

## ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ГЕНЕРАЦИИ ЗАМКНУТОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТРИАНГУЛЯЦИОННОЙ СЕТКИ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ЛОГОС

*В. А. Никитин, А. В. Шурыгин, И. Г. Новиков, А. В. Егоров,  
С. С. Соколов, А. И. Панов*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

В докладе приведено описание программного модуля, интегрированного в состав «ЛОГОС-ПреПост», который позволяет генерировать замкнутую поверхностную триангуляционную сетку на основе метода вакуумной упаковки. Описаны этапы формирования поверхностной сетки. Приведено описание подходов, используемых на каждом этапе формирования сетки.

*Ключевые слова:* генератор поверхностной сетки, замкнутая поверхностная триангуляционная сетка, метод вакуумной упаковки, пакет программ ЛОГОС.

В настоящее время разрабатывается пакет программ инженерного анализа ЛОГОС [1], предназначенный для подготовки, проведения и анализа результатов компьютерного моделирования задач прочности и аэро-гидродинамики с использованием супер-ЭВМ с массовым параллелизмом. Для подготовки начальных данных для расчетных методик, используется интегрированный в состав ЛОГОС пре-постпроцессор «ЛОГОС-ПреПост» [2].

При подготовке математических моделей задач аэродинамики и гидродинамики используется генератор многогранных дискретных моделей [3], входящий в состав «ЛОГОС-ПреПост». В качестве входных данных генератор использует переданную ему замкнутую треугольную поверхностную сетку. К поверхностной сетке предъявляется ряд требований, связанных с отсутствием дефектов таких как: наложения, пересечения треугольников, «дыр», висящих треугольников и вершин, малых двугранных углов между соседними треугольниками, вырожденных треугольников.

Поверхностная сетка в «ЛОГОС-ПреПост» может быть получена из нескольких источников. Во-первых, уже существующая поверхностная сетка может быть импортирована в «ЛОГОС-ПреПост» из сторонних форматов (\*.stl, \*.vtk и др.). Во-вторых, поверхностная сетка может быть сгенерирована для исходной геометрической модели в параметрическом представлении. И в-третьих, поверхностная сетка может быть получена на этапе перестроения поверхностной сетки при генерации объемной сетки. Сам генератор поверхностной сетки [4], используемой в «ЛОГОС-ПреПост», может работать с исходной поверхностной триангуляционной сеткой. Поэтому, крайне важно, чтобы эта исходная сетка была корректной, т. е. не имела дефектов и была связанной. В противном случае дальнейшее построение объемной сетки становится невозможным.

Устранение обнаруженных дефектов в «ЛОГОС-ПреПост» может быть проведено как в автоматическом, так и в ручном режимах. Для обнаружения дефектов в геометрических моделях «ЛОГОС-ПреПост» предоставляет специальные средства диагностики. Во многих случаях, тем не менее, автоматическое исправление проблем невозможно или приводит к нежелательным побочным эффектам. В таких случаях у пользователя остается только вариант с ручным исправлением обнаруженных дефектов. Однако при большом количестве дефектов исправление их вручную является трудоемким

и, как следствие, длительным процессом. Таким образом, существует высокая потребность в развитии средств автоматической подготовки корректной замкнутой триангуляционной сетки для последующего перестроения поверхностных и построения объемных сеток. Развитие таких средств позволит существенно сократить время подготовки 3D-моделей к построению объемных сеток и тем самым сократить общее время подготовки и проведения расчетов.

Разработчики сторонних систем инженерного анализа также столкнулись с вышеуказанными проблемами. Разработанный ими подход к решению проблемы включает предоставление пользователю средств генерации замкнутых поверхностных сеток (аппроксимирующих исходную поверхность снаружи или изнутри) по исходной поверхностной сетке, допуская наличие в исходной сетке любых несогласованностей (зазоров, нахлестов, пересечений и т. п.). Метод генерации такой замкнутой сетки получил название «термоупаковки» (shrinkwrap), также широко употребляется название «генератор вакуумной упаковки», а также сокращенное название «враппер» [5–9].

В рамках «ЛОГОС-ПреПост» реализован модуль генерации замкнутой поверхностной триангуляционной сетки методом «вакуумной упаковки», позволяющий упростить подготовку поверхностных сеток для дальнейшей подготовки задачи.

Разработчики программного модуля выделяют следующие этапы работы модуля:

1. Предобработка исходной поверхности.
2. Генерация замкнутой поверхности вблизи исходной поверхности.
3. Проецирование замкнутой поверхности на исходную поверхность.
4. Постобработка результирующей поверхности.

