

УДК 519.6

## МОДУЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ЯДРА GeoCore ПАКЕТА ПРОГРАММ "3D-РНД"

Д. В. Логинов

(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области)

Приводится общее описание библиотеки геометрического ядра GeoCore, используемой для расчета в пакете программ 3D-РНД начальных данных задач математической физики в трехмерной постановке. Геометрическое ядро предназначено для импорта и обработки трехмерных геометрических моделей, спроектированных в САПР. Для трехмерной модели в геометрическом ядре используется граничное представление. Геометрическое ядро реализовано в виде программной библиотеки и предоставляет интерфейс доступа к имеющимся возможностям по обработке трехмерных геометрий. Это позволяет использовать GeoCore как в 3D-РНД, так и других программах. Представлены результаты применения геометрического ядра в пакете программ 3D-РНД.

*Ключевые слова:* пакет программ 3D-РНД, геометрическое ядро GeoCore, граничное представление, тесселяция.

### Введение

Одним из компонентов технологии подготовки начальных данных для численного моделирования задач математической физики в трехмерной постановке является пакет программ 3D-РНД (далее *программа 3D-РНД*) [1, 2]. С использованием 3D-РНД строятся сетки и рассчитываются начальные данные для методик, численно моделирующих физические процессы в различных постановках — лагранжевой, лагранжево-эйлеровой и эйлеровой, в последних двух — с применением или без применения метода концентраций веществ [3].

Особенностью программы 3D-РНД является то, что она позволяет проводить в интерактивном режиме расчет начальных данных (РНД) для трехмерных задач, не обладающих свойством симметрии. Одним из требований к 3D-РНД является максимальное единообразие вводимых данных для сокращения времени задания информации при проведении расчетов одной и той же задачи по разным математическим пакетам программ. При этом особенности конкретной методики учитываются на этапах задания параметров пространственных сеток (структурированных и неструктурированных) и при расчете сеток и сеточных величин.

Сквозная технология проведения РНД состоит из нескольких этапов:

- 1) построение геометрической модели задачи в САПР;
- 2) импорт геометрии задачи в программу 3D-РНД;
- 3) задание наборов областей, параметров сетки, начальных и граничных условий в диалоговом режиме в программе 3D-РНД;
- 4) построение сеток и расчет сеточных величин, как правило, на многопроцессорной ЭВМ;
- 5) запись результатов РНД в формате, доступном для всех расчетных методик;
- 6) анализ рассчитанных данных с помощью интерактивной визуализации.

Для импорта и обработки трехмерной геометрической модели программа 3D-РНД использует программную библиотеку геометрического ядра GeoCore (далее *геометрическое ядро*).

### Структура библиотеки

Геометрическое ядро разрабатывалось как специализированный инструмент для работы с трехмерными геометрическими моделями при

проведении РНД. Тем самым были определены основные возможности библиотеки, используемые в генераторах сетки и модуле расчета объемных концентраций. Это импорт геометрических моделей из САПР, получение информации о структуре и свойствах геометрической модели, выполнение операций пересечения геометрических объектов, построение тесселяции (аппроксимация граней тел треугольниками для отображения геометрической модели подсистемой визуализации программы 3D-РНД). Геометрическое ядро включает в себя программную реализацию математических алгоритмов обработки трехмерной геометрии.

Импорт и обработка геометрических моделей выполняются без упрощений. Современные геометрические (сборочные) модели, обрабатываемые геометрическим ядром, зачастую содержат несколько тысяч деталей.

Главной частью геометрической модели является описание формы моделируемого объекта. В геометрическом ядре GeoCore используется граничное представление (b-ger, boundary representation), позволяющее описывать и моделировать трехмерные объекты произвольной формы и сложности [4, 5].

Описание трехмерного тела с помощью граничного представления опирается на топологические объекты: это вершина, ребро, контур, грань и оболочка (совокупность стыкующихся по границам поверхностей).

Твердое тело представляет собой совокупность замкнутых оболочек. Оболочки описываются по единым правилам и состоят из набора граней. Грани, ребра и вершины строятся на базе элементарных геометрических объектов (точек, кривых и поверхностей) добавлением к ним информации об их соседях и взаимной ориентации.

Геометрические объекты в ядре подразделяются на три основных типа: точки, кривые и поверхности. Они реализованы в виде иерархии классов C++.

