, Україна*

julia.borisovskaya@gmail.com

У роботі представлений огляд основних комерційних та вільно розповсюджуваних сучасних САПР-систем. Розглянуті їх основні можливості та методи, що використовуються для проведення аналізу та розрахунку конструкцій. Проведено аналіз програмних систем для автоматизованого аналізу з точки зору їх використання при проектуванні комплексів в аерокосмічній галузі.

Ключові слова: метод скінчених елементів, САПР, моделювання, аерокосмічна галузь, огляд.

MODERN CAD SYSTEMS IN THE AEROSPACE INDUSTRY

Borysovska J., postgraduate, Gomenyuk S., D.Sc. in Engineering, professor
Al-Omari M. A. W., postgraduate

*Zaporizhzhya National University,
Zhukovsky str., 66, Zaporizhzhya, 69600, Ukraine*

julia.borisovskaya@gmail.com

Nowadays, the use of mathematical models is an important part of the design of facilities and structures of varying complexity. The use of computer-aided design systems (CAD) is a modern design tool. Today there are many reviews of modern CAD-systems. The authors present the comparisons of the different parameters and criteria in order to find the optimal system for given design conditions.

The purpose of this article is a brief review of existing CAD-systems and their methods for creating models of complex geometric objects. The review is conducted from perspective of the usage of software systems in the aerospace industry.

The first part of the article is devoted to the most popular commercial systems (proprietary systems) such as ANSYS, LS-DYNA, NASTRAN (MSC.Nastran), Patran (MSC.Patran), NX AdvancedSimulation, CATIA, ABAQUS, ESAComp, NEiNastran, NXNastran, Femap LIRA, MIRELA, FORTU-FEM. These systems solve a lot of problems in the modeling of physical processes, for example, the strength analysis of construction and stress-strain state, liquids and gases flowing, etc. All of these systems use finite-element methods for solving problems. The most widespread CAE-systems have the ability to import / export data from other systems.

The most common of the considered CAD-systems is a software package CATIA. This CAD/CAM/CAE system that includes all stages of technical preparation of production. That is why it takes about 70% of the world market of computer-aided design and technological preparation of production in the aerospace industry.

For each of the described programs, a specific range of applications can be selected. For example, for analysis the consequences of accidents and catastrophes widely used software package LS-DYNA. ESAComp program is used to work with layered composites. MSC.Patran is integrating environment and graphical user interface for many of finite-element analysis, and also supports access to many, not even a standard, geometric data formats. A distinctive feature of MSC.Nastran program is superelement technology, which allows the user to use prearranged substructures for objects' modeling. Femap is a leading programming environment for solving problems of engineering analysis, based on solver NX Nastran (Femap with NX Nastran). Femap is independent from used CAD-systems and allows to import geometry from most CAD systems such as CATIA, Pro / Engineer, NX, Solid Edge, SolidWorks and AutoCAD. Also the system ABAQUS is worth mentioning, It is cross-platformed, i.e. it runs on all major operating systems. Domestic software systems (Lear, Mirela +, FORTU-FEM) allow to solve a wide class of problems of mechanical engineering, to carry out finite element analysis, and visualize the results.

All CAD-systems shown in the first part of this article give the opportunity to simulate different types of materials (composites, polymers and others). They have graphical tools for analysis of the results and creating a computational model. Moreover, some CAE systems include built-in-language and propose an opportunity for developing user's modules.

The second part of the article is devoted to computer-aided design and open source systems, such as SALOME, Code_Aster, Elmer, FreeFem ++, CAELinux, CalculiX. This kind of software is generally used for educational purposes. These programs use the finite element method as a basic tool for numerical calculations. The software may be integrated with commercial systems. Their main advantage is that these programs have an open source which allows to develop them and realize user's methods.

Key words: finite element method, CAD, modeling, aerospace, review.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование прочности сложных объектов и конструкций является актуальной проблемой современной техники. Существующие исследования сосредоточены как на аналитических методах, так и на численных и гибридных, позволяющих обеспечить необходимый уровень надежности различных систем. Развитие аэрокосмической техники, рост конструктивной сложности летательных аппаратов требуют высокой надежности и долговечности изделий, достичь которых возможно за счет внедрения новых технических решений [1]. Именно поэтому проектирование и создание современных аэрокосмических комплексов предъявляют повышенные требования к расчету их конструкций с точки зрения прочности и надежности.

В такой наукоемкой области, как авиационная и космическая техника, проектирование и производство, а особенно экспериментальные исследования прочности и надежности реальных инженерных конструкций, связаны с большими расходами. В таких условиях процесс оптимизации проектирования возможен при использовании новейших средств

инженерного анализа, основанных на разработке компьютерных моделей проектируемой конструкции. Современным инструментом проектирования комплексов различной сложности для аэрокосмической промышленности является использование систем автоматизированного проектирования (САПР) [2]. В настоящее время уровень компьютерного моделирования позволяет создать, исследовать, анализировать и оптимизировать конструкцию целиком и каждый ее элемент в отдельности при помощи виртуальной среды еще до изготовления дорогостоящей конструкции. Следует отметить, что проектирование сложных конструкций, как правило, требует совместного использования широкого набора различных программных систем инженерного анализа, ответственных за тот или иной этап расчетного сопровождения проекта [3].

