

## Разработка программного обеспечения для построения октаэдрических сеток

Е. Е. Заяц, А. В. Февральских

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

**Аннотация.** Статья посвящена вопросам разработки программного обеспечения, предназначенного для построения контрольнообъемных сеточных моделей на основе архимедовых тел. Изложены основы используемого геометрического метода, приведена общая архитектура программы и основные положения алгоритма ее работы.

**Ключевые слова:** разработка программного обеспечения, полиэдрические сеточные модели, численное моделирование, механика сплошных сред, метод конечных объемов.

## Development of software for constructing octahedral meshes

E. E. Zayats, A. V. Fevralskikh

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Abstract.** The work is devoted to the issues of developing software intended for constructing control volume mesh models based on Archimedean solids. The basics of the geometric method used are presented, the general architecture of the program and the main provisions of the algorithm of its operation are given.

**Keywords:** software development, polyhedral mesh models, numerical modeling, continuum mechanics, finite volume method.

### Введение

Численное моделирование – ключевой инструмент, который широко применяется для решения задач механики сплошных сред. Он основан на применении методов, многие из которых используют сеточные модели. Среди них можно выделить такие, как метод контрольных объемов (FVM), метод конечных элементов (FEM) и метод конечных разностей (FDM). Данные методы зарекомендовали себя как универсальные и надежные для широкого круга задач. Однако на точность и устойчивость получаемых численных решений напрямую влияют тип и качество используемой сеточной модели. Сеточные модели с различной морфологией элементов по-разному влияют на объем требуемых для моделирования вычислительных ресурсов, на скорость сходимости решения и на его гладкость. В частности, сеточные модели на основе тетраэдров, как правило, характеризуются большими затратами вычислительных ресурсов ввиду необходимости их большей концентрации для получения гладких физических полей, чем, например, сеточные модели на основе полигексов. С другой стороны, сеточные модели на основе полигексов могут требовать большей концентрации элементов для расчета градиентов физических величин. Кроме того, затраты памяти и количества операций на обработку одного полигекса превышают аналогичные затраты на обработку гексаэдров и тетраэдров в ходе численного интегрирования уравнений динамики. Эти обстоятельства подталкивают к разработке геометрических методов построения компромиссных сеточных моделей и соответственно методов проектирования программного обеспечения для их генерации.

На сегодняшний день существуют различные программные решения, которые позволяют строить разнообразные сеточные модели, применяемые в ряде задач, а именно: поверхностные, объемные гекса-сетки, тетра-сетки, смешанные или полиэдрические (на основе полигексов). Примерами таких решений являются программные пакеты Ansys Fluent Meshing [1–3], OpenFOAM, FlowVision и многие другие. Помимо того, что выбор морфологий сеточных элементов в этих программах является весьма ограниченным, архитектура этих программ и интерфейс зачастую не позволяют выработать эффективные методики работы с ними для решения задач цифровой поддержки жизненного цикла промышленных изделий. Это создает барьер для эффективного использования необходимых вычислительных методов инженерами, особенно в случаях, когда важна скорость подготовки модели.

Целью данной работы является разработка геометрического метода построения сеточных моделей на основе архимедовых тел и методика проектирования программного обеспечения для их создания

в ходе решения задач проектирования изделий. В рамках исследования для достижения цели решаются следующие задачи:

- разработка геометрического метода построения сеточных моделей на основе архимедовых тел,
- разработка общей архитектуры программного обеспечения,
- реализация и тестирование модуля построения сеточной модели.

В рамках данного доклада рассматривается процесс реализации вычислительного модуля, а также приводятся описания общей архитектуры разрабатываемого приложения и выбранного метода построения сеточной модели.

Разрабатываемое приложение сможет стать связующим звеном между этапами геометрического проектирования и численного моделирования в составе SCADA системы (Supervisory Control and Data Acquisition) и позволит сократить время подготовки расчетных данных и снизить требования к экспертизе пользователя.

### Постановка задачи

Наиболее значимыми характеристиками расчетных сеток являются скорость генерации и качество итоговой модели. Классический подход к построению полиэдрических сеточных моделей, реализованный в Ansys Fluen Meshing, основан на предварительной генерации поверхностной сетки с последующей генерацией объемных элементов (рис. 1а). Несмотря на высокую точность аппроксимации границ, данный подход требует тщательной подготовки STL геометрии и заметно уступает в скорости альтернативному подходу, который основан на обрезке заранее сгенерированной объемной сетки (рис. 1б). Основным преимуществом альтернативного подхода является высокая степень его автоматизации, обусловленная отсутствием необходимости ручного исправления геометрических дефектов модели и трудоемкой настройки параметров генерации. Таким образом, в качестве основного алгоритма построения полиэдрической сеточной модели, закладываемого в разрабатываемое приложение, предлагается выбрать метод на основе обрезки модели по заданной STL геометрии.

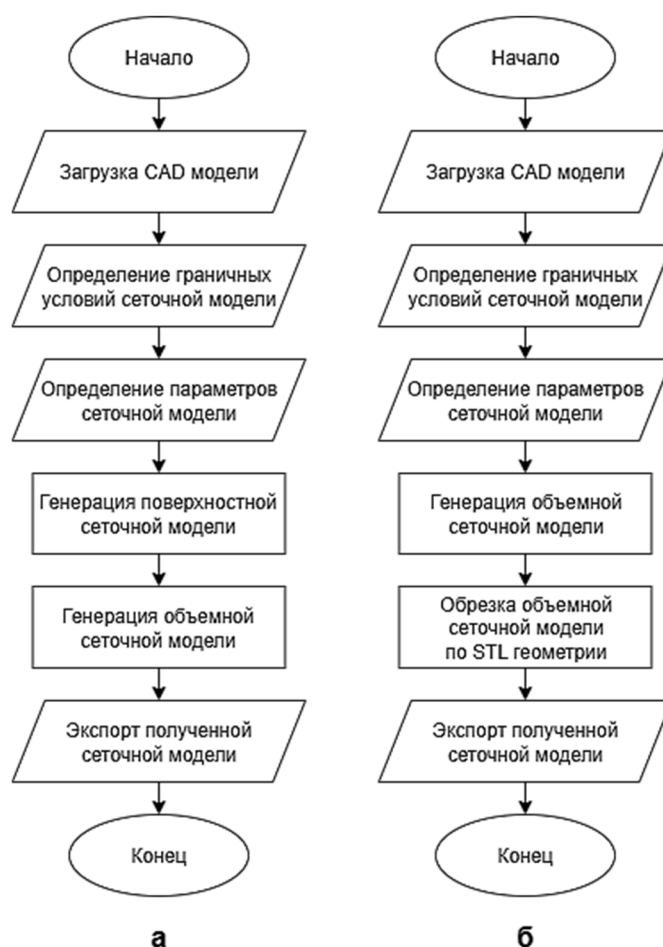


Рисунок 1. Сравнение блок-схем алгоритмов построения сеточных моделей

## Теория

В основе вычислительного модуля разрабатываемой программы, предназначенной для построения полиэдрических сеточных моделей, лежит геометрический метод, использующий архимедовы тела. Данный метод предполагает последовательное заполнение пространства многогранниками с учетом величины шага сетки – параметра, задаваемого пользователем. Генерация начинается с определения геометрических координат центров многогранников, составляющих модель. Координаты вершин многогранников находятся перестановкой значений, рассчитываемых на основе величины шага сетки и выбранного типа многогранника. Пример получаемой данным методом сеточной модели показан на рисунке 2, где бирюзовым изображены кубооктаэдр, а лиловым – октаэдр.

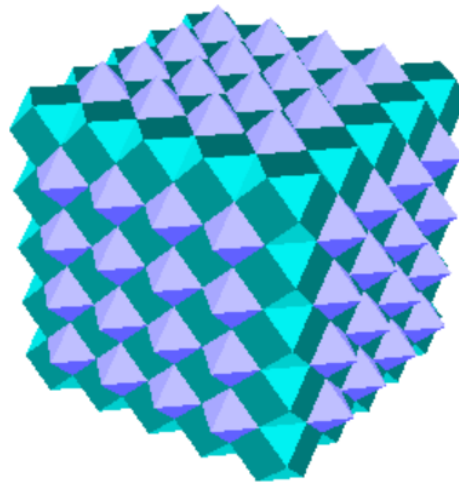


Рисунок 2. Сеточная модель на основе октаэдров и кубооктаэдров для куба

В результате сравнительного анализа различных сеточных моделей, генерируемых данным методом, было выявлено, что сеточная модель на основе октаэдров и кубооктаэдров является наиболее предпочтительной для вычислений, поскольку она обладает наибольшей информативностью в сравнении с другими рассмотренными моделями. Результаты данного анализа в том числе продемонстрированы на графике зависимости количества ячеек сетки  $N$  как меры ее информативности от шага  $a$  в логарифмическом масштабе (рис. 3), где под методом 1 понимается метод построения сеточной модели на основе усеченных октаэдров, 2 – октаэдров и кубооктаэдров, 3 – кубооктаэдров и ромбокубооктаэдров, 4 – усеченных октаэдров и усеченных кубооктаэдров.

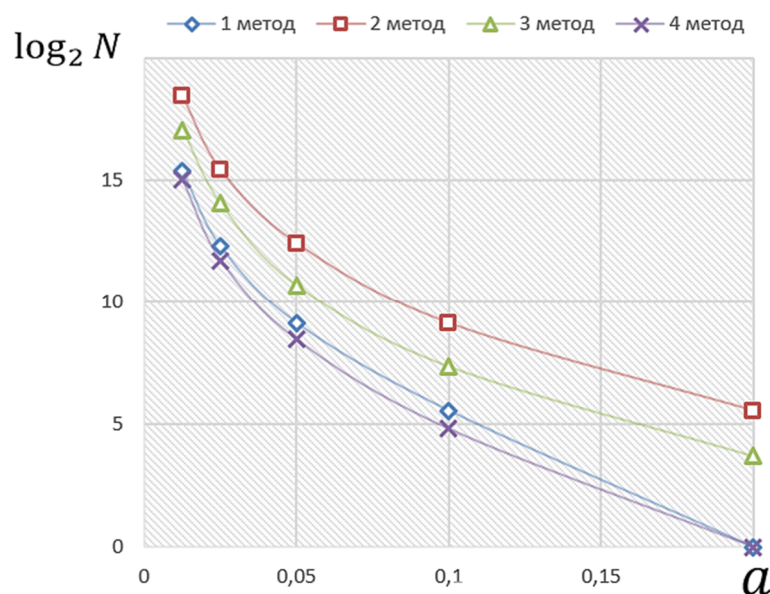


Рисунок 3. Зависимость количества ячеек сетки  $N$  от шага  $a$  для выбранного метода в логарифмическом масштабе

### Разработка модуля построения сеточной модели

Разработка модуля ведется с применением объектно-ориентированного подхода, в рамках которого были введены следующие сущности:

- вершина многогранника – точка в трехмерном пространстве, описываемая тремя значениями координат ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), для хранения которых используется тип данных с плавающей точкой, при этом точность вычислений определяется пользователем и ограничивается вычислительной архитектурой, на которой производится расчет;
- ребро многогранника – описывается двумя вершинами многогранника;
- грань многогранника – участок плоскости, описываемый вектором вершин, которые образуют замкнутый контур, и вектором нормали, который описывается тремя значениями и определяет ориентацию грани в пространстве;
- геометрическое граничное условие – описывается вектором граней;
- многогранник – ячейка сетки, которая описывается координатами центральной точки, значением длины ребра и видом многогранника (гексаэдр, октаэдр, кубооктаэдр и другие); в процессе обрезки многогранника геометрическим граничным условием вычисляются и преобразуются векторы его вершин и граней, обновленные значения запоминаются;
- сеточная модель – описывается вектором многогранников.

Алгоритм генерации сеточной модели модулем ранее был продемонстрирован в виде блок-схемы на рисунке 1б. Поясняя данную схему, отметим, что в качестве параметров сеточной модели программа принимает величину шага сетки и ее вид. Предполагается, что сгенерированная модель описывается векторами усеченных и обычных многогранников, причем для описания усеченных дополнительно вычисляются и хранятся значения их граней.

### Общая архитектура программы

На рисунке 4 показана общая архитектура разрабатываемой программы, где стрелками показаны два возможных режима ее работы: сплошной линией – режим построения сеточной модели, пунктирной линией – режим получения модели внешней системой.

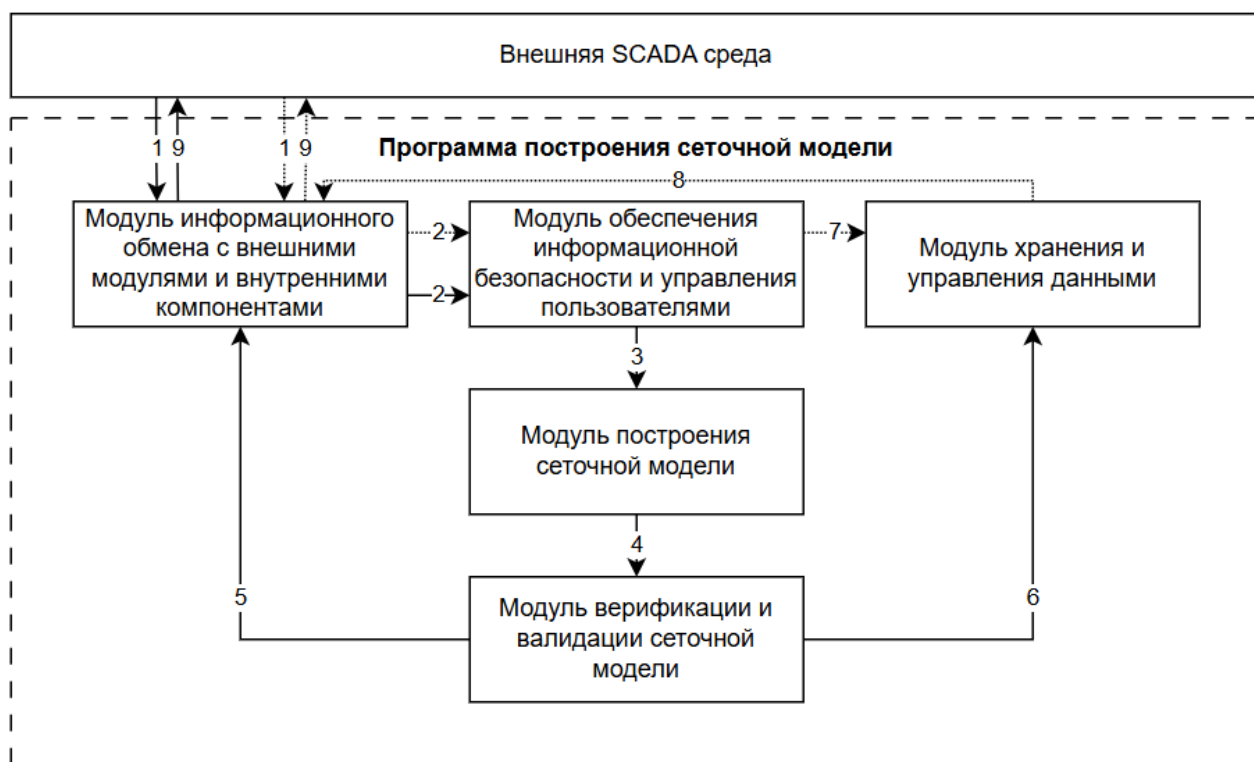


Рисунок 4. Общая архитектура разрабатываемой программы для построения октаэдрических сеточных моделей

Цифрами на стрелках отмечены следующие функциональные связи между модулями программы:

- 1) запуск программы,
- 2) авторизация пользователя и предоставление ему прав на основе ролевой модели,
- 3) настройка параметров и запуск расчета сеточных моделей,
- 4) запуск верификации и валидации сеточных моделей,
- 5) возврат статуса процесса построения модели внешней системе,
- 6) сохранение результатов моделирования совместно с параметрами расчетов в библиотеку результатов,
- 7) параметрический запрос результатов расчета внешней системой из библиотеки,
- 8) передача результатов расчета внешней системе,
- 9) выход из программы.

Задачи модулей программы приведены в таблице.

#### Задачи модулей программы построения октаэдрических сеточных моделей

№	Название модуля	Описание задачи
1	Модуль информационного обмена с внешними модулями и внутренними компонентами	Реализация API для внешних компонентов
		Реализация конвертеров форматов
		Поддержка версионности
2	Модуль обеспечения информационной безопасности и управления пользователями	Управление пользователями на основе ролевой модели
		Авторизация пользователей
		Аутентификация пользователей
		Журнализация событий
		Антивирусная защита
3	Модуль хранения и управления данными	Обеспечение механизмов ввода и вывода данных по запросу внешних и внутренних компонентов приложения или пользователя
		Обеспечение целостности данных
		Механизмы резервного копирования
4	Модуль построения сеточной модели	Подготовка полиэдрической сеточной модели в рамках заданных граничных условий
5	Модуль верификации и валидации сеточной модели	Проверка сгенерированной модели на соответствие заданным условиям

Приведем краткое описание сценариев функционирования разрабатываемой программы. Режим построения сеточной модели можно описать последовательностью следующих шагов:

- 1) авторизация пользователя, получение прав на основе ролевой модели,
- 2) настройка параметров расчета сеточных моделей,
- 3) построение сеточной модели на основе введенных параметров,
- 4) верификация и валидация сеточной модели,
- 5) сохранение результатов расчета совместно с его параметрами в библиотеку результатов,
- 6) завершение сеанса работы.

В режиме получения расчетной модели последовательно выполняются следующие шаги:

- 1) авторизация пользователя, получение прав на основе ролевой модели,
- 2) параметрический запрос результатов расчета внешней системой из библиотеки,
- 3) передача результатов расчета внешней системе,
- 4) завершение сеанса работы.

#### Выводы

Разработан геометрический метод построения сеточных моделей на основе архимедовых тел. Разработана общая архитектура программного обеспечения, предназначенного для построения сеточных моделей, на основе данного метода. Сформулированы основные принципы разработки вычислительного модуля построения сеточных моделей.

**Список литературы**

1. Arocena V. M., Danao L. A. M. Improving the Modeling of Pressure Pulsation and Cavitation Prediction in a Double-Volute Double-Suction Pump Using Mosaic Meshing Technology // Processes. 2023. Vol. 11, iss. 3. P. 660. DOI: 10.3390/pr11030660; EDN: SUEJNA
2. Численное моделирование гидродинамических процессов в тракте теплоносителя заборного теплообменного аппарата / А. М. Белов, С. С. Гоняева, В. В. Кожемякин, Н. А. Морозов // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4-2(58). С. 87–91. DOI: 10.37220/MIT.2022.58A.010; EDN: CUXPXM
3. Февральских А. В. Проектирование аэродинамической компоновки скоростного амфибийного судна с использованием технологий цифрового двойника // Морской вестник. 2021. № 3(79). С. 14–19. EDN: PPIAOV