Объект класса кривой задает параметрическую кривую в пространстве как векторную функцию одной переменной (параметра) и определяет набор методов для вычисления:

- точки кривой по ее параметру;
- первой и второй производной в точке;
- кривизны кривой в точке;
- точки кривой, ближайшей к заданной (получение проекции).

В библиотеке реализованы следующие типы кривых: прямая линия, дуга окружности, дуга эллипса, дуга параболы, дуга гиперболы, кубический сплайн, сплайн NURBS [6].

Класс обобщенной поверхности задает параметрическую поверхность в трехмерном пространстве как векторную функцию двух переменных и определяет набор методов, обеспечивающих вычисление:

- точки поверхности по ее параметрам;
- нормали к поверхности;
- проекции точки на поверхность (параметров проекции);
- частных производных и производных по направлениям.

В библиотеке реализованы следующие типы поверхностей: плоскость, коническая, цилиндрическая, сферическая и тороидальная, линейчатая, поверхность вращения с образующей в виде обобщенной кривой (обычно сплайны), поверхность выдавливания с образующей в виде обобщенной кривой (обычно сплайны), поверхность скругления, бикубическая сплайновая, NURBS, цилиндрическая сплайновая (бикубическая сплайновая поверхность, заданная в цилиндрических координатах) [6].

Описанные типы кривых и поверхностей активно используются при построении трехмерных моделей в современных САПР.

Библиотека геометрического ядра имеет модульную структуру, что облегчает сопровождение и развитие программной библиотеки. Операции обработки геометрии, реализующие различные алгоритмы, выделены в отдельные модули, зависящие от модели данных ядра. Ниже приводится описание основных модулей библиотеки.

**Модель данных** — обеспечивает хранение и предоставляет доступ к объектам геометрической модели. Используемый при реализации модели объектно-ориентированный подход позволил выделить различные уровни топологических и геометрических объектов, а также алгоритмов обработки геометрии.

**Модуль трансляции** — обеспечивает импорт геометрической модели, представленной в нейтральном формате САПР. Позволяет сохранить геометрическую модель во внутреннем бинарном формате модели данных геометрического ядра.

**Модуль тесселяции** — реализует алгоритм построения поверхностной триангуляции граней тела, ориентированной на визуализацию геометрической модели. Набор треугольников, построенных модулем, используется программой 3D-РНД для отображения трехмерной геометрии.

**Модуль проецирования** — реализует операции по нахождению проекций точек на кривые и поверхности. Проецирование является базовой операцией по отношению к геометрическим объектам и используется другими модулями обработки геометрии, в частности модулем пересечений и модулем тесселяции.

**Модуль пересечений** — реализует алгоритмы нахождения точек пересечения кривых с поверхностями, телами, сборочными моделями.

**Модуль построения сечений** — реализует алгоритмы построения плоских сечений сборочной модели.

### Алгоритмы библиотеки

Ниже приведено описание некоторых алгоритмов, используемых программой 3D-РНД для проведения расчетов сеток и концентраций. Поскольку статья имеет обзорный характер, ограничимся алгоритмами модуля тесселяции и модуля пересечений (на примере пересечения прямой и геометрической модели).

**Алгоритм тесселяции (триангуляции) поверхностей.** Под *тесселяцией* поверхности понимается аппроксимация поверхности набором полигонов. В рассматриваемом случае используются треугольники с учетом границ грани. Модуль тесселяции позволяет построить полигональное представление всей геометрической модели, которое используется для визуализации и геометрических расчетов. Тесселяция в геометрическом ядре GeoCore выполняется в плоскости параметров поверхностей.

Так как главное назначение тесселяции — это использование ее в подсистеме визуализации 3D-РНД, то основное внимание обращено на скорость выполнения алгоритма и точность описания поверхности, а не на качество самих элементов (треугольников). Точность аппроксимации поверхности может варьироваться и в текущей реализации задается относительно размеров

тела сборочной модели. В качестве алгоритма тесселяции был реализован алгоритм триангуляции параметрической грани, использующий подходы, представленные в работах [7, 8]. Пример поверхностной триангуляции, построенной с использованием модуля тесселяции геометрического ядра GeoCore, представлен на рис. 1 (см. также цветную вкладку).