В последнее время уровень развития вычислительной техники позволяет выполнять решение задач на прочность конструкций любой формы с применением компьютерного моделирования, которое опирается на аппарат численных методов. Наиболее широкое распространение для решения данного класса задач получил метод конечных элементов (МКЭ), применение которого, с заданными критериями, позволяет эффективно делать расчеты конструкций и решать задачи на прочность и устойчивость, как самих конструкций, так и их отдельных узлов и элементов.

Цель статьи – краткий обзор существующих САПР, используемых ими методов для построения сложных геометрических объектов и расчета прочности сложных конструкций, а также анализ возможности их использования в аэрокосмической отрасли.

ОБЗОР ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Существует большое количество различных программных пакетов, которые предназначены для проектирования и разработки объектов производства, для оформления конструкторской и технологической документации. Программные системы, которые применяются для компьютерного моделирования конструкций можно условно разделить на три класса [4]:

1. Программные системы геометрического моделирования и автоматизации конструкторских работ CAD (Computer-Aided Design) – предназначены для решения конструкторских задач и оформления конструкторской документации, моделирования трёхмерной объёмной конструкции, оформления чертежей и текстовой конструкторской документации. Наиболее популярными в мире системами геометрического моделирования являются AutoCAD, CreoParametric (ранее Pro/ENGINEER), SolidWorks и другие. Геометрические модели, разработанные в этих системах, становятся основой конечно-элементной модели конструкции.

2. Программные системы CAE (Computer-Aided Engineering) – системы инженерного моделирования, анализа и оптимизации в задачах автоматизированного проектирования конструкций. Это системы, реализующие метод конечных элементов. Наиболее популярными в мире системами CAE являются программные продукты MSC.Software Corporation – Nastran, Marc, Adams, Dytran, FlightLoads and Dynamics, а также программные продукты других разработчиков, например, ANSYS или Siemens PLM Software.

3. САМ-системы (Computer-aided manufacturing) или компьютерная поддержка изготовления – предназначены для проектирования обработки изделий на станках с числовым программным управлением и выдачи программ для этих станков.

Для более эффективного процесса моделирования современные системы автоматизации инженерных расчётов (CAE) применяются совместно с CAD-системами, а точнее зачастую интегрируются в них, в этом случае получают гибридные CAD/CAE-системы.

По мере того, как анализ сложных конструкций с использованием конечно-элементных моделей становится обычной процедурой в практике проектирования, требования к аппарату анализа возрастают в различных контекстах. Как известно, для программ, реализующих

МКЭ, четыре части являются общими [5]. Это: ввод данных о модели, библиотека конечных элементов, решение алгебраических уравнений и вывод расчетных данных. Безусловно, принципиальное значение имеет библиотека конечных элементов как фактор, оказывающий влияние не только на круг охватываемых программой задач, но и на вычислительные моменты, – высокоточные конечные элементы позволяют снизить размерность используемых моделей. В то же время, этап решения уравнений является вторым и зачастую главным аспектом, влияющим на вычислительную эффективность системы в целом.

Современный рынок программных комплексов промышленного назначения, в которых реализован метод конечных элементов, предлагает большое разнообразие программ для расчета конструкций. Инструменты, предлагаемые разработчиками, существенно различаются спецификой их применения в предметных областях, степенью автоматизации расчетных процедур, используемым математическим аппаратом, быстродействием, пользовательским интерфейсом, языками программирования и др. Наибольшее распространение из них получили: ABAQUS, ADINA, ASKA/DYNAN, ANSYS, MARC, NASTRAN, PATRAN, EUFEMI, CATIA, COSMOS, HERCULE, MODULEF, SAP-7, LS-DYNA, ЛИРА, ПРОЧНОСТЬ, КОДЕТОМ, МИРЕЛА+, FORTU и ряд других [6-9].

Создание высококачественной продукции для авиационной, космической и других наукоемких отраслей требует проведения большого объема проектных и расчетных работ. Они, в свою очередь, основываются на математическом моделировании поведения материалов и конструкций, процессов изготовления оснастки и самих изделий, механической обработки и контроля качества поверхностей полученных деталей. В настоящее время существует достаточно большой выбор программных комплексов, реализующих качественную проектную работу. Приведем основные известные коммерческие программы и программные пакеты, используемые для решения различных инженерных задач.

Программный комплекс **ABAQUS** является универсальной системой в области конечно-элементных расчетов на прочность, с его помощью можно получать точные и достоверные решения для самых сложных линейных и нелинейных инженерных проблем. Семейство продуктов Abaqus разрабатывается и поддерживается компанией Abaqus, Inc., которая с 2005 г. входит в компанию Dassault Systemes. Это универсальная система КЭ анализа с встроенным пре-/постпроцессором ABAQUS/CAE, которая может быть интегрирована со многими САД-системами и другими программными комплексами. ABAQUS обеспечивает расчёты: напряженно-деформированного состояния, запасов прочности, собственных частот и форм колебаний, анализ устойчивости, исследование установившихся и неустойчивых динамических процессов, решение задач теплопередачи, акустических явлений, нелинейных статических и нелинейных переходных процессов, анализ сложного контактного взаимодействия, расчёт критических частот и вибраций роторных машин, исследование аэроупругости на дозвуковых и сверхзвуковых скоростях. Недавно компания разработчик анонсировала создание совершенно новой универсальной среды моделирования SIMULIA, которая будет обобщать не только все решения компаний Dassault Systemes и Abaqus, Inc. в области прочностных расчетов, но и объединять лучшие решения третьих фирм для создания мощного инструментария для реалистичного проектирования и междисциплинарного анализа конструкции. Abaqus работает на всех основных платформах/операционных системах и поддерживает встроенный язык программирования PYTHON [6, 8, 10].

