

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ 3D РАСЧЕТНЫХ СЕТОК ЛИСТОВОЙ СТРУКТУРЫ НА БАЗЕ ОТКРЫТЫХ CAD/CAE КОДОВ

*С.Е. Исламгулова, А.И. Тайнов, Н.Л. Фролова*

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики,  
Снежинск

Трёхмерные регулярные сетки листовой топологии широко применяются в численном моделировании, в том числе в РФЯЦ-ВНИИТФ [1][2]. В данном докладе представлен вариант построения листов, которые разворачиваются вокруг заданной оси вращения. При 3D моделировании в лагранжево-эйлеровых переменных регулярная сеточная модель представляет собой последовательность двумерных лагранжевых сеток (листов), а третье направление между листами является эйлеровым, как показано на рисунке 1. Использование именно листовой топологии сетки зачастую является принципиальной особенностью численного метода.

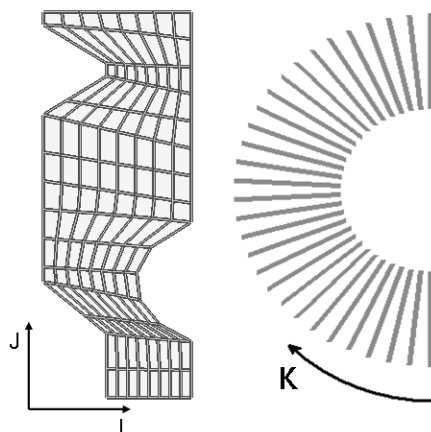


Рисунок 1 – Листовая топология сетки.

В случае 3D моделирования в лагранжевых переменных на регулярной сетке, зачастую рационально строить сетки с листовой структурой, особенно, когда геометрия модели находится далеко от оси листовой развёртки. Во многих случаях построение шестигранной топологии граничных поверхностей на сложной геометрии целевой области затруднительно или же невозможно (пример представлен на рисунке 2).

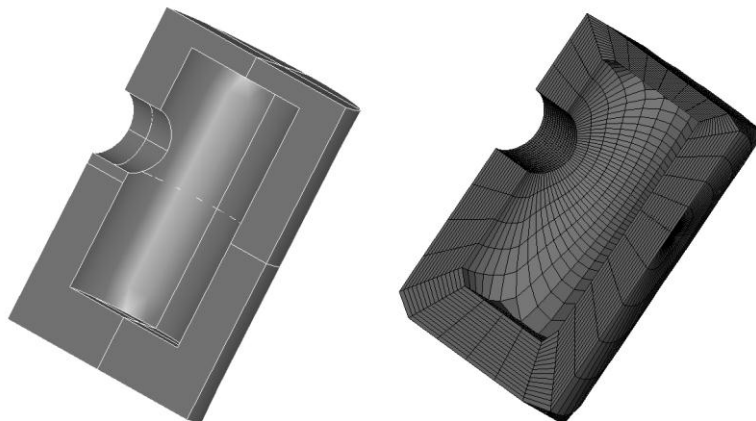


Рисунок 2 – Геометрическая модель и её сеточная аппроксимация с помощью листов.

Также листовой способ построения сетки удобно применять при декомпозиции целевой области на подобласти. При удобной геометрии некоторых подобластей можно применить листовой способ, а для остальных подобластей вести построение сетки другими методами. После этого можно объединить сетки в подобластях в одну сеточную регулярную область. Такой способ можно назвать смешанным.

Широкое применение расчетных сеток листовой топологии и сложность моделей приводят к необходимости совершенствования инструментов для их построения. В связи с этим была реализована технология построения листовых сеток в рамках платформы Salome [3]. Предыдущие результаты адаптации и модификации платформы Salome приводятся в работе [4].

Разработанная авторами в рамках платформы Salome технология построения сетки листовой топологии, после создания геометрической модели, включает в себя следующие этапы:

1. Определение топологии модели.
2. Построение набора сечений модели.
3. Построение сетки в листах.
4. Сохранение сетки.

