

**СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ПРОСТЫМ  
ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИМ ИНТЕРФЕЙСОМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ  
ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВОБОДНО  
РАСПРОСТРАНЯЕМЫХ СРЕДСТВ РАЗРАБОТКИ**

**Попов А.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

В настоящее время существует значительное количество как коммерческого, так и свободно распространяемого программного обеспечения, позволяющего решать задачи механики деформируемого твердого тела (МДТТ), но все это программное обеспечение имеет недостатки. В случае коммерческого программного обеспечения, как правило, основным недостатком является его высокая стоимость. В случае свободного программного обеспечения, пользователю, даже для решения самых простых задач, требуется хорошо знать используемый программный продукт и иметь достаточно высокий уровень подготовки в области МДТТ.

Данная работа заключается в описании процесса создания программного обеспечения для решения задач МДТТ с использованием свободно распространяемых средств разработки, способного предоставить достаточно высокую точность и скорость вычислений, а также простую и удобную подготовку начальных и обработку полученных данных даже для не опытного пользователя.

Для создания геометрической модели исследуемого тела и генерации для него конечно-элементной (КЭ) сетки используется интерфейс прикладного программирования свободно распространяемого сеточного генератора GMSH [1]. С использованием инструментов, предоставляемых генератором, были написаны собственные классы: базовый класс Contour для работы с произвольными контурами и наследуемые от него классы для частных случаев (Circle, Rectangle и т.д.), с целью ещё на стадии создания геометрической модели добавить необходимые атрибуты, позволяющие, в случае необходимости, построить неструктурированную КЭ сетку.

После получения конечно-элементной сетки, для составления и последующего решения системы дифференциальных уравнений необходимо задать граничные условия и характеристики материалов исследуемого тела. Для того чтобы сделать это было максимально быстро и удобно, результат работы сеточного генератора передается в предварительно созданную базу данных, состоящую из четырех таблиц: Nodes, Elements, Materials и Loadings. Номер узла приложения граничного условия определяется как ключ поиска в таблице Loadings. Однако этот ключ не может быть первичным, поскольку к одному узлу допустимо приложение нескольких граничных условий.

В соответствии с условием поставленной задачи, с помощью обращения к имеющейся базе данных, генерируется входной файл с начальными данными, на основании которого написанный собственноручно конечно-элементный решатель будет проводить расчет.

Для хранения данных из входного файла, а также промежуточных данных созданы две структуры, описывающие конечный элемент и граничные условия. В процессе создания решателя активно использовалась математическая библиотека Eigen [2], которая предоставляет возможность строить разреженные матрицы, не хранящие в памяти нулевые элементы. Так как глобальная матрица жесткости, используемая в методе конечных элементов (МКЭ), содержит в себе большое число нулевых элементов, такая возможность позволяет эффективно работать с памятью, избавляя от дополнительных преобразований этой матрицы.

Собственно, работа МКЭ и сводится к построению глобальной матрицы жесткости и решению образованной от нее системы линейных уравнений. Глобальная матрица жесткости представляет собой суперпозицию локальных матриц жесткости каждого конечного элемента и является коэффициентом пропорциональности между узловыми силами и

перемещениями. Для вычисления значений локальных матриц написан специальный метод, в конце которого заполняется вектор Triplets, каждый элемент которого создается, используя массив индексов узлов элементов для определения его положения в глобальной матрице жесткости. Пройдясь в цикле по каждому элементу и заполнив вектор, используя выше описанный метод, значениями локальных матриц, будет построена глобальная матрица жесткости.

Для существования единственного решения полученной системы уравнений необходимо добавить граничные условия. Для этого была написана специальная функция, принимающая в качестве входных параметров глобальную матрицу жесткости и вектор граничных условий. Для решения системы уравнений используется прямой решатель из библиотеки Eigen – SimplicialLDLT. Результат решения представляет собой вектор перемещений. Для анализа результатов целесообразно от перемещений перейти к деформациям, а далее к напряжениям. Для наглядного представления результатов используется постпроцессор GMSH.

В результате работы было получено программное обеспечение для решения задач МДТТ с высокой степенью точности с простым пользовательским интерфейсом. В качестве примера для тестирования, была рассмотрена задача Кирша в плоско-напряженной постановке. Полученные результаты полностью совпадают с результатами, полученными в ANSYS Mechanical APDL, и с погрешностью менее 5 % совпадают с аналитическим решением задачи Кирша.

### **Литература**

1. Geuzaine C., Remacle J. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities // International Journal for Numerical Methods in Engineering. –2009. –Т. 79. – № 11. – С. 1309-1331.
2. Никехин А.А. Основы C++ для моделирования и расчетов. Часть 2. Библиотеки для научных вычислений: Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – С. 15-23.