Широкое применение у специалистов в сфере автоматизации инженерных расчетов получил программный комплекс **ANSYS**. Данная программа является продуктом компании ANSYS, Inc., это универсальная система КЭ анализа с встроенным пре-/постпроцессором, которая представляет собой многоцелевой пакет для решения сложных проблем физики и механики, предназначенный для расчета задач механики деформируемого твердого тела (МДТТ), температурных задач, задач механики жидкости и газа, а также расчета электромагнитных полей. Кроме того, данный комплекс обладает возможностью расчета связанных задач, в которых результаты расчета для одной среды (например, поля температур) могут быть

использованы в качестве исходных нагрузок для расчета других сред (например, для вычисления распределения напряжений в нагретой детали). Программа располагает широким перечнем расчетных средств, которые могут учесть разнообразные конструктивные нелинейности; дают возможность решить самый общий случай контактной задачи для поверхностей; допускают наличие больших (конечных) деформаций и углов поворота; позволяют выполнить интерактивную оптимизацию и анализ влияния электромагнитных полей, получить решение задач гидро/аэродинамики и многое другое – вместе с параметрическим моделированием, адаптивным перестроением сетки и обширными возможностями создания макрокоманд с помощью языка параметрического программирования (APDL). Многоцелевые функции комплекса ANSYS обеспечиваются наличием в нем многочисленного семейства отдельных специализированных программ, имеющих много общих функций, однако математическое обеспечение которых рассчитано на решение отдельных классов задач. Следует отметить, что большая часть работ по применению ANSYS в аэрокосмической отрасли посвящено вычислительной гидродинамике и CFD-моделям. Для расчета конструкционных задач с тепловым анализом в аэрокосмической отрасли используются, как правило, программные комплексы ANSYS Multiphysics или ANSYS Mechanical [6, 11, 12].

Программный комплекс **LS-DYNA** используется для анализа высоконелинейных динамических процессов и объединяет возможности пре-/постпроцессоров ANSYS APDL и решателя LS-DYNA. Программа интегрирована в среду ANSYS и объединяет в одной программной оболочке традиционные методы решения с обращением матриц, специализированные контактные алгоритмы, множество уравнений состояния и метод интегрирования, что позволяет численно моделировать процессы формования материалов. Технология ANSYS LS-DYNA – незаменимый инструмент для анализа технологических процессов, анализа аварийных столкновений и ударов при конечных деформациях, при нелинейном поведении материала и контактном взаимодействии большого числа тел в автомобильной, авиационной, трубопроводной промышленности. На сетках сравнительно малой размерности возможно получение практически значимых и физически адекватных результатов для анализа последствий аварий и катастроф, а также предотвращения их возникновения. С 2006 г. решатель LS-DYNA также вошел в состав пакета программ MD NASTRAN [12, 13].

Одной из наиболее популярных САПР верхнего уровня, которые используются специалистами в сфере авиа- и ракетостроения, является комплекс **CATIA** (Dassault Systemes). Это комплексная система автоматизированного проектирования (CAD), технологической подготовки производства (CAM) и инженерного анализа (CAE), включающая в себя передовой инструментарий трёхмерного моделирования, подсистемы программной имитации сложных технологических процессов, развитые средства анализа и единую базу данных текстовой и графической информации. Система позволяет эффективно решать все задачи технической подготовки производства – от внешнего (концептуального) проектирования до выпуска чертежей, спецификаций, монтажных схем и управляющих программ для станков с ЧПУ. В настоящее время CATIA занимает около 70% мирового рынка систем автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства в авиакосмической промышленности и более 45% – в автомобилестроении [14].

Система **ESAComp** изначально была создана для авиакосмической отрасли, однако в дальнейшем программа развивалась как универсальный инструмент для профессионалов, имеющих дело со слоистыми композитами, как в промышленности, так и в научно-исследовательской деятельности. Данный программный продукт используется для конечно-элементных расчетов тонкостенных многослойных пластин и оболочек. Из преимуществ этой системы следует отметить наличие многоуровневой базы данных готовых элементов конструкций, базы данных свойств материалов, различные виды анализа (прочностной,

частотный, анализ потери устойчивости) и графическое отображение результатов, автоматическое построение конечно-элементной сетки, наличие интерфейса экспорта/импорта в другие программные системы конечно-элементного анализа [15].