На первом этапе необходимо провести анализ геометрической модели и, исходя из требуемого результата, выделить ряд оболочек (4, 3 или 2 оболочки), которые будут определять топологию плоской сетки в сечении, а далее и топологию финальной трехмерной сетки. Оболочка представляет собой одну или несколько граней геометрической модели и определяется посредством создания в Salome объекта типа «Shell». На рисунке 3 показана геометрическая модель и вариант выделения топологических оболочек.

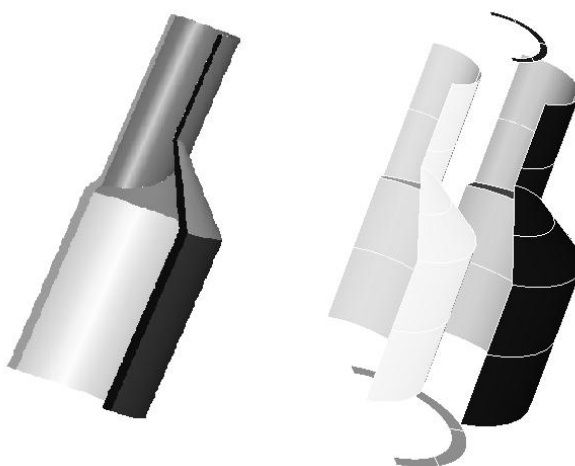


Рисунок 3 – Определение топологии модели.

На следующем этапе строится набор сечений (листов) геометрической модели. Для создания набора сечений модели необходимы следующие данные:

- оболочки модели, созданные на предыдущем этапе;
- секущая плоскость;
- ось вращения секущей плоскости;
- количество листов;
- величина угла разворота.

Задание параметров реализовано в диалоге, приведенном на рисунке 4. Выбор оболочек, секущей плоскости и оси вращения возможен выделением объекта в окне просмотра (вьювере) или в дереве объектов.

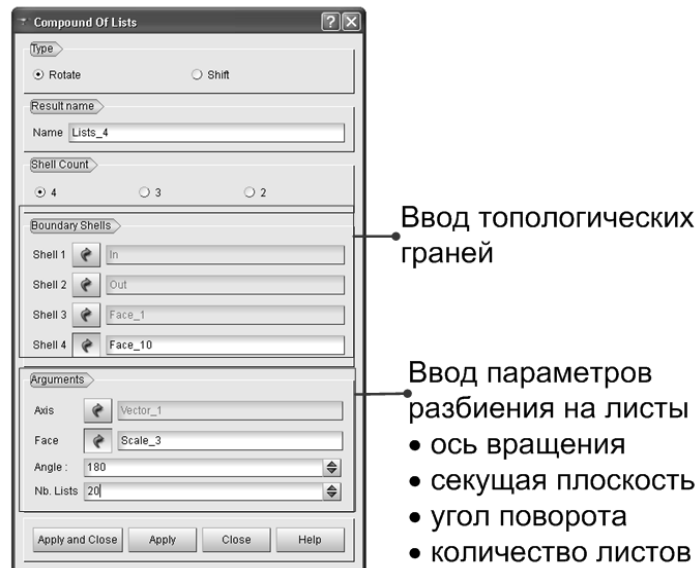


Рисунок 4 – Диалог создания набора листов

Набор листов формируется сечением секущей плоскостью топологических оболочек с последующим поворотом секущей плоскости вокруг оси вращения до достижения заданного угла. На рисунке 4 (слева) изображены исходные объекты для построения сечений – оболочки, секущая плоскость и ось вращения. При построении используются функции геометрического ядра OpenCascade [5]. Примеры созданных наборов листов представлены на рисунке 4 (в центре и справа).

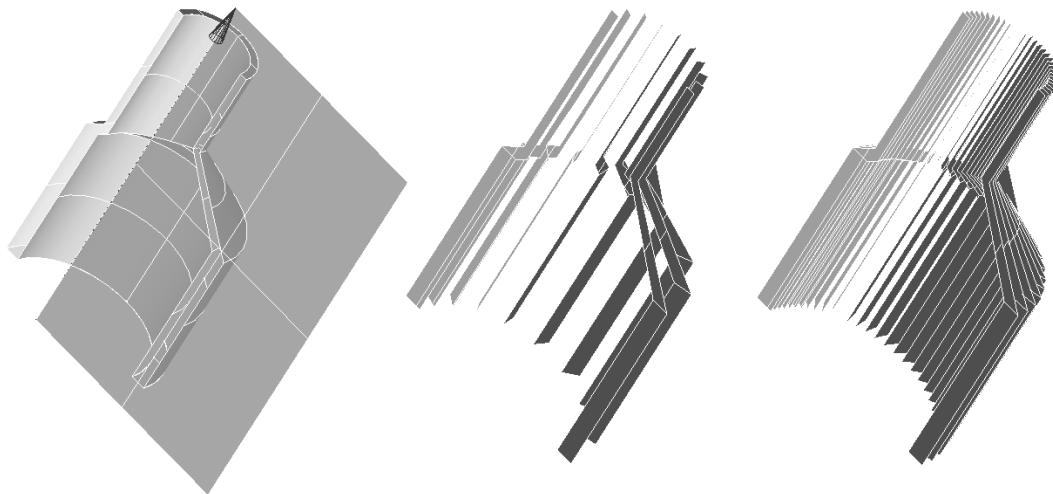


Рисунок 5 – Объекты для построения листов (слева), наборы из 10 (в центре) и 30 (справа) листов.

Полученный набор сечений является геометрическим объектом, на котором необходимо построение 2D сетки. Сначала строится промежуточный набор 2D сеток по геометрии сечений, а затем 2D сетки преобразуются в целевую трехмерную сетку.

Для построения сетки используется стандартная для Salome процедура – выбор объекта и определение через диалоги условий дискретизации. Внешний вид диалогов задания сеточных параметров приведен на рисунке 6.

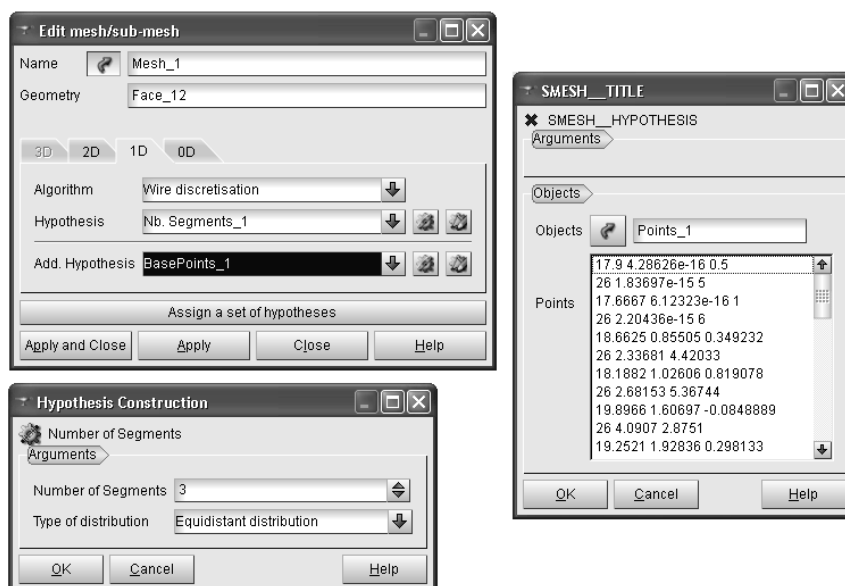


Рисунок 6 – Диалоги задания сеточных параметров

После выбора сеточных алгоритмов и определения условий дискретизации, производится построение набора 2D сеток. На рисунке 7 приведен пример результата вычислений: слева изображена сетка на одном листе, справа – весь набор листов с построенными сетками.

