

Д.К. Васильченко

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РЕШЕНИИ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Аннотация. В данной статье рассматриваются основные проблемы, касающиеся проектирования и производства летательных аппаратов гражданской авиации на текущее время в России. Цель статьи заключается в создании уникального отечественного программного продукта, который позволит решить задачу повышения качества сборки самолетов. С помощью этого программного обеспечения, использующего метод конечных элементов с решением контактной задачи теории упругости, появится возможность производить не только проектные расчеты будущих моделей, но и анализировать уже имеющиеся производственные отклонения при сборке узлов и агрегатов самолетов. Сама суть метода конечных элементов, его преимущества, а также дальнейшие пути его развития обозначены в статье.

Ключевые слова: метод конечных элементов, самолетостроение, авиация, теория упругости, контактная задача, производственные проблемы.

D.K. Vasilchenko

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

RELEVANCE OF APPLICATION OF THE FINITE ELEMENT METHOD IN SOLVING THE CONTACT PROBLEM OF ELASTICITY THEORY

Abstract. This article discusses the main problems related to the design and production of civil aviation aircraft at the current time in Russia. The purpose of the article is to create a unique domestic software product that will solve the problem of improving the quality of aircraft assembly. Using this software, which uses the finite element method with the solution of the contact problem of the theory of elasticity, it will be possible to perform not only design calculations for future models, but also analyze existing production deviations in the assembly of aircraft components and assemblies. The essence of the finite element method, its advantages, as well as further ways of its development are indicated in the article.

Keywords: finite element method, aircraft engineering, aviation, theory of elasticity, contact problem, production problems.

Введение

Самолетостроение — сложный и трудозатратный производственный процесс, требующий высокой степени точности, аккуратности и профессионализма от исполнителя. Ситуация также усугубляется нарастающим давлением, вызванным необходимостью ускорения темпов сборки самолетов гражданской авиации собственного производства. В России авиационная промышленность имеет богатую историю. Наряду с тем, что, изначально, она и формировалась как отрасль военного назначения, но все же позже перешла на выпуск гражданской продукции. Преодолевая основные сложности и развиваясь практически вровень с иностранными конкурентами, являющимися практически монополистами в производстве пассажирских самолётов, она все же сталкивается и с рядом современных проблем. Ниже приведены некоторые из них:

– Устаревшее оборудование и технологии:

Одной из основных проблем, стоящих перед сборкой самолетов в России, является применяемое оборудование и технологии. Многие профильные предприятия авиационной отрасли в России были построены и запущены в эксплуатацию в советское время и с тех пор не подвергались глобальным обновлениям. Существует нехватка современных технологий и оборудования, необходимых для эффективного и точного производства летательных аппаратов. Использование оборудования и технологий, подвергшихся физическому и

моральному устареванию, также приводит к увеличению сроков производства и затрат на изготовление.

–Нехватка квалифицированных рабочих:

Еще одной серьезной проблемой, стоящей перед отечественным производством, является нехватка квалифицированных кадров. В последние годы в России наблюдается значительное сокращение численности специализированных инженеров в авиационной отрасли. Это связано с несколькими факторами, такими как отсутствие приоритетов на развитие программ обучения и старение нынешней рабочей силы.

–Зависимость от иностранных поставщиков:

Российская авиационная промышленность сильно зависит от иностранных поставщиков многих компонентов и систем. Эта зависимость создает ряд проблем, в том числе задержки в производстве и увеличение затрат из-за колебаний валютных курсов. Это также делает российскую авиационную промышленность уязвимой перед геополитической напряженностью и торговыми ограничениями. В современных реалиях находятся различные пути и способы уменьшения этой зависимости. Например, повсеместно на производственных предприятиях практически всех отраслей промышленности идет внедрение и освоение программ импортозамещения материалов, программного обеспечения, устанавливаемого оборудования и систем, а также их успешная адаптация под используемые технологии.

–Вопросы контроля качества:

Контроль качества является важным аспектом сборки самолетов. В России за последние годы произошло несколько громких инцидентов, когда самолеты терпели крушение из-за проблем с контролем качества получаемых и поставляемых по кооперации с другими предприятиями деталей, узлов и агрегатов. Это вызвало опасения касательно соответствия должному уровню безопасности самолетов российского производства и нанесло ущерб репутации российской авиационной промышленности. Поэтому проблема обеспечения жесткого контроля качества входной и отпускаемой продукции, а также методов его реализации

–Отсутствие инвестиций:

Наконец, российская авиационная промышленность испытывает нехватку инвестиций. Сокращение финансирования отрасли приводит к уменьшению количества исследований и разработок, к отсутствию частных инвестиций в модернизацию сборочных заводов и оборудования. Что сказывается на способности отраслевых компаний конкурировать с другими мировыми авиационными лидерами. Также из-за большого влияния военного уклона отрасли во время развития ее гражданская часть имеет сильную зависимость от поступающих заказов и большой диапазон величины из года в год.