Главный продукт компании MSC.Software Corporation – **MSC.Nastran** вот уже более 40 лет доказывает свою точность и эффективность. Это универсальная система КЭ анализа с пре-/постпроцессором MSC.Patran. Данная система обеспечивает расчёты: напряженно-деформированного состояния, запасов прочности, собственных частот и форм колебаний, анализ устойчивости, исследование установившихся и неустойчивых динамических процессов, решение задач теплопередачи, акустических явлений, нелинейных статических и нелинейных переходных процессов, анализ сложного контактного взаимодействия, расчёт критических частот и вибраций роторных машин, исследование аэроупругости на дозвуковых и сверхзвуковых скоростях. Предусмотрена возможность моделирования практически всех типов материалов, включая композитные и гиперупругие. Расширенные функции включают технологию суперэлементов (подконструкций), модальный синтез и макроязык DMAP для создания пользовательских приложений. MSC.Nastran может использоваться и для оптимизации проектов [12, 16].

Система инженерных расчетов **MSC.Patran** является интегрирующей средой и графической оболочкой для MD Nastran, MSC Nastran, Marc, Dytran, Sinda и других конечно-элементных систем анализа. Patran обеспечивает импорт геометрических моделей из CAD-систем, создание расчетных моделей, запуска их на расчет, графическое отображение и обработку полученных результатов. Помимо доступа к стандартным геометрическим форматам, таким, как Parasolid, ACIS, STEP, IGES и др., предоставляет прямой доступ к наиболее популярным программным пакетам автоматизированного проектирования верхнего уровня: CATIA v4 и v5, NX, CreoParametric (ранее Pro/ENGINEER) [12, 17].

С 2014 г. компания NEi Software, продуктом которой является решатель **NEiNastran**, стала частью Autodesk. Данный продукт является универсальной интегрированной системой конечно-элементного анализа со встроенным графическим интерфейсом пользователя и редактором моделей. NEi Nastran, как решатель, является одной из основных программ в мире CAE. С его помощью можно решать огромные матричные уравнения, что в свою очередь является показателем успешности процесса компьютерного моделирования. Этот продукт позволяет находить решения линейных и нелинейных задач механики деформируемого твёрдого тела; задач механики конструкций, машин, сооружений, установок и приборов, включая задачи механики контактного взаимодействия; задач динамики и прочности, механики композитных структур, теплообмена и акустики, механики жидкости и газа для сложных реальных конструкций и процессов [4, 18].

Инструментом для проведения компьютерного инженерного анализа проектируемых изделий методом конечных элементов от компании Siemens PLM Software является программный комплекс **NXNastran**. Он предназначен для решения статических и динамических линейных и нелинейных задач инженерного анализа; обеспечивает выполнение инженерных расчётов, включая расчёт напряженно-деформированного состояния, собственных частот и форм колебаний, анализ устойчивости, решение задач теплопередачи, исследование установившихся и неустойчивых процессов, нелинейных статических процессов, нелинейных динамических переходных процессов, анализ частотных характеристик, отклика на динамические и случайные воздействия. Система NX Nastran получила широкое распространение в аэрокосмической отрасли, она позволяет проводить анализ напряжений, вибраций, долговечности, передачи тепла, шума/акустики и аэроупругости. Система обеспечивает высокую степень интеграции с большим числом CAE приложений [12, 19].

Независимый от САПР пре-/постпроцессор **Femap** используется для проведения инженерного анализа методом конечных элементов и является связующим звеном между

пользователем и решателем – ядром, осуществляющим вычисления в задачах инженерного анализа. Система Femap на базе решателя NX Nastran позволяет: проводить анализ динамики и прочности конструкций, машин и сооружений, получать решение нестационарных нелинейных пространственных задач, задач механики композитов и композитных структур, строительной и технологической механики, проводить анализ теплопереноса, получать решение задач механики жидкости и газа, связанных многодисциплинарных задач. Используется для моделирования сложных конструкций, систем и процессов, таких, как спутники, самолёты, электронная аппаратура военного назначения, тяжёлое строительное оборудование, подъёмные краны, морской транспорт и технологическое оборудование [19].

Программный комплекс **Ли́ра** украинско-российских разработчиков является современным инструментом для численного исследования прочности и устойчивости конструкций и их автоматизированного конструирования. Одно из наиболее важных свойств этого пакета заключается в возможности расчета арматуры для железобетонных элементов (как плоских пластин, так и стержней) с учетом всевозможных загрузок и комбинаций усилий и различных воздействий [20].

Украинский программный комплекс **МИРЕЛІА+**, разработанный под руководством профессора В.В. Киричевского, является развитием системы КОДЕТОМ и позволяет автоматизировать проектирование сложных конструкций из эластомерных материалов и анализировать напряженно-деформированное состояние. Решение задач проводится методом конечных элементов [21].

Система **FORTU-FEM** является программным комплексом, который разработан для автоматизации анализа сложных механических процессов на базе МКЭ и позволяет решать широкий класс задач машиностроения. Программа позволяет генерировать в автоматическом режиме дискретные модели сложных трехмерных тел, проводить конечно-элементный анализ и визуализировать результаты. Данный программный комплекс имеет встроенный объектно-ориентированный язык программирования FORTU-3, который является методом описания общей постановки задачи и метода ее расчета. В процессе расчета пользователь имеет возможность выбирать тип конечного элемента, вид функционала, который минимизируется. В состав FORTU-FEM входят две подсистемы: подсистема дискретизации произвольной геометрической области на конечные элементы и подсистема анализа, позволяющая эффективно исследовать полученные численные результаты [22].

Одним из наиболее популярных программных комплексов, предлагаемых на рынке проектирования авиаиндустрии, является **NX Advanced Simulation** (компания Siemens PLM Software) – единая среда инженерного анализа, объединяющая в себе широкий набор инструментов для постановки и анализа практически всех задач моделирования механического поведения конструкций, гидрогазодинамики и теплопереноса в авиационной индустрии [6, 8]. Эти инструменты позволяют решать сложнейшие инженерные задачи в единой инженерной среде с минимальными временными затратами. Набор решений для авиационной промышленности включает следующие модули: *NX Nastran Basic* (входит в NX Advanced Simulation), *NX Nastran Advanced Non-Linear*, *NX Nastran Dynamic Response*, *NX Response Simulation*, *NX Nastran Rotor Dynamics*, *NX Nastran Superelements*, *NX Nastran Aeroelasticity*, *NX Laminate Composites*, *NX Thermal/NX Flow*, *NX Space System Thermal*, *NX Electronic System Cooling*. Следует отметить, что использование расчетных модулей NX Advanced Simulation и NX Flow совместно с NX Motion, интегрированных в единую платформу NX, позволяет специалисту определять напряженно-деформированное состояние исследуемого механизма в любом интересующем положении с учетом аэродинамических характеристик без необходимости перестройки КЭ модели и переопределения граничных условий. Возможности NX Advanced Simulation позволяют просматривать результаты динамического анализа, как в графическом виде, так и в виде распределений полей различных величин, что помогает определять работоспособность и пригодность спроектированных изделий, подверженных динамическим воздействиям. Анализ полученной

информации может использоваться для доработки или разработки нового изделия с целью обеспечения качества конструкции. Библиотека конечных элементов достаточно обширна, помимо стандартных типов элементов, используемых в решателе NX Nastran, существуют звукопоглощающие, демпфирующие и нелинейные упругие элементы [23].

Недостатком любых коммерческих пакетов является закрытый код, что делает недоступной модификацию даже отдельных модулей. Поэтому отдельного внимания заслуживают так называемые свободные пакеты конечно-элементного анализа, особенно программы, имеющие открытый код. Такие программные комплексы, как **Elmer**, **Code_Aster**, **Salome** и др. становятся конкурентами коммерческим САПР, поскольку дают возможность пользователям реализовывать свои алгоритмы анализа.

Программный комплекс **Elmer** позволяет строить одно-, двух- и трехмерные физические модели для решения задач гидродинамики, строительной механики, электродинамики, теплопереноса, акустики и т. д. Состоит из нескольких модулей: физические модели, граничные и начальные условия задаются в модуле ElmerGUI; численное решение задачи выполняется в ElmerSolver, а результаты обрабатываются в Elmerpost. Задачи описываются в виде легко читаемых текстовых файлов, есть графический интерфейс, позволяющий включить функции распараллеливания по MPI [24].

Среда **FreeFEM++** предназначена для численного решения уравнений в частных производных с помощью МКЭ. Она поддерживает решение линейных и нелинейных задач в двух- и трехмерных областях, имеет свой язык программирования транслируемый в C++, типизированный C-подобный, со встроенными типами триангуляций и пространств конечных элементов, код получается понятен, краток и приближен к математической записи задачи в слабой форме – но поддерживаются только треугольные элементы (включая DG- и мини-элементы), хорошая документация, много примеров использования на разных задачах, кроссплатформенный инструмент [25].

Возможности программного комплекса **Code_Aster** включают расчеты сложных механических моделей для одно-, двух- и трехмерных задач механики сплошных сред, термо- и гидродинамики, акустики, магнетизма и других, заметна ориентация проекта на инженерные приложения, поддерживается язык программирования Python, документация преимущественно на французском языке. Некоторые специалисты считают, что по своим возможностям данный программный комплекс является прямым конкурентом для ANSYS, NASTRAN, ABAQUS [26].

Платформа **Salome** является бесплатным программным обеспечением, которое предоставляет платформу для пре-/постпроцессорной обработки числового моделирования. Особенностью данной системы является отсутствие решателя (предполагается, что пользователь добавит нужный ему решатель, например Code_Aster). С помощью программы возможно трёхмерное моделирование (поэтапное конструирование, импортирование, исправление; визуализация; управление вычислительными схемами; постобработка). Платформа имеет внутренний язык Python, а также предоставляет возможность написания сценариев и модулей на C++ [26-29].

Дистрибутив от Linux с открытым исходным кодом **CAELinux** широко используется для инженерного расчетного анализа и проектирования [30]. Дистрибутив включает большое количество приложений для выполнения различных проектных, расчетных задач и моделирования. **CalculiX** входит в состав CAELinux в качестве дистрибутива. CalculiX – открытый, свободный программный пакет, предназначенный для решения линейных и нелинейных трёхмерных задач механики твёрдого деформируемого тела с помощью метода конечных элементов. Изначально создавался для Linux, в настоящее время существуют сборки для Windows и MacOS [31].

ВЫВОДЫ

Авиакосмическая техника представляет собой сложную техническую систему, состоящую из элементов, объединенных связями и оказывающих друг на друга определенное влияние. Система выступает как единое целое, но каждая ее часть имеет свое функциональное назначение. На сегодняшний день проектирование всех его компонентов осуществляется автоматизировано, то есть все проектные решения или их часть получают с помощью САПР. Ядром используемых в авиастроении САПР является система геометрического моделирования. Следует отметить, что большинство существующих и рассмотренных программных комплексов компьютерного инжиниринга позволяют как можно более полно охватить весь процесс проектирования авиационной и космической техники. В то же время, каждая из программ обладает некоторыми ярко выраженными преимуществами. Например, в ANSYS, LS-DYNA, MSC.Patran, MSC.Nastran, ABAQUS это удобный интерфейс пользователя (поставляется компанией MSC), более широкие возможности препроцессора. Систему ABAQUS можно выделить по скорости выполнения численного нелинейного анализа, а также по широкому выбору нелинейных моделей материалов, в частности, полезных при моделировании нелинейного напряженно деформированного состояния. Основное преимущество систем с открытым кодом, таких, как Salome, это создание среды, в которой пользователь сможет выполнять обработку данных в привычной оболочке, вне зависимости от используемого решателя. В таких программах существует возможность подключить к оболочке любые решатели, например, ANSYS и других коммерческих пакетов с помощью написания специальных модулей или управляющих сценариев.

Следует отметить, что большинство предложенных для обзора систем являются кроссплатформенными, имеют хорошо развитый графический интерфейс с поддержкой необходимых форматов данных для обмена между CAD/CAE-программными пакетами, высокую надежность конечно-элементных расчетов и обеспечивают требуемую точность при детальном расчете полей напряжений и деформаций. При этом системы открыты для возможности интеграции с другими программами (например, комплекс ESAComp отлично взаимодействует с ANSYS, т.е. данные о материалах могут экспортироваться в ANSYS для композитных твердотельных элементов и оболочек, затем результаты конечно-элементного анализа в ANSYS могут быть переданы в ESAComp для постпроцессинга). Кроме того, рассмотренные программные комплексы обеспечивают поддержку средств пользовательского программирования посредством встроенных средств автоматизации вычислительных процессов (язык Python для ABAQUS, Salome; язык ADPL для ANSYS; язык PCL для Patran).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубровский С. С. Влияние структурно-технологических факторов на прочностные характеристики деталей [Электронный ресурс] / С. С. Дубровский, А. Ю. Кривенко, Н. А. Ковешников // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 5(102). – Режим доступа : <http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/AKTT/2013/AKTT513/Dubrovsk.pdf>.
2. Горбунов А. А. Использование технологий САПР при проектировании сложных технических авиационных изделий / А. А. Горбунов, А. Д. Припадчев // Высокие технологии, экономика, промышленность : сборник статей тринадцатой международной научно-практической конференции. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – Т. 1. – С. 50-52.
3. Пересыпкин К. В. Электронный курс лекций «Компьютерный инженерный анализ» [Электронный ресурс] / К. В. Пересыпкин, В. П. Пересыпкин, Е. А. Иванова. – Самара : Изд-во СГАУ, Б. г. – 94 с. – Режим доступа : http://www.ssau.ru/files/education/uch_posob/Elektronnyy%20kurs.%20Компьютерный-Пересыпкин%20KB.pdf.
4. Васильев В. А. О классификации компьютерных программ [Электронный ресурс] / В. А. Васильев, М. А. Калмыкова // Современные научные исследования и инновации : интернет-журн. – 2013. – Вып. 2. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2013/02/20478>.

5. Рычков С. П. Алгоритмы метода конечных элементов / С. П. Рычков. – СПб : BHV, 2006. – 800 с.
6. Павлов С. CAE-технологии в 2013 году : обзор достижений и анализ рынка [Электронный ресурс] / С. Павлов // CAD/CAM/CAE Observer. – 2014. – Вып. 4(88). – Режим доступа : <http://www.cadcamcae.lv/N88/08-18.pdf>.
7. Киричевский В. В. Развитие метода конечных элементов и его применение в САПР / В. В. Киричевский, С. И. Гоменюк, С. Н. Гребенюк, Р. В. Киричевский // Вісник Запорізького національного університету : Збірник наукових статей. Фізико-математичні науки. – 2006. – Вып. 1. – С. 38-56.
8. Синеокий Т. В. Обзор CAD/CAM/CAE-систем [Электронный ресурс] / Т. В. Синеокий. – Режим доступа : <http://www.cad.dp.ua/obzors/obzor-cad.php>.
9. Селяков М. Ю. Отечественные и зарубежные CAD/CAM системы / М. Ю. Селяков // Успехи современного естествознания. – 2011. – Вып. 7. – С. 193-197.
10. Золочевский А. А. Введение в ABAQUS : метод. пособ. / А. А. Золочевский, А. А. Беккер. – Х. : Бизнес Инвестор Групп, 2011. – 47 с.
11. Басов К. А. ANSYS справочник пользователя / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
12. Чумаченко Е. Н. Математическое моделирование в нелинейной механике (обзор программных комплексов для решения задач моделирования сложных систем) / Е. Н. Чумаченко, Т. В. Полякова, С. А. Аксенов [и др.]. – М. : ИКИ РАН, 2009. – 42 с.
13. Муйземнек А. Ю. Пользователям программы LS-DYNA. Новая книга по LS-DYNA / А. Ю. Муйземнек, А. А. Богач. – Пенза : Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. – 106 с.
14. Басов К. А. CATIA V5 Геометрическое моделирование / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 269 с.
15. ESAComp [Electronic resource]. – Mode of access : <http://fea.ru/article/innovations-esacomp>.
16. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows / Д. Г. Шимкович. – М. : ДМК Пресс, 2001. – 448 с.
17. Гуменюк А. Patran-Sinda-Msc Thermica – специализированный комплекс для орбитального теплового анализа конструкции космического аппарата / А. Гуменюк // CADmaster. – 2014. – № 2(75). – С. 50-58.
18. Васильев В. А. Анализ и выбор программных продуктов для решения инженерных задач приборостроения [Электронный ресурс] / В. А. Васильев, М. А. Калмыкова // Современная техника и технологии. – 2013. – Вып. № 3. – Режим доступа : <http://technology.snauka.ru/2013/03/1702>.
19. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran / С. П. Рычков. – М. : ДМК Пресс, 2013. – 784 с.
20. Стрелец-Стрелецкий Е. Б. ЛИРА 9.4. Руководство пользователя. ОСНОВЫ. Учебное пособие / Е. Б. Стрелец-Стрелецкий, В. Е. Боговис, Ю. В. Гензерский [и др.]. – К. : «ФАКТ», 2008. – 164 с.
21. Киричевский В. В. Система «МИРЕЛА» для исследования прочности, долговечности и разрушения конструкций из эластомерных композитных материалов в условиях нелинейного деформирования на основе метода конечных элементов / В. В. Киричевский, Б. М. Дохняк, Ю. Г. Козуб [и др.] // Тр. междунар. конф. «Прогрессивная техника и технология машиностроения и сварочного производства». – К. : КПИ, 1998. – Т. 3. – С. 136-139.
22. Гоменюк С. І. Об'єктно-орієнтовані моделі і методи аналізу механічних процесів у системі автоматизації проектування : Автореф. дис... д-ра техн. наук : 05.13.12 / С. І. Гоменюк ; Харк. нац. ун-т радіоелектрон. – Х., 2004. – 34 с.
23. Гончаров П. С. NX Advanced Simulation. Практическое пособие / П. С. Гончаров, И. А. Артамонов, Т. Ф. Халитов [и др.]. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 112 с.

24. Elmer [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.csc.fi/english/pages/elmer>.
25. Hecht F. FreeFem++ [Electronic resource] / F. Hecht. – Paris. – Mode of access : <http://www.freefem.org/ff++/ftp/freefem++doc.pdf>.
26. Dharmit Thakore. Finite Element Analysis with Open Source Software [Electronic resource] / Dharmit A. Thakore. – Mode of access : <http://engineering.moonish.biz/store/books/FEAusingOSS-Ed2-Preview.pdf>.
27. An open-source finite element library Software [Electronic resource]. – Mode of access : <http://download.gna.org/getfem/html/homepage/>.
28. Бикмеев А. Моделирование в САЕ Salome : Часть 1. Общие принципы [Электронный ресурс] / А. Бикмеев. – Режим доступа : http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/lsalome_01/.
29. SALOME. The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.salome-platform.org/>.
30. Welcome to CAELinux [Electronic resource]. – Mode of access : <http://caelinux.com/CMS/>.
31. Dhondt G. CalculiX. A Free Software Three-Dimensional Structural Finite Element Program [Electronic resource] / G. Dhondt, K. Wittig. – Mode of access : <http://www.dhondt.de/>.

REFERENCES

1. Dubrovskiy, S.S., Krivenko, A.Yu. and Koveshnikov, N.A. (2013), “The impact of structural and technological factors on the strength characteristics of the parts”, *Aerospace Engineering and Technology*, no. 5(102), available at: <http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/AKTT/2013/AKTT513/Dubrovsk.pdf> (access January 9, 2016).
2. Gorbunov, A.A, and Pripadchev, A.D. (2012), “The use of CAD technology in designing complex technical aeronautical products”, *Vysokie tekhnologii, ekonomika, promyshlennost: sbornik statey trinadtsatoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, vol. 1, pp. 50-52.
3. Peresykin, K.V., Peresykin, V.P. and Ivanova, E.A. (2010), “E-lectures “Computer engineer””, available at: http://www.ssau.ru/files/education/uch_posob/Электронный%20курс.%20Компьютерный-Пересыкин%20КВ.pdf (access January 19, 2016).
4. Vasilev, V.A. and Kalmykova, M.A. (2013), “On the classification of computer programs”, *Modern scientific research and innovation: the Internet magazine*, issue 2, available at: <http://web.snauka.ru/issues/2013/02/20478> (access January 6, 2016).
5. Rychkov, S.P. (2006), *Algoritmy metoda konechnykh elementov* [Algorithms for the finite element method], BHV, St. Petersburg, Russia.
6. Pavlov, S. (2014), “CAE-technology in 2013: an overview of the achievements and market analysis”, *CAD/CAM/CAE Observer*, issue 4(88), available at: <http://www.cadcamcae.lv/N88/08-18.pdf> (access January 20, 2016).
7. Kirichevskiy, V.V., Gomenyuk, S.I., Grebenyuk, S.N. and Kirichevskiy, R.V. (2006), “The development of the finite element method and its application in CAD”, *Visnik Zaporizkogo natsionalnogo universitetu: Zbirnik naukovih statey. Fiziko-matematichni nauki*, issue 1, pp. 38-56.
8. Sineokiy, T.V. “Review CAD/CAM/CAE-systems”, available at: <http://www.cad.dp.ua/obzors/obzor-cad.php> (access January 19, 2016).
9. Selyakov, M.Yu. (2011), “National and foreign CAD/CAM system”, *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, vol. 7, pp. 193-197.
10. Zolochevskiy, A.A. and Bekker, A.A. (2011), *Vvedenie v ABAQUS: metodicheskoe posobie* [Introduction to ABAQUS: methodical manual], Biznes Invest Grupp, Kharkov, Ukraine.
11. Basov, K.A. (2011), *ANSYS. Spravochnik polzovatelya* [ANSYS user's guide], DMK press, Moscow, Russia.
12. Chumachenko, E.N., Polyakova, T.V., Aksenov, S.A., Bober, S.A., Logashina, I.V., Korzo, V.N. and Erokhina, O.S. (2009), *Matematicheskoe modelirovanie v nelineynoy mekhanike (obzor programnykh kompleksov dlya resheniya slozhnykh sistem)* [Mathematical modeling in nonlinear mechanics (review

- of software packages for the solution of complex systems modeling problems)], IKI RAN, Moscow, Russia.
13. Muyzenmek, A.Yu. and Bogach, A.A., (2005), *Polzovatelyam programmy LS-DYNA. Novaya kniga po LS-DYNA* [The users of the program LS-DYNA. New book on LS-DYNA], Informatsionno-izdatil'skiy tsentr PGU, Penza, Russia.
 14. Basov, K.A. (2008), *CATIA V5 Geometricheskoe modelirovanie* [CATIA V5 Geometric modeling], DMK Press, Moscow, Russia.
 15. ESAComp, available at: <http://fea.ru/article/innovations-esacomp> (access January 19, 2016).
 16. Shumkovich, D.G., (2001), *Raschet konstruksiy v MSC/NASTRAN for Windows* [Calculation of constructions MSC/NASTRAN for Windows], DMK Press, Moscow, Russia.
 17. Gumenuk, A. (2014), "Patran-Sinda-Msc Thermica – specialized complex for thermal analysis of the orbital spacecraft design", *CADmaster*, no. 2(75), pp. 50-58.
 18. Vasilev, V.A. (2013), "Analysis and selection of software to solve engineering problems Instrumentation", *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*, issue 3, available at: <http://technology.snauka.ru/2013/03/1702> (access January 21, 2016).
 19. Rychkov, S.P. (2013), *Modelirovanie konstruksiy v srede Femap with NX Nastran* [Modeling constructions in an environment Femap with NX Nastran], DMK Press, Moscow, Russia.
 20. Strelets-Strelet'skiy, E.B., Bogovis, V.E., Genzerskiy, Yu. V., Geraymovish, Yu.D., Marchenko, D.V. and Titok, B.P. (2008), *LIRA 9.4. Rukovodstvo polzovatelya. Osnovy. Uchebnoe posobie* [LIRA 9.4. User guide. BASIS. Tutorial], "Fakt", Kiev, Ukraine.
 21. Kirichevskiy, V.V., Dohnyak, B.M., Kozub, Yu.G. and other (1998), "MIRELA" system for the study of the strength, durability and fracture constructions of elastomeric composite materials in a non-linear deformation based on the finite element method", *Progressivnaya tekhnika i tekhnologiya mashinostroeniya I svarochnogo proizvodstva. Tr. mezhdunar. konf.* [Progressive technique and technology of mechanical engineering and welding engineering. Third International Conference], vol. 3, Kiev, KPI, pp. 136-139.
 22. Gomenyuk, S.I. (2004), "Object-oriented models and methods of analysis of mechanical processes in system design automation", Thesis abstract for Cand. Sc. (Engineering.), 05.13.12, Kharkivskiy natsionalniy universitet radioelektroniki, Karkiv, Ukraine.
 23. Goncharov, P.S., Artamonov, I.A., Khalitov, T.F. and other (2014), *NX Advanced Simulation. Prakticheskoe posobie* [NX Advanced Simulation. Practical handbook], DMK Press, Moscow, Russia.
 24. Elmer, available at: <http://www.csc.fi/english/pages/elmer> (access January 21, 2016).
 25. Hecht, F. FreeFem++, available at: <http://www.freefem.org/ff++/ftp/freefem++doc.pdf> (access January 21, 2016).
 26. Dharmit, Thakore (2014), Finite Element Analysis with Open Source Software, available at: <http://engineering.moonish.biz/store/books/FEAusingOSS-Ed2-Preview.pdf> (access January 21, 2016).
 27. An open-source finite element library Software, available at: <http://download.gna.org/getfem/html/homepage/> (access January 21, 2016).
 28. Bikmeev, A. "Modeling in CAE Salome: Part 1: General principles", available at: http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/lalome_01/ (access January 21, 2016).
 29. SALOME. The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation, available at: <http://www.salome-platform.org/> (access January 21, 2016).
 30. Welcome to CAELinux, available at: <http://caelinux.com/CMS/> (access January 21, 2016).
 31. Dhondt, G. and K. Wittig (1998), CalculiX. A Free Software Three-Dimensional Structural Finite Element Program, available at: <http://www.dhondt.de/> (access January 21, 2016).