### Предобработка исходной поверхности

Исходная поверхностная сетка передается в модуль как набор несвязанных треугольников. Чтобы извлечь из поверхности максимальное количество информации все треугольники сшиваются в единую поверхность. При наличии дефектов в описании треугольников исходная поверхность может быть незамкнутой. Возможен вариант получения набора несвязанных между собой поверхностей. При формировании связанной поверхности все треугольники приводятся к единому порядку обхода вершин, а также производится удаление вырожденных треугольников, для которых направление нормали не определено. В том числе производится анализ на наличие характерных особенностей исходной геометрии. Под характерными особенностями подразумевается набор линий, формируемый из ребер, в которых разделяемые ими треугольники находятся под углом друг к другу. Значение угла между нормальными треугольников, при котором формируются характерные линии, регулируется пользователем через параметры. Так же к характерным ребрам относятся ребра, принадлежащие только одному треугольнику. Еще один набор характерных особенностей формируется из линий самопересечения поверхности. На рис. 1 приведен набор характерных линий

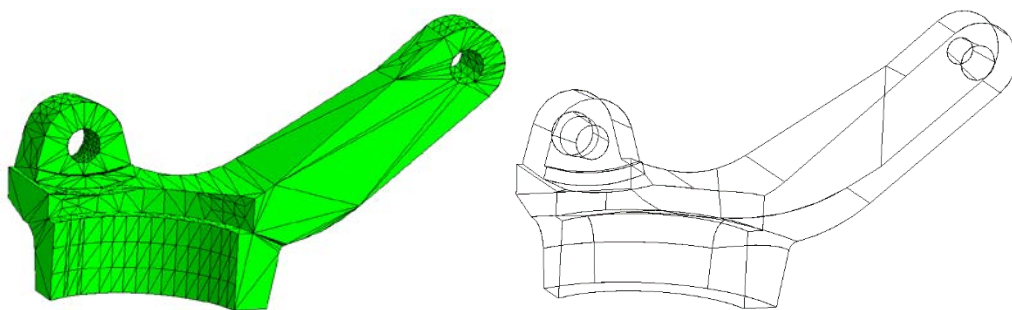


Рис. 1. Исходная поверхность (слева) и набор характерных линий (справа)

Информация о характерных особенностях необходима для лучшей аппроксимации замкнутой поверхности на этапе проецирования.

## Генерация замкнутой поверхности вблизи исходной поверхности

Генерация замкнутой поверхности состоит из нескольких шагов.

На первом шаге происходит генерация объемной сетки на основе дробно-адаптивного шаблона, согласно заданным пользователем параметров. Основным параметром для генерации объемной сетки является базовый размер, который задает длину стороны ячейки сетки. Размеры объемной сетки превышают габариты исходной поверхности в каждом направлении. Это сделано для правильного формирования объемов, разделяемых исходной поверхностью. В ходе генерации выделяются ячейки объемной сетки, через которые прошла исходная поверхность. Дробление ячеек происходит по совокупности нескольких критериев: количество попавших треугольников в объемную ячейку, максимальное отклонение нормалей к треугольникам и наличие характерных особенностей.

При построении дробности в объемной сетке разработчиками было опробовано два подхода.

Первый подход основывался на преобразовании матричной сетки в нерегулярный формат. В данном случае все ячейки объемной сетки, через которые не прошла исходная поверхность, удаляются. Затем оставшиеся ячейки при необходимости дробятся и пустые удаляются. Количество уровней дробления ячеек не ограничено. Такой подход позволяет исключить из обработки пустые ячейки и не хранить их в памяти (рис. 2).

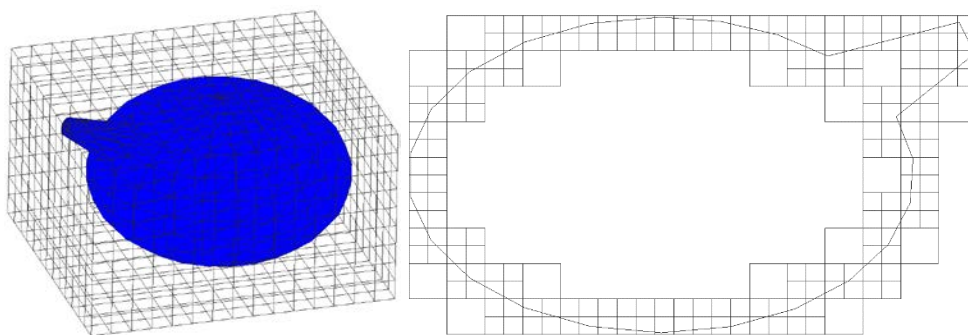


Рис. 2. Объемная сетка (слева) и она же после дроблений и удаления пустых ячеек (справа, в сечении)

Минусами такого подхода являются: сложность топологии нерегулярной сетки приводит к хранению дополнительной информации, что увеличивает время на ее обработку и приводит к дополнительному расходу оперативной памяти.

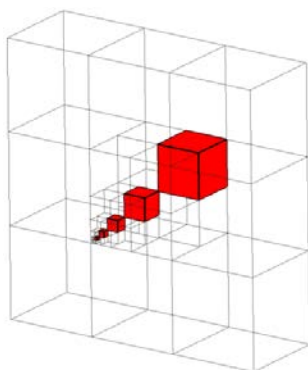


Рис. 3. Построение уровней дробности

Второй подход основан на использовании матричной объемной сетки на всех уровнях дробления ячