

Анализ предметных областей и программных продуктов, использующих метод конечных элементов

Д. Н. Чернышов, А. В. Григорьев

Донецкий национальный технический университет
кафедра программной инженерии им. Л. П. Фельдмана
email: dima.ch2000@mail.ru, grigorievalvl@gmail.com

Аннотация:

В работе выполнен анализ применения математических вычислений с использованием метода конечных элементов. Рассмотрены и сравнены программы, включающие в себя указанный метод. Определены перспективы развития метода конечных элементов. Направление дальнейших исследований является использование результатов исследований для построения новых полезных модификаций метода конечных элементов, повышающих его эффективность и расширяющих области практического применения.

Введение

Одним из наиболее важных аспектов автоматизации проектирования является замена дорогостоящего и длительного экспериментального исследования опытного образца численным экспериментом, суть которого состоит в построении и исследовании с помощью компьютера математической модели проектируемого объекта. Кроме того, на практике не всегда имеется возможность испытаний опытных образцов, например, в авиастроении, так как это может привести к весьма серьёзным экономическим затратам, а иногда и к катастрофическим последствиям. При проектировании сложных инженерных и строительных конструкций наиболее важным элементом анализа является исследование их напряженно-деформированного состояния, что приводит к необходимости автоматизации решения с помощью ЭВМ задач механики деформируемого твёрдого тела. В силу сложности физической природы исследуемых явлений и их математического описания решения получают при весьма существенных ограничениях относительно свойств материалов, конструктивных форм, граничных и начальных условий. Поэтому для моделирования и анализа напряженно-деформированного состояния на практике часто используют различные численные методы. Наиболее развитым является метод конечных элементов.

Целью предлагаемой работы является анализ предметных областей и программных продуктов, использующих метод конечных элементов.

Сферы использования метода конечных элементов

Метод конечных элементов не один десяток лет известен в математике как способ численного решения задач, которые описываются дифференциальными уравнениями второго порядка

в частных производных. С помощью этого метода в настоящее время можно решить довольно большой спектр инженерных задач, проводя расчёты на персональном компьютере.

Этот численный метод решения дифференциальных уравнений, который широко применяется в различных предметных областях. Вот некоторые из них:

1) Механика и инженерия: В области механики МКЭ используется для анализа напряженно-деформированного состояния конструкций, расчета прочности материалов, оптимизации дизайна и т.д. Этот метод используется при проектировании автомобилей, самолетов, зданий, мостов, машин и других объектов.

2) Геофизика и геология: Метод конечных элементов применяется для моделирования геологических процессов, а также для анализа напряженно-деформированного состояния земной коры, распределения напряжений в горных породах и т.д. Это позволяет специалистам прогнозировать землетрясения, исследовать поведение грунтов и принимать меры по предотвращению опасных явлений.

3) Биомедицина: МКЭ применяется для моделирования биологических тканей, процессов течения крови, механики сердца, а также для создания и оптимизации медицинских устройств и имплантатов. Этот метод позволяет проводить виртуальные исследования, предсказывать результаты операций и разрабатывать новые методы лечения.

4) Электротехника и электроника: Метод конечных элементов используется для моделирования электромагнитных полей, анализа тепловых процессов, расчётов электрических цепей и других задач в области электричества и электроники. Этот метод помогает проектировать электрические машины, схемы управления, микроэлектронные устройства и другие изделия.

5) Математические исследования. МКЭ является одним из наиболее эффективных численных методов в исследовании краевых задач для дифференциальных уравнений с сингулярностью решения. Отличительной особенностью задач такого типа является то, что в большинстве случаев для них нельзя определить обобщённое (слабое) решение или оно не обладает достаточной регулярностью.

Кроме того, метод конечных элементов применяется в аэродинамике, химии, экологии, биофизике, строительстве, металлургии, гидродинамике и многих других областях науки и техники. Его универсальность и эффективность делают его одним из наиболее популярных численных методов в современной науке и инженерии.

Программное обеспечение с возможностями анализа МКЭ

На данный момент пользователям-инженерам предлагается большое разнообразие программных продуктов, использующих технологию МКЭ. Благодаря постоянному техническому прогрессу легче создавать более конкретные решения с отличными характеристиками. Программное обеспечение для анализа методом конечных элементов (МКЭ), сегодня является обычным инструментом для каждого инженера.

Многие из инженерных задач включают в себя проведение тестов, чтобы убедиться, что детали и материалы будут вести себя так, как ожидалось. Это включает реакции на различные ситуации, включая воздействие различных сил, вибрации и тепла. В прошлом такое тестирование проводилось путём создания прототипа продукта и проведения испытаний на нем. Однако создание прототипов и их испытание на них обычно требует времени и высоких затрат. Известно достаточно много конечно-элементных пакетов прикладных программ (ППП), в которых физические расчёты различных систем доведены до совершенства. Далее в работе проводится обзор самых мощных ППП со встроенными инструментами анализа методом конечных элементов. Выделение преимуществ и возможных ограничений каждого из них позволит выявить общую картину развития МКЭ на сегодняшний день.

COMSOL Multiphysics. Данный пакет (рис. 1) позволяет моделировать практически все физические процессы, которые описываются частными дифференциальными уравнениями. Программа содержит различные решатели, которые помогут справиться даже с самыми сложными задачами, а простая структура приложения обеспечивает простоту и гибкость использования. Пакет COMSOL Multiphysics, обладает почти такими же возможностями, как и пакет ANSYS, кроме этого, по сути, является инструментом пакета

MATLAB и работает под его управлением, т.е. все возможности программирования, доступные в MATLAB, могут быть использованы и в COMSOL Multiphysics, например при обработке результатов расчета. COMSOL Multiphysics обеспечивает возможность экспорта конечно-элементной модели в Simulink пакета MATLAB. Это позволяет моделировать работу объекта управления совместно с преобразователями электрической энергии, системами управления; исследовать частотные характеристики и устойчивость электротехнического комплекса. Но на практике трудности освоения интерфейса программы, накладываясь на ошибки создания моделей, делают процесс расчета недостаточно эффективным. Основные недостатки: высокая стоимость, отсутствие литературы на русском языке, труден в освоении [1].

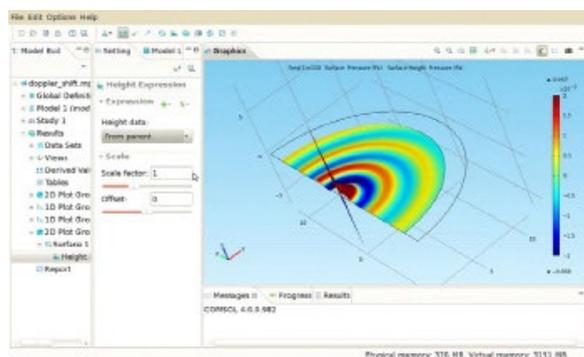


Рисунок 1 – Интерфейс COMSOL Multiphysics

ELCUT – это комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов. Основные плюсы данного программного комплекса: дружелюбный пользовательский интерфейс, простота описания моделей, широкие аналитические возможности комплекса и высокая степень автоматизации всех операций. ELCUT это полноценное Windows приложение, разработанное специально для этой платформы (рис. 2).

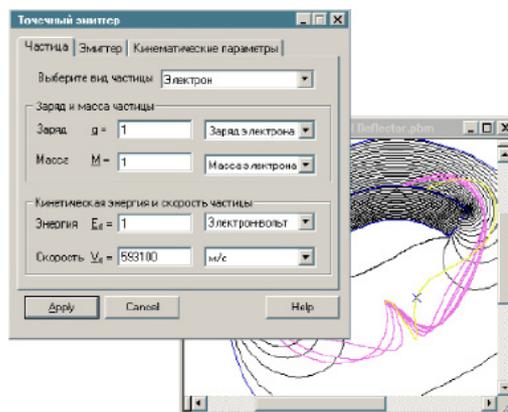


Рисунок 2 – Интерфейс ELCUT

Недостатки: двумерная геометрическая модель, а также отсутствует возможность

одновременного решения полевых задач (например, электромагнитной и тепловой) [2].

Maxwell – специализированный программный комплекс для моделирования электромагнитных полей.

Ключевые возможности: моделирование низкочастотных двумерных и трехмерных электромагнитных полей методом конечных элементов; переходный нелинейный анализ (при движении (вращение, поступательное движение, вращение по произвольной траектории) компонентов; стыковка с внешней электрической схемой; анализ размагничивания постоянного магнита; вычисление магнитных потерь); гармонический электромагнитный анализ; анализ вихревых токов с учётом скин-эффекта.

Комбинация Maxwell с программным комплексом Simplorer позволяет рассчитывать мощные высокоуровневые электромеханические системы. Подобные технологии позволяют выполнить комплексный расчет систем, состоящих из цифровых и аналоговых цепей, датчиков,

электромагнитных устройств, механических, гидравлических и других типов нагрузок, и в конечном счете создавать наиболее полную электромеханическую модель конечного продукта.

Также Maxwell позволяет передавать данные в модуль ePhysics для выполнения теплового и прочностного анализов. Основные недостатки: высокая стоимость [3].

Autodesk Inventor

Autodesk впервые завоевал мировую известность благодаря серии САПР для 2D-чертежей. Теперь Autodesk превратилась в одного из ведущих поставщиков программного обеспечения для САПР и анализа методом конечных элементов.

Inventor — это программное обеспечение Autodesk для механического проектирования и 3D-САПР (рис. 3). Он включает в себя классические функции САПР, такие как параметрическое моделирование, моделирование сборок и создание чертежей. Также этот программный пакет имеет более мощные новые инструменты, такие как автоматизация проектирования и моделирование.

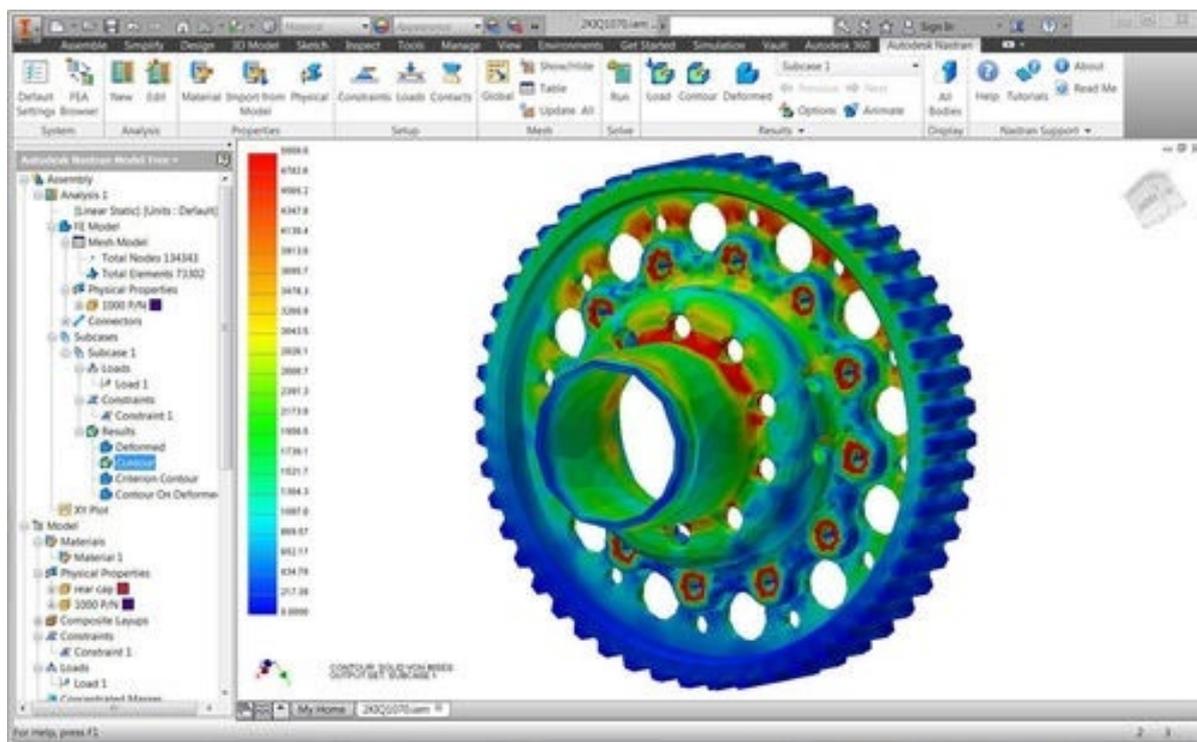


Рисунок 3 – Интерфейс Autodesk Inventor

Эта САПР также позволяет работать с конструкциями из листового металла в отдельной среде. Более того, система обеспечивает большую гибкость для визуализации, например разнесённые изображения и анимация воздействия.

Что касается возможностей анализа методом конечных элементов, в программе можно с лёгкостью запускать анализ статических или модальных напряжений и динамический анализ различных моделей. Пакет предоставляет диалоговое окно настроек, параметрическую

таблицу и руководство по моделированию, которые оказывают помощь пользователям в процессе моделирования.

Кроме того, от компании Autodesk также предлагается Inventor Nastran, который они определяют как встроенный в САПР модуль для анализа методом конечных элементов. Этот модуль является расширением возможностей анализа, предоставляемых Inventor. Он включает в себя более широкий спектр исследований и материалов для анализа. Одним из примеров таких исследований

можно назвать возможность запуска линейных и нелинейных исследований напряжения, динамики и теплопередачи [4].

Преимущества:

- Большая мощность программного обеспечения;
- В работе не требуется экспорт и импорт файлов;
- Доступен интерфейс на нескольких языках;
- Большая база знаний на веб-сайте компании и за её пределами, включая видеоуроки, статьи и форумы;
- Сборки и сварные детали также можно тестировать без необходимости сложных настроек.

Недостатки:

- В базовом виде возможности моделирования ограничены линейным напряжением и линейным динамическим анализом. Другие типы требуют использования модуля Inventor Nastran.

- Работает только в среде Windows.

Dassault Systemes SolidWorks

SolidWorks — это полный пакет САПР с различными модулями, включая одну из лучших программ CAD-CAM-CAE (рис. 4). Этот программный пакет является одним из основных конкурентов Autodesk Inventor. Создан компанией Dassault, базирующейся во Франции.

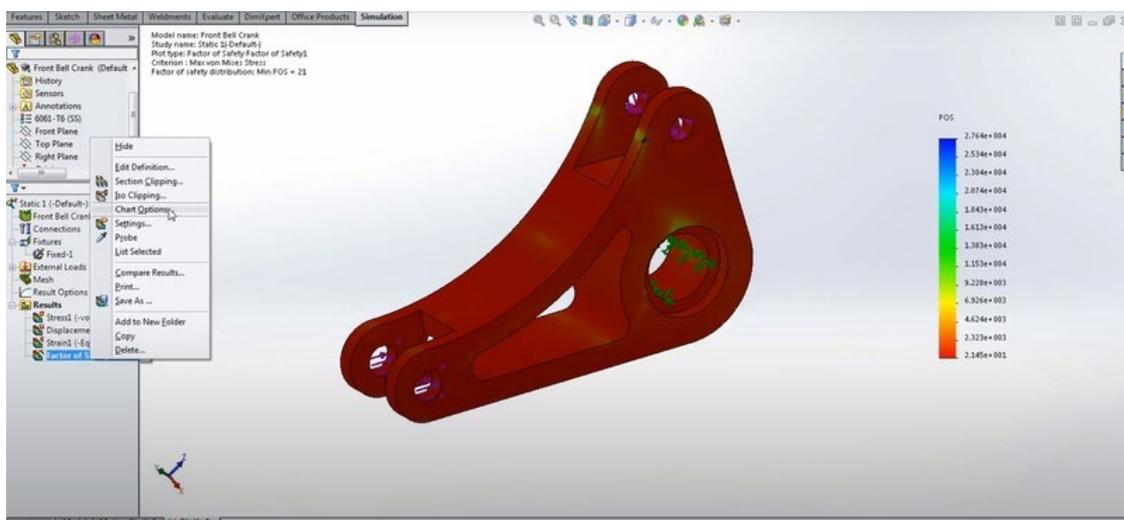


Рисунок 4 – Интерфейс SolidWorks

Среди основных функций SolidWorks выделяется возможность работы с большими и сложными сборками. Присутствует возможность работать с простой моделью и масштабировать её до полного комплекса объектов.

Анализ методом конечных элементов применяется через модуль SolidWorks Simulation. Модуль поставляется в трех уровнях: Standard, Professional и Premium. Последняя версия является наиболее мощной и включает в себя:

- Статические исследования;
- Исследования напряжений;
- Анализ движения;
- Термический анализ;
- Частотные исследования;
- Исследования потери устойчивости;
- Исследования сосудов под давлением;
- Оптимизация топологии;
- Линейные динамические исследования;
- Нелинейный анализ.

Кроме того, разработчики предлагают дополнения к SolidWorks Simulation. Они варьируются от моделирования потока и пластиковых упаковок до более конкретных решений. Например, модули Electronics Cooling и

Sustainability предоставляют пользователям возможности для проверки их проектов. Все эти пакеты и модули встроены в программное обеспечение.

Более того, для предоставления своим пользователям более широких возможностей МКЭ, Dassault Systemes SolidWorks предлагает ABAQUS через Simulia Structural Simulation Designer. Это специализированное программное обеспечение FEA, отлично совместимое с интерфейсом САПР [5].

Преимущества:

- Большая мощность программного обеспечения;
- Для проведения исследований не требуется экспорт и импорт файлов, поскольку создание изделия происходит в той же программе;
- Широкий спектр тестов в одном пакете;
- Могут быть выполнены гидродинамические тесты;
- Дополнения предлагаются как автономные решения, что даёт пользователю возможность платить только за то, что ему действительно нужно;

- Интерфейс доступен на нескольких языках;
- Большая база знаний на веб-сайте компании и за её пределами, включая видеоуроки, статьи и форумы.

Недостатки:

- В зависимости от версии и количества используемых модулей системные требования к аппаратному обеспечению могут быть достаточно высокими;

- Работает только в Windows.

Siemens Solid Edge — это полный набор инструментов для разработки, предлагаемых Siemens. Известная немецкая компания предлагает инструменты для механического и электрического проектирования, моделирования, производства, технических публикаций, управления данными и многого другого (рис. 5).

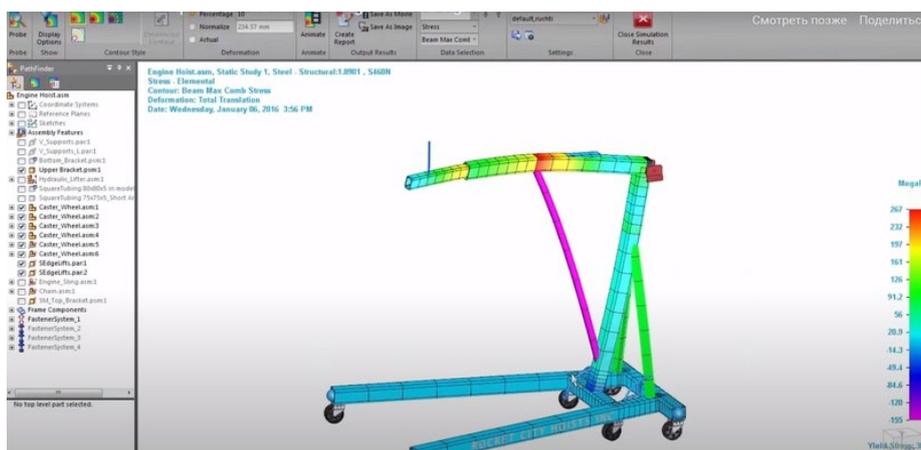


Рисунок 5 – Интерфейс Solid Edge

В последних версиях Solid Edge мы можем найти много новых функций. К ним относятся передовые технологии, такие как дополненная реальность и возможность полностью оцифровать процесс от проектирования до производства.

Еще одна выдающаяся функция Solid Edge — оптимизация как для аддитивного, так и для субтрактивного производства. Можно определить и выполнить ряд производственных процессов, в том числе:

- ЧПУ обработка;
- Резка;
- Изгиб;
- Литье;
- Сварка;
- Сборка;
- Производство добавок.

Последнее является хорошим дополнением благодаря достижениям в технологиях 3D-печати.

Solid Edge предлагает инструменты моделирования на трех разных уровнях: Solid Edge Premium, Solid Edge Simulation и Solid Edge Simulation Advanced. Масштабируемое моделирование Solid Edge позволяет пользователю в цифровом виде проверять и оптимизировать детали, сборки и целые системы. Вы можете сделать это на ранней стадии процесса проектирования, чтобы уменьшить потребность в быстром прототипировании и сэкономить время и деньги.

Возможности FEA в Solid Edge включают моделирование отдельных деталей, анализ сборки и

вычислительную гидродинамику (CFD). С помощью этого программного обеспечения САПР и анализа методом конечных элементов можно выполнять:

- Анализ напряжения и моделирование;
- Моделирование вибрации;
- Моделирование полного движения;
- Моделирование потери устойчивости;
- Тепловое моделирование.

Все варианты основаны на проверенной модели конечно-элементного моделирования Femap и технологии NX Nastran [6].

Плюсы:

- Мощное программное обеспечение от известной и проверенной компании;
- Встроенная САПР, экспорт и импорт файлов не требуются для проведения исследований;
- Широкий спектр возможностей в одном пакете;
- В программе могут быть выполнены аэро- и гидродинамические тесты;
- Поддержка клиентов доступна на нескольких языках;
- Большая база знаний на веб-сайте компании и за ее пределами, включая видеоуроки, вебинары, статьи, форумы и многое другое.

Минусы:

- В зависимости от используемой версии системные требования могут быть очень высокими по сравнению с другим программным обеспечением CAD и FEA;

• Последние версии ограничены Windows Enterprise или Professional.

PTC Creo. Creo — ещё одна известная компания в дизайнерском и инженерном сообществе. Их программное обеспечение для 3D проектирования и анализа методом конечных элементов является серьёзным конкурентом на рынке САПР. Creo предлагает масштабируемые пакеты и инструменты для разработки продуктов 3D CAD (рис. 6). Эти инструменты включают моделирование и проектирование, моделирование и анализ, дополненную реальность и аддитивное производство.



Рисунок 6 – Интерфейс Creo

В дополнение к возможностям 3D-проектирования, которые можно найти в любом программном обеспечении, Creo предлагает возможности для проектирования, основанного на знаниях. Пользователи могут использовать данные об использовании продукта в реальном мире с помощью функции Smart Connected Design. Возможности FEA в Creo расширились с годами. В последней версии была добавлена возможность проводить гидродинамические тесты с расширением Creo Flow Analysis. Еще одним компонентом является инструмент Creo Simulation Live, который обеспечивает мгновенную обратную связь в среде моделирования. Creo Simulation Live — самая замечательная функция, поскольку она

мгновенно предоставляет конструкторам структурный, тепловой и модальный анализы. Можно выполнять моделирование без необходимости создания сетки или упрощения моделей. Эта технология была создана в партнерстве с одним из самых уважаемых имен в индустрии инженерного программного обеспечения, ANSYS. Таким образом, Creo определенно повысила их авторитет и надежность на рынке.

Creo 6.0 позволяет выполнять: структурный анализ; термические испытания; анализ движения; моделирование усталости; анализ заполнения формы.

Все эти возможности делают его хорошим вариантом в качестве полноценного программного обеспечения для трёхмерной САПР и анализа методом конечных элементов [7].

Плюсы:

- Мощное программное обеспечение от известной и проверенной компании;
- Встроенная САПР, экспорт и импорт файлов не требуются для проведения исследований;
- Широкий спектр возможностей в одном пакете;
- Могут быть выполнены гидродинамические тесты и тесты заполнения формы;
- Поддержка клиентов доступна на нескольких языках;
- Большая база знаний на веб-сайте компании и за ее пределами, включая видеоуроки, вебинары, статьи, форумы и многое другое.

Минусы: моделирование ограничено уровнями Design Premium и Design Premium Plus; только для Windows.

Сравнение характеристик

Исходя из параметров программных продуктов, рассмотренных в этой работе, можно привести следующую таблицу сравнения характеристик программ (табл. 1).

Таблица 1 - Сравнение рассмотренных программ

| Программа | COMSOL | ELCUT | Maxwell | Inventor | SolidWorks | Solid Edge | Creo |
|--|------------|-----------------------|------------|------------|-----------------------|------------|------------|
| Документация | Да | Да | Да | Да | Да | Да | Да |
| Поддержка CAD | Нет | Да | Да | Да | Да | Да | Да |
| Решение тепловых и механических задач | Да | Да | Да | Да | Да | Да | Да |
| Вычисления электродинамики | Нет | Да | Да | Нет | Нет | Нет | Нет |
| Вычисления аэро- и гидродинамики | Да | Нет | Нет | Нет | Да | Да | Да |
| Размерность пространства, доступная для вычислений | 0D-3D | 2D | 2D, 3D | 2D, 3D | 2D, 3D | 2D, 3D | 3D |
| Визуализация | Встроенная | Встроенная, сторонняя | Встроенная | Встроенная | Встроенная, сторонняя | Встроенная | Встроенная |
| Простота в освоении | Нет | Да | Да | Да | Да | Да | Да |

Выводы

В предлагаемой работе выполнен анализ предметных областей и программных продуктов, использующих метод конечных элементов.

Как основной вывод, можно заметить, что инженерные вычисления с использованием метода конечных элементов довольно широко распространены в наше время. Рассмотренные программы же показывают динамику развития метода конечных элементов, что позволяет оценить его дальнейшие перспективы.

В качестве перспектив работы следует отметить, что результаты данного анализа можно использовать для построения новых полезных модификаций метода конечных элементов, повышающих его эффективность и расширяющих области практического применения.

Литература

1. Введение в COMSOL Multiphysics : Учебное пособие – США, 2018. URL: https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf. (дата обращения: 03.04.2024).

2. Инженерное моделирование квазистатического электромагнитного поля в программе ELCUT для задач электроники //

Электромагнитная совместимость в электронике : [сайт]. URL: <https://emc-e.ru/sapri/elcut/> (дата обращения: 12.04.2024).

3. ANSYS Maxwell | Моделирование электромагнитных полей // Моделирование и цифровые двойники : [сайт]. URL: <https://www.cadfecis.ru/products/ansys/electronics/maxwell/> (дата обращения: 17.04.2024).

4. Autodesk Inventor — уникальный инструмент для инженеров в новом тысячелетии // САПР и Графика : [сайт]. URL: <https://sapr.ru/article/7102> (дата обращения: 24.04.2024).

5. SolidWorks — стандарт трехмерного проектирования // САПР и Графика : [сайт]. URL: <https://sapr.ru/article/6733> (дата обращения: 30.04.2024).

6. Solid Edge: от CAD-системы до кабины пилота // CADMASTER – 2019 - №3(91). URL: https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_91_05.html (дата обращения: 03.05.2024).

7. PTC Creo Parametric. Лучшая CAD для проектирования // ИРИСОФТ : [сайт]. URL: <https://www.irisoft.ru/products/creo/ptc-creo-parametric/> (дата обращения: 11.05.2024).

Чернышов Д.Н., Григорьев А.В. Анализ предметных областей и программных продуктов, использующих метод конечных элементов. В работе выполнен анализ применения математических вычислений с использованием метода конечных элементов. Рассмотрены и сравнены программы, включающие в себя указанный метод. Определены перспективы развития метода конечных элементов. Направление дальнейших исследований является использование результатов исследований для построения новых полезных модификаций метода конечных элементов, повышающих его эффективность и расширяющих области практического применения.

Ключевые слова: метод конечных элементов, дифференциальные уравнения, САПР, CAE.

Chernishov D.N., Grigoriev A.V. Analysis of subject areas and software products that use the finite element method. The paper analyzes the application of mathematical calculations using the finite element method. The programs including the specified method are considered and compared. The prospects for the development of the finite element method are determined. The direction of further research is to use the research results to build new useful modifications of the finite element method, increasing its effectiveness and expanding the scope of practical application.

Keywords: finite element method, differential equations, CAD, CAE.

Статья поступила в редакцию 24.06.2024
Рекомендована к публикации профессором Федяевым О. И.