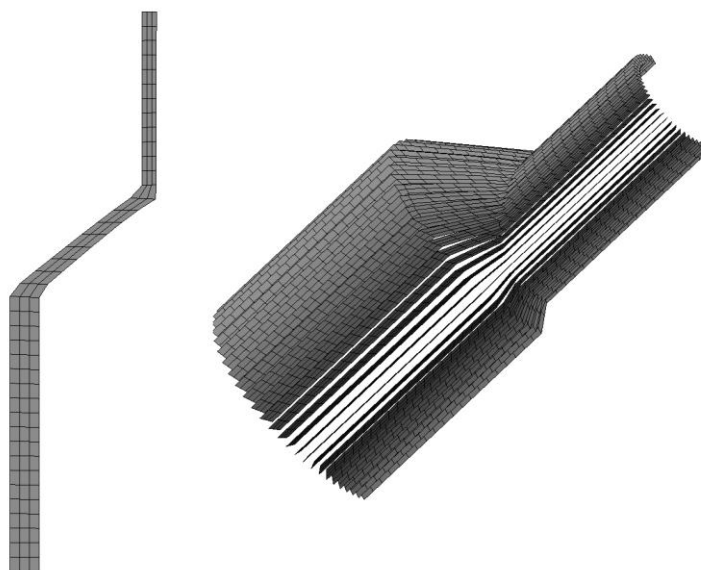


Рисунок 7 – Промежуточная листовая сетка: слева – одного листа, справа – набор листов с построенными сетками.

На рисунке 8 представлена результирующая трехмерная сетка, построенная по набору 2D сеток. Результирующая расчетная сетка может быть сохранена в файл в одном из сеточных форматов Salome (dat, unv, med) или в файл в формате hdf.

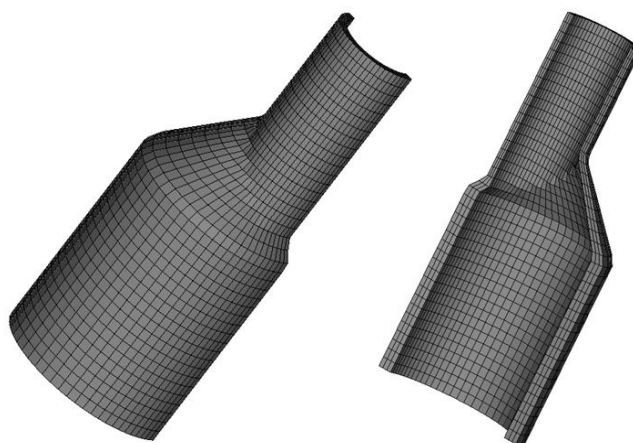


Рисунок 8 – Трехмерная сетка листовой топологии

Таким образом, осуществляется построение и запись трехмерных сеток листовой топологии в рамках платформы Salome. Все этапы технологии построения сетки выполняются непосредственно из интерфейса пользователя программы. Интерактивность позволяет пользователю контролировать каждый шаг процесса и своевременно фиксировать ошибки, а этапность технологии дает возможность сохранять результаты работы промежуточных шагов. На рисунке 9 изображен интерфейс пользователя Salome с загруженной геометрией модели и с построенной 3D сеткой.