**Определение пересечений геометрических объектов.** Для построения пространственных сеток и расчета распределения веществ в ячейках сетки недостаточно методов навигации по геометрической модели и вычислений базовых характеристик геометрических объектов. При проведении РНД в части обработки геометрии необходимы методы определения пересечения линий расчетной сетки и геометрии задачи, классификация пространственных точек относительно тел сборочной модели и т. п. Указанные средства обработки трехмерной геометрии реализованы в геометрическом ядре в виде модуля пересечений.

Данный модуль включает в себя логику библиотеки, связанную с пересечениями ее элементов. В нем выделены геометрическая (аналитическая) и топологическая части. К геометрической части относятся два набора алгоритмов: определяющих пересечения пространственных кривых и поверхностей и пересечения поверхностей между собой. Оба набора сгруппированы по типам поверхностей и имеют собственный программный интерфейс. К топологической части модуля пересечения относится модуль пересечения прямой и сборочной модели (сборки).

Основной целью алгоритма пересечения прямой и сборки является получение разбиения прямой линии на порции (данное требование обусловлено особенностями генератора сеток 3D-РНД). Под порцией подразумевается часть прямой, которая целиком принадлежит одному из тел геометрии. Схематично разбиение прямой линии на порции представлено на рис. 2.

Рассмотрим структуру и принципы работы данного алгоритма.

Получение порций пересечения прямой и сборки осуществляется в несколько этапов:

- 1) получение точек пересечения прямой и каждой из граней тела;
- 2) группировка найденных точек в точки пересечения с телом, получение порций по этим точкам;

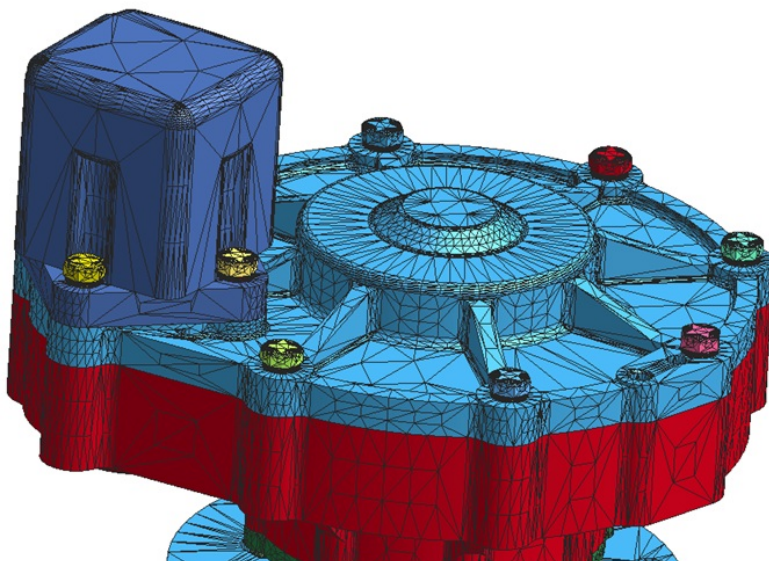


Рис. 1. Пример поверхностной триангуляции

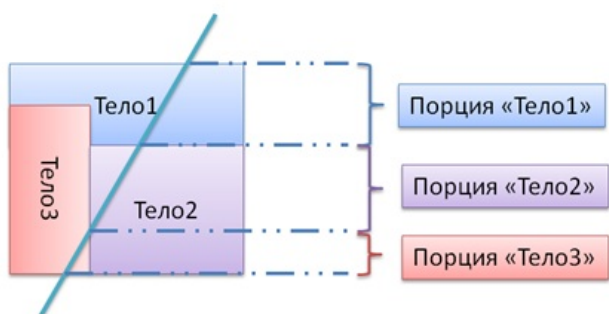


Рис. 2. Разбиение прямой линии на порции

- 3) группировка порций по всем телам сборки в порции уровня сборки.

Для получения информации о точках пересечения прямой и грани тела используется набор операций пересечения прямой и параметрической поверхности, а также методы, вычисляющие характеристики геометрических объектов. Среди методов ядра библиотеки GeoCore особую роль играет метод, определяющий принадлежность точки грани тела (грань представляет собой часть поверхности, ограниченную контуром из ребер). Он необходим для того, чтобы из найденных точек параметрической поверхности выделить те, которые принадлежат данной грани.

Пусть при нахождении точек пересечения для разных поверхностей (граней тела) было найдено подмножество точек, находящихся друг от друга на заданном небольшом расстоянии. Точ-

ки каждого такого подмножества с определенной точностью совпадают и образуют так называемую *точку сгущения*. Геометрически такая точка лежит на ребре (вершине) тела либо расположена в месте соприкосновения граней тела. Характеристиками точки сгущения являются тип, нормаль, информация о "хозяине" (если это ребро или вершина тела) и параметр кривой. Нормаль в такой точке считается как сумма нормалей по всем точкам, из которых она формируется. Что касается типа точки сгущения, то она может быть либо точкой касания тела, либо точкой пересечения с телом. Для определения типа точки используются характеристики точек, из которых формируется точка сгущения.

После того как все точки сгущения обработаны, из рассмотрения убираются точки касания тела, а все остальные упорядочиваются в порядке возрастания параметра прямой. Далее из оставшихся точек, начиная с первой, формируются порции. Началом порции является точка входа прямой в тело, концом — точка выхода прямой из тела.

Результаты выполнения алгоритма пересечения прямой и тела записываются в контейнер порций. Элемент этого контейнера содержит участок прямой и список тел, которому принадлежит этот участок (список будет пуст, если участок не принадлежит ни одному из тел геометрии).

Алгоритм пересечения прямой и сборочной модели отвечает за объединение порций по всем

телам сборки в единый контейнер, содержащий разбиение прямой на непересекающиеся участки. Формирование такого контейнера осуществляется в три этапа. Сначала получают порции по всем телам сборки. Затем определяется, есть ли порции, имеющие общие участки прямой (такое возможно, если прямая проходит в месте соприкосновения тел или в месте вытеснения одного тела другим). Если такие порции есть и их участки совпадают, то они собираются в один элемент *порция*, если нет, то разбиваются на несколько участков и распределяются по отдельным элементам. После того, как наложения локализованы в отдельных элементах, производится добавление участков прямой, которые не принадлежат ни одному из тел сборки.

### Результаты использования GeoCore в программе 3D-РНД

Основное назначение геометрического ядра в программе 3D-РНД — это получение информации о геометрических объектах, построение поверхностной триангуляции модели для ее визуализации и использование генератором расчетных сеток и модулем распределения веществ.

При построении сетки учитываются требования методик к типу сетки и математической постановке задачи. В зависимости от постановки задачи при построении сетки границы раздела веществ могут учитываться (проходить по линиям сетки) или не учитываться.

В случае, когда границы раздела веществ проходят по линиям сетки, в каждую ячейку заносятся начальные данные одного вещества. Если границы раздела веществ проходят не по линиям сетки, в смешанных ячейках сетки рассчитываются объемные концентрации веществ, с помощью которых выделяются границы между веществами. В этом случае расчет концентраций веществ в ячейках сетки занимает основное время выполнения программы 3D-РНД, поскольку активно используются ресурсоемкие операции геометрического ядра (нахождение пересечений геометрических объектов, классификации точек относительно тел и т. п.). На рис. 3 (см. также цветную вкладку) представлены геометрическая модель и расчетная сетка с рассчитанными объемными концентрациями (смешанные ячейки отмечены белым цветом).

### Заключение

Для численного моделирования задач математической физики в трехмерной постановке разработано и реализовано геометрическое ядро, используемое при расчете начальных данных по программе 3D-РНД. Приведено описание архитектуры геометрического ядра и его основных алгоритмов, используемых при генерации расчетных сеток. Статья имеет обзорный характер и не раскрывает математических аспектов реализованных алгоритмов. Это, по мнению автора, является темой отдельной работы.

Геометрическое ядро прошло стадии формирования требований, проектирования, реализации, тестирования и внедрения, находится на этапе эксплуатации и сопровождения, позволяя проводить расчет начальных данных для трехмерных задач, геометрия которых моделируется в САПР.

### Список литературы

1. Тарасов В. И., Ребров С. В., Волгин А. В., Потехин А. Л., Черенков П. В., Потехина Е. В., Будников В. И., Марунин А. В., Аверина Н. С. Расчет начальных данных трехмерных задач по программе 3D-РНД // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2006. Вып. 3. С. 66–71.
2. Олесницкая К. К., Потехин А. Л., Потехина Е. В., Тарасов В. И. Методы ускорения расчета начальных данных по комплексу программ 3D-РНД при численном моделировании задач математической физики в параллельном режиме // Там же. 2015. Вып. 2. С. 49–58.
3. Бахрах С. М., Глаголева Ю. И., Самигулин М. С. Расчет газодинамических течений на основе метода концентраций // Докл. АН СССР. 1981. Т. 257, № 3. С. 566–569.
4. Голованов Н. Н. Геометрическое моделирование. М.: ИНФРА-М, 2016.
5. Hoffmann C. M. Geometric and Solid Modeling. San Mateo, Calif.: Morgan Kaufman, 1989.
6. Farin G. E. Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design. A Practical Guide. 3rd Edition. Boston: Academic Press, 1993.

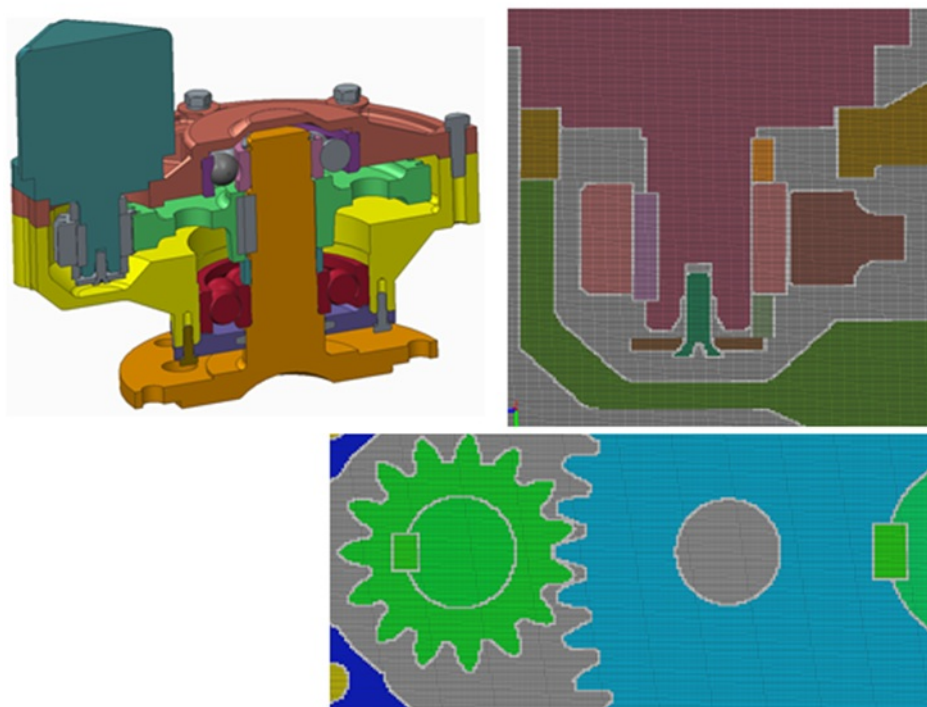


Рис. 3. Геометрическая модель и фрагменты прямоугольной структурированной сетки с рассчитанными объемными концентрациями

7. Balazs A., Guthe M., Klein R. Efficient Trimmed NURBS Tessellation. University of Bonn, 2004.
8. Klein R., Straber W. Large Mesh Generation from Boundary Models with Parametric Face Representation // Proc. of ACM SIGGRAPH

Symposium on Solid Modeling, 1995. Salt Lake City, 1995. P. 431–440.

Статья поступила в редакцию 06.04.18.

MODULE OF GEOMETRIC CORE GeoCore IN "3D-RND" PROGRAM PACKAGE /  
D. V. Loginov (FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov, N. Novgorod region).

The general description of the GeoCore geometric core library used in the 3D-RND program package to calculate initial data for 3D computational physics problems is presented. The geometric core is used to import and process three-dimensional geometric models created using CAD software. A 3D model has the boundary representation in the geometric core. The library architecture and key algorithms used to generate a computational grid for a problem and calculate the volume concentration of materials in its cells are described. The geometric core has been implemented as a program library and represents by itself an interface for access to the available 3D geometry processing capabilities. This allows using GeoCore both in the 3D-RND program and other programs. Results of using the geometric core in the 3D-RND package are given.

*Keywords:* 3D-RND program package, geometric core GeoCore, boundary representation, tessellation.