Таким образом, в данной статье будет описан поиск оптимального решения, которое бы максимально полно охватывало сразу несколько перечисленных проблем авиационной промышленности. Некоторые из них, например, такие как отсутствие отечественного программного обеспечения и необходимой методологии в решении узкоспециализированной задачи можно решить с гораздо меньшими потерями времени и ресурсов путем создания необходимого приложения для вычислительной машины. Также в подавляющем большинстве случаев имеющиеся проблемы с повышением точности сборки нельзя отнести к обособленно взятой детали: в самолетостроении решающую роль играет именно взаимодействие деталей между собой в сборочном положении. Можно сказать, что это позволит сузить спектр работ в рамках одной статьи и в ходе написания кандидатской диссертации до разработки решения контактной задачи теории упругости. Предполагаемое решение будет основываться на применении метода конечных элементов.

Метод конечных элементов при решении контактной задачи

Метод конечных элементов (МКЭ) — это мощный численный метод для решения дифференциальных уравнений, требующихся при проработке инженерных и научных задач. Метод основан на разделении (аппроксимации) любой непрерывной величины (температура,

давление, перемещение, напряжение) на более мелкие и простые конечные элементы, где поведение каждого элемента определяется набором математических уравнений.

Одним из наиболее важных применений МКЭ является решение контактной задачи, когда два или более тел соприкасаются и взаимодействуют друг с другом.

В этой статье будет рассмотрена актуальность применения МКЭ при решении контактной задачи – задачи о взаимодействии твердых и (или) деформируемых тел, так как рассматриваемые элементы являются сборными конструкциями летательного аппарата, в результате чего нагрузка от одного тела передается другому посредством их соприкосновения, взаимодействия.

Контактная задача является сложной и важной задачей в различных технических областях. Она предполагает определение усилий взаимодействия. На поведение контактирующих тел могут влиять такие факторы, как трение, деформация и износ.

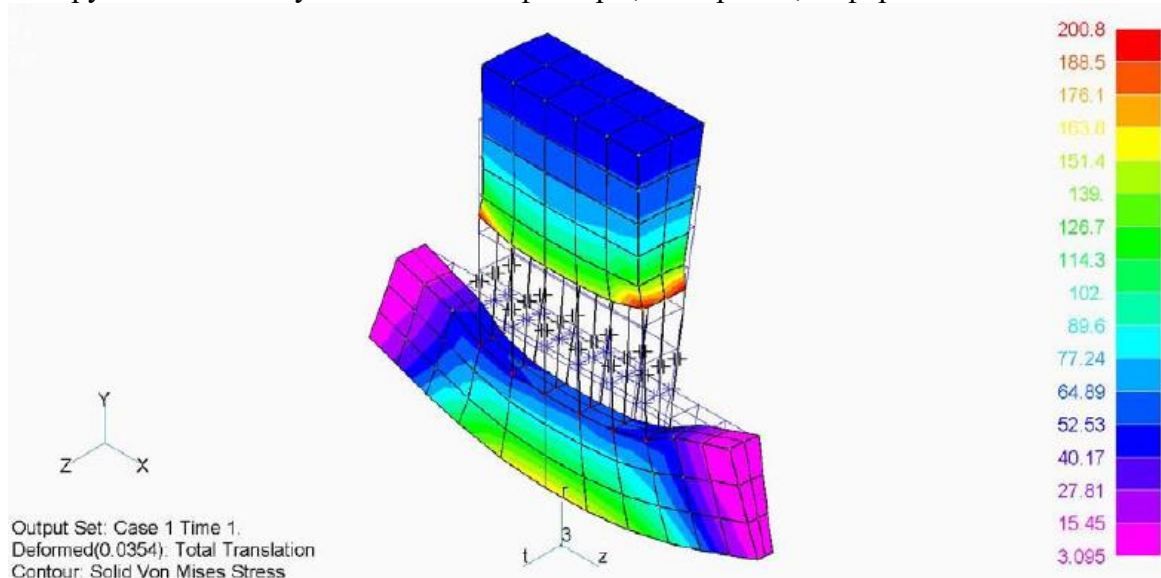


Рис. 1. Пример расчета контактной задачи

Корректность постановки контактных задач теории оболочек целиком зависит от точности построения функций влияния контактирующих объектов. Для тонкостенных элементов наиболее простым и в то же время достаточно точным способом построения функции влияния является суммирование функции влияния, полученной по классической теории оболочек. Последняя дает величину перемещения оболочки в результате изгиба и растяжения, а функция влияния для полупространства (или полуплоскости) характеризует местную сжимаемость элемента, точнее, его деформацию в поперечном направлении.

Эту задачу можно решить аналитически, но решения часто бывают слишком сложными и требуют упрощающих допущений, которые на практике могут оказаться неверными. Численные методы, такие как метод конечных элементов (МКЭ), обеспечивают альтернативный подход к решению контактной задачи. Метод конечных элементов может применяться для моделирования поведения контактирующих тел с различными материалами и свойствами, со сложной геометрией и нелинейным поведением материала. Это делает его мощным инструментом для решения контактной проблемы. МКЭ также можно использовать для моделирования поведения контактных поверхностей со сложными граничными условиями, такими как шероховатость, кривизна и неравномерная нагрузка. Поведение каждого тела можно описать с помощью набора определяющих уравнений, которые связывают напряжение и деформацию материала. Определяющие уравнения могут быть линейными или нелинейными, изотропными или анизотропными. МКЭ широко используется в различных инженерных приложениях, например, структурный анализ, гидродинамика, электромагнетизм и теплообмен.

Еще одним преимуществом использования МКЭ при решении контактной задачи является способность метода дать количественное представление о поведении

контактирующих тел. Тем самым использовать его для прогнозирования контактного давления, деформации и износа контактирующих тел.

Сущность метода конечных элементов представляет собой разделение сложной области на более мелкие и простые элементы. В этих единицах поведение каждого элемента определяется набором математических уравнений.

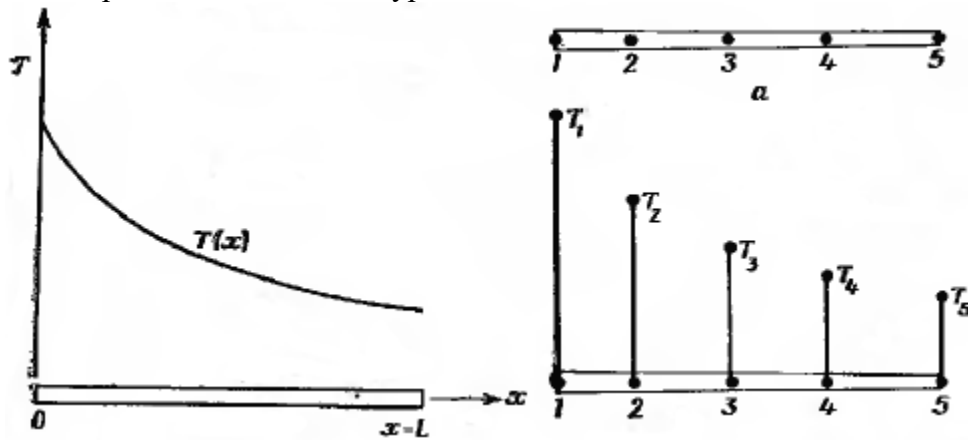


Рис. 2. Пример разбиения области определения функции на элементы

Сам метод производится в три основных этапа: (1) дискретизация (аппроксимация) исследуемой области значений, (2) формулировка уравнений элементов и (3) сборка уравнений элементов в глобальную систему уравнений. На этапе дискретизации (аппроксимации) сложная структура разбивается на конечное число более мелких и простых элементов. На этапе формулировки поведение каждого элемента описывается набором математических уравнений, которые выводятся на основе определяющих частных производных и краевых условий. На третьем этапе, этапе сборки, уравнения объединяются в глобальную систему, которую можно решить с помощью численных методов.

МКЭ имеет несколько преимуществ по сравнению с аналитическими методами, в том числе способность работать со сложной геометрией, с нелинейным поведением материала и граничными условиями. Он также предоставляет количественные сведения о поведении конструкции, что позволяет обоснованно оптимизировать ее и увеличить производительность системы.

На данный момент существуют некоторые инструменты, программные продукты, для проведения расчетов на ЭВМ, включающие применение метода конечных элементов. Например, такие коммерческие системы как Femap, ANSYS, ABAQUS, MSC.Patran, NX Nastran и другие представляют собой универсальные системы для проведения инженерного анализа.

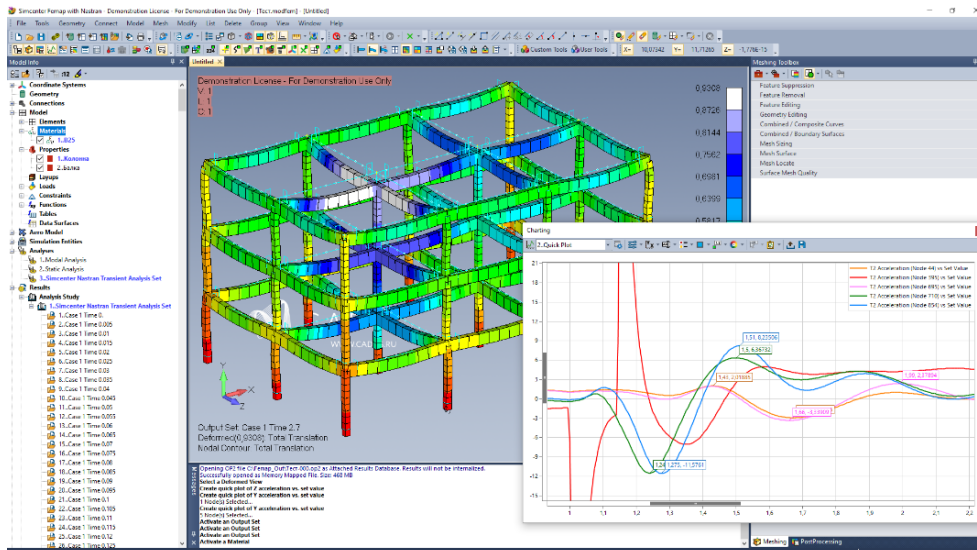


Рис. 3. Интерфейс программного обеспечения Femap

Применение МКЭ при решении контактной задачи

Для учета контактного взаимодействия чаще всего применяют метод множителей Лагранжа, метод штрафных функций или их комбинации. Однако в этих методах решается единая система уравнений для всех контактирующих тел. В методе множителей Лагранжа контактные ограничения задаются путем введения дополнительных переменных, известных как множители Лагранжа. Вследствие чего в матрице системы возникает блок с нулями на диагонали, что ограничивает выбор решателя. А в методе штрафных функций контактные ограничения реализуются путем добавления множителя штрафа в систему уравнений, следовательно, возникает вопрос с определением величины штрафных множителей. Штрафной множитель осложняет решение за нарушение контактных ограничений, и его значение выбирается достаточно большим, чтобы гарантировать выполнение этих ограничений. Метод Шварца позволяет решать исходную систему уравнений для каждого тела по отдельности, изменения претерпевают лишь граничные условия на контактной границе. В алгоритме, как корректировку перемещений, так и корректировку взаимодействий можно осуществлять в рамках одной итерации.

Заключение

Применение МКЭ для решения контактной задачи представляет собой предмет обширных исследований последние несколько десятилетий. Этот метод используется для решения множества контактных задач в различных областях техники и предоставляет многообещающие результаты. Тем не менее, есть еще существенные возможности для улучшения метода и дальнейшего его развития.

Одним из ключевых направлений исследований является разработка более точных и более эффективных алгоритмов решения контактной задачи с использованием МКЭ. Этот метод требует значительных вычислительных ресурсов решателя и на его производительность могут влиять такие факторы, как плотность построенной сетки, тип элемента сетки и схема численного интегрирования. Поэтому разработка более эффективных алгоритмов решения контактной задачи с помощью МКЭ позволяет значительно снизить затраты ресурсов вычислительной машины и повысить точность решения.

Еще одним направлением развития является разработка новых методов моделирования поведения контактирующих тел, имеющих сложные свойства материала и граничные условия. Например, МКЭ можно использовать для моделирования поведения контактных поверхностей в условиях динамического нагружения, характерных для многих инженерных систем. МКЭ также можно использовать для моделирования поведения контактных поверхностей с вязкоупругими материалами, поведение которых зависит от течения времени, например, чтобы смоделировать старение материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горячев А.П., Пахомов В.А., Санков Е.И. Применение МКЭ к решению трехмерных задач теории упругости. // Прикладные проблемы прочности и пластичности: Всесоюзный межвузовский сборник. – 1979. – С. 57–68.
2. Андреев В.Б. Лекции по методу конечных элементов: Учебное пособие. - М.: Издательский отдел факультета ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова; МАКС Пресс, 2010. - 2-е изд., испр. и доп. - 264 с.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975 – 541 с.

REFERENCES

1. Goryachev A.P., Pakhomov V.A., Sankov E.I. The use of MKE to the solution of three - dimensional problems of the theory of elasticity. // Applied problems of strength and plasticity: the All -Union Interuniversity Collection. - 1979. - S. 57–68.

2. Andreev V.B. Lectures on the method of final elements: a textbook. - M.: Publishing department of the faculty VIMI MSU named after M.V. Lomonosov; Max Press, 2010.-- 2nd ed., Cred. and add. - 264 p.

3. Zenkevich O. The method of finite elements in technology. - M.: Mir, 1975 - 541 p.

Информация об авторе

Васильченко Дарья Константиновна – аспирант группы АДВЛ-22 кафедры механики и сопротивления материалов, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: their-love@mail.ru

Information about the author

Vasilchenko Daria Konstantinovna – graduate student gr. aDVL-22, Department of Mechanics and Strength of Materials, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: their-love@mail.ru