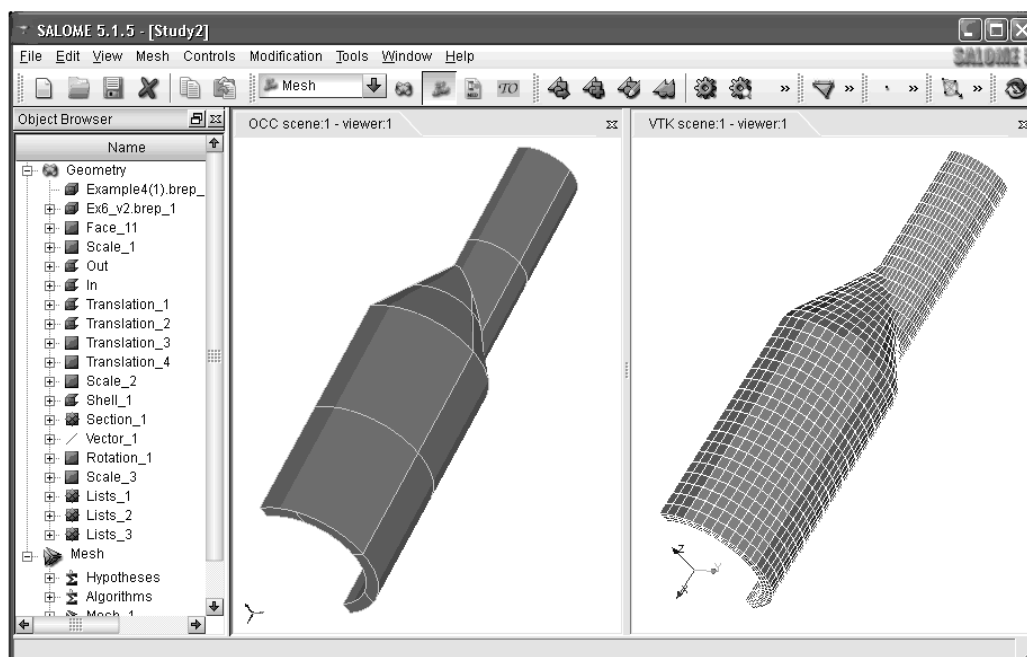


Рисунок 9 – Интерфейс пользователя Salome с отображением загруженной геометрии и с построенной сетки

В процессе реализации и внедрения представленной технологии в программный комплекс Salome был решен ряд взаимосвязанных задач проектирования и программирования. Среди них можно выделить следующие:

1. Размещение собственных компонент в архитектуре Salome.
2. Построение набора сечений.
3. Формирование топологического ребра.
4. Распределение сеточных параметров по набору листов.
5. Преобразование нерегулярной структуры представления сеточных данных в регулярную структуру.

Размещение новых классов, модулей, компонент в архитектуре Salome является задачей проектирования, при этом схема общей архитектуры программы скрыта от программиста. Подобная ситуация характерна при модификации приложений с открытым кодом. Также стоит отметить наличие в Salome промежуточного программного обеспечения – инструмента распределения CORBA, что вносит дополнительные трудности при создании новых программных дополнений.

В процессе построения листов можно выделить следующий набор сущностей: геометрия и топология модели, параметры построения, расчетная сетка, генератор сеток. Под генератором понимается абстрактный механизм, выполняющий построение сетки, остальные сущности относятся к входным и выходным данным. В свою очередь программная архитектура Salome предоставляет модули, в которые может быть интегрирован сторонний код: Kernel, GUI, Geometry, Mesh. Кроме того, модули Geometry и Mesh содержат отдельные структурные элементы, отвечающие за вычисления и интерфейс пользователя.

На рисунке 10 представлена схема расположения сущностей процесса относительно модулей. Абстрактный генератор в данном случае распределяется по модулям: в модуле Geometry определяется топология модели и выполняется построение набора сечений, в модуле Mesh происходит построение сетки, разбор ее структуры и сохранение в файл.

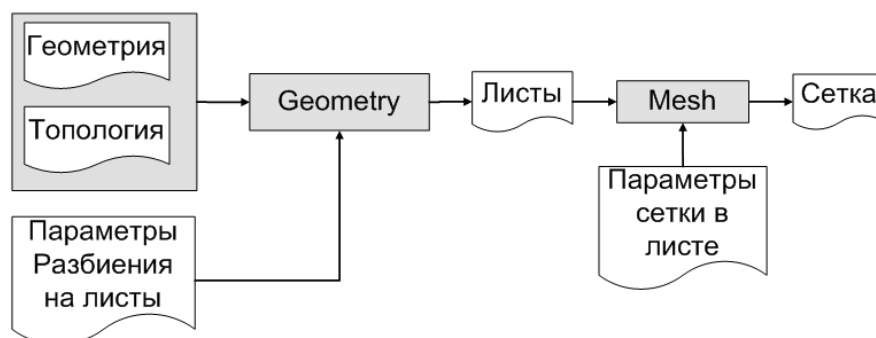


Рисунок 10 – Сущности процесса построения листовой сетки.

Операция построения набора сечений была интегрирована в Salome как операция создания нового геометрического объекта. Данная операция была реализована в двух вариантах. В первом случае все вычисления производятся средствами геометрического ядра OpenCascade в Kernel-части модуля Geometry. Из GUI-части осуществляется только вызов функции. При таком подходе взаимодействие программных компонент через CORBA сводится к минимуму. В то же время реализация построения набора сечений средствами OpenCascade требует глубокого понимания данной библиотеки и тщательную пошаговую отладку функции. Данный вариант схематично представлен на рисунке 11 (вверху).

В другом варианте реализации построения сечений модели используются функции модуля Geometry, которые также написаны с использованием OpenCascade. Преимуществом в данном случае является то, что разработчики Salome учитывали особенности OpenCascade, характерные для реализованных в модуле Geometry операций. Также отличием данной реализации является более активное использование CORBA, как показано на рисунке 11 (внизу).

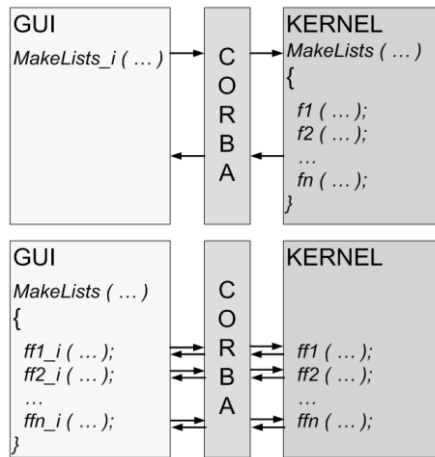


Рисунок 11 – Варианты реализации построения сечений модели.

На этапе построения набора сечений необходимо решить задачу формирования топологического ребра, как показано на рисунке 12. Такая необходимость возникает, когда в результате пересечения секущей плоскостью топологической оболочки получается несколько ребер и сеточный генератор должен создать на них необходимое одномерное разбиение на узлы.

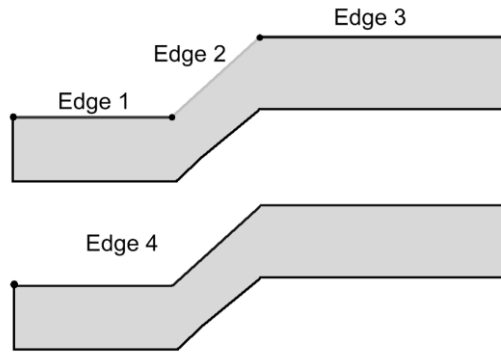


Рисунок 12 – Формирование топологического ребра

Данная задача может быть решена несколькими способами, в частности, в рамках данной технологии были реализованы два варианта (рисунок 13):

1. Объединение нескольких ребер в одно на уровне геометрического моделирования средствами библиотек OpenCascade.
2. Организация нескольких ребер в список с последующей передачей данного списка сеточному генератору.

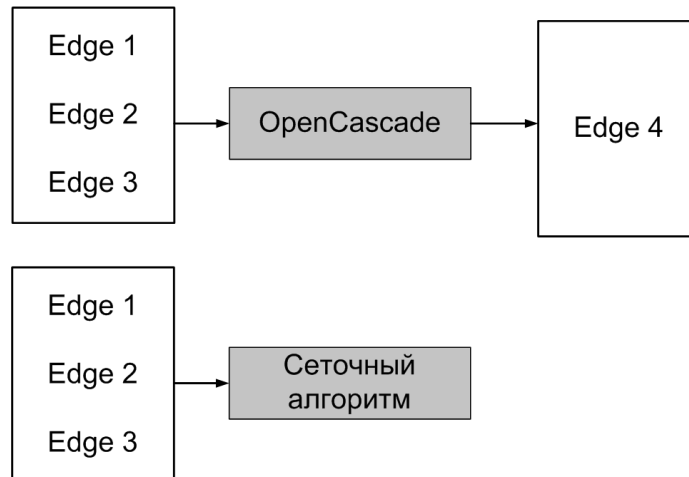


Рисунок 13 – Варианты объединения ребер

В случае объединения ребер на геометрическом уровне в результате всегда получается сечение, у которого четыре ребра. Такой объект можно передавать в сеточные генераторы Salome. Недостатком данного подхода является возможная потеря точности геометрической модели листа в точках стыковки ребер, поскольку при объединении используется аппроксимация сплайнами. Стоит отметить, что границы потери точности заданы, и ее значение известно.

Во втором случае для каждого топологического ребра создаются списки его геометрических составляющих. Затем они передаются сеточному генератору. В данном случае появляется необходимость в реализации дополнительного одномерного сеточного генератора для работы со списками ребер. Кроме того, наличие у каждого топологического ребра каждого листа списка с данными увеличивает объем хранимых и передаваемых данных. В текущей реализации в технологии применяется объединение ребер на геометрическом уровне.

Еще одним важным моментом в реализации технологии является процедура распределения сеточных параметров по набору листов, в частности, распределение одномерных законов дискретизации по топологически эквивалентным ребрам каждого листа. Используя базовую функциональность Salome достаточно просто задать глобальный одномерный закон дискретизации, согласно которому будет строиться сетка на всех ребрах. В том случае, если необходимо получить на разных ребрах разные сетки, что характерно для смежных ребер структурированной сетки, необходимо явно задавать условия разбиения для нужных геометрических объектов. В случае листовой сетки, по причине большого количества ребер, достаточно трудно выбрать в дереве объектов или выделить во вьювере все те ребра, на которых будет строиться одинаковое разбиение.

Для разрешения этой задачи была использована возможность объединения отдельных составляющих геометрической модели в группы, при этом для группы могут быть заданы условия построения сетки. В нашем случае имело смысл объединить в группы эквивалентные топологические ребра каждого листа. При построении набора сечений геометрической модели создаются четыре пустых группы ребер (все «верхние» ребра, все «левые» ребра и т.д.). Затем ребро, полученное в результате пересечения секущей плоскостью топологической оболочки, добавляется в соответствующую группу. Таким образом, при построении набора сечений, дополнительно создаются четыре группы ребер, для которых в последствии могут быть определены условия построения сетки. В дереве объектов Salome данные группы присутствуют как дочерние объекты набора листов. На рисунке 14 приведен интерфейс Salome: в дереве объектов рамкой выделены набор листов и его группы ребер, на вьювере представлены две смежных группы ребер, также показан диалог определения сеточных параметров для группы с именем «C\_7».



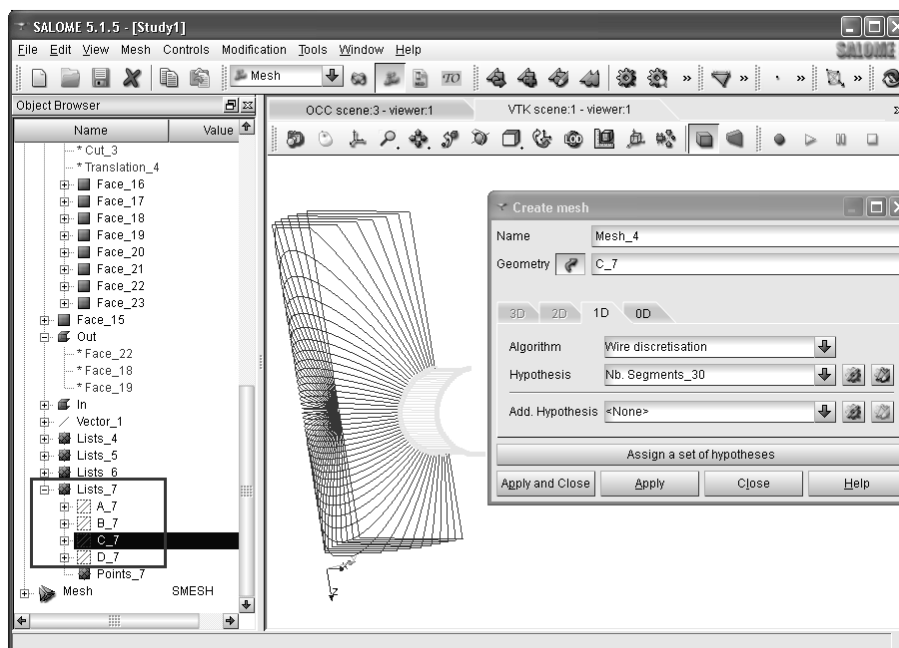


Рисунок 14 – Группы ребер набора листов

При наличии групп определение различных условий разбиения на ребрах значительно упрощается.

На завершающем этапе построения расчетной сетки листовой топологии необходимо из набора регулярных 2D сеток с нерегулярной структурой данных получить трехмерную сетку регулярной структуры. Данную задачу можно разбить на следующие:

1. Поиск базового топологического угла в листе.
2. Разбор нерегулярной структуры сеточных данных 2D сетки листа.

Определение базового топологического угла необходимо по причине несогласованности сеточных данных отдельных листов друг с другом. Выявление базовых узлов осуществляется с помощью вычислений расстояний между топологическими углами соседних листов и ряда дополнительных условий.

Разбор нерегулярной структуры сеточных данных в 2D сетке листа осуществляется посредством итераторов элементов и итераторов родительских и дочерних элементов, при этом разбор сетки начинается с найденного базового угла листа. Элементом может являться узел (0D), ребро (1D), грань (2D), ячейка (3D). Целевой структурой в данном случае является двумерный массив узлов.

Для приведения к окончательному виду, полученный набор двумерных регулярных сеток объединяется в трехмерный регулярный массив узлов. Данная структура может быть сохранена в файл разных форматов.

На рисунке 15 приведены примеры расчетных сеток листовой топологии, построенных в модифицированной версии Salome.

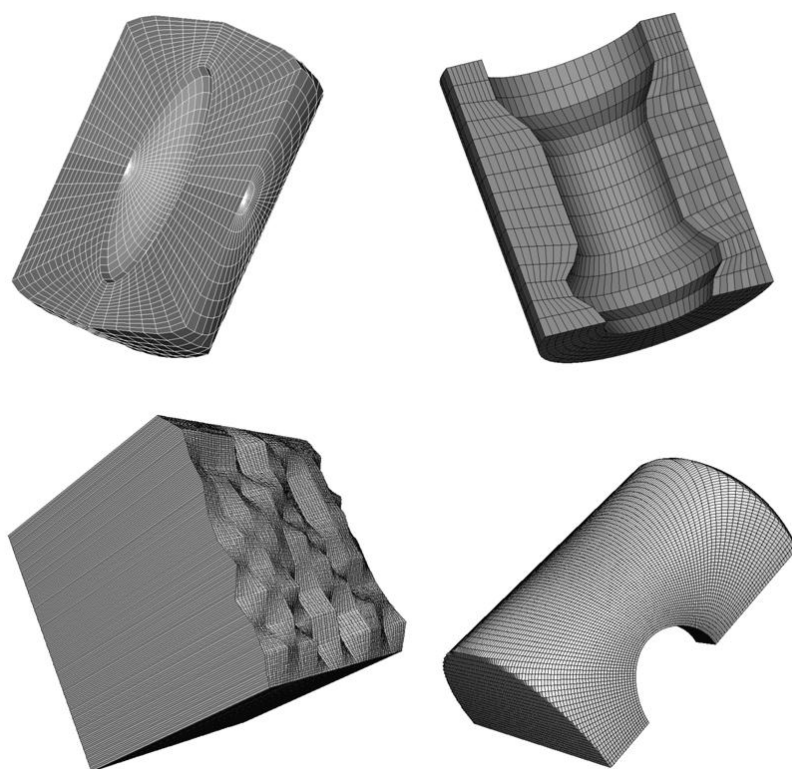


Рисунок 15 – Расчетные сетки листовой топологии.

Таким образом, в рамках программного комплекса 3D РНД на базе Salome реализована технология построения расчетных сеток листовой топологии. Данный инструмент расширяет область применения комплекса, и, в целом, дает возможность повысить эффективность процесса задания и расчета начальных данных.

1. Брагин А.А., Сучков В.А. Методика ГРАД для решения трехмерных нестационарных задач газовой динамики: Препринт № 178. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2000.
2. Anuchina N.N., Volkov V.I., Gordeychuk V.A. and others. Numerical simulations of 3d multi-component vortex flows by МАН-3 code // Advances in grid generation, Editor Ushakova O.V. New York: Nova, 2007. P.215-236.
3. SALOME platform for numeric simulation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.salome-platform.org>. – Загл. с экрана.
4. В.Л.Александров, Т.М.Егорова, С.Е.Исламгулова и др. Некоторые результаты адаптации и развития ПО SALOME для решения задачи формирования и расчета начальных данных // XII международный семинар «Супервычисления и математическое моделирование»: Сборник докладов. Саров, 11-15 октября, 2010. С 17-23.
5. Бычков И., Прусенко В., Мазурин А. Инструмент для разработки корпоративной САПР // САПР и Графика [Электронный ресурс]. – 2006. – Режим доступа: <http://www.sapr.ru/Article.aspx?id=7725>. – Загл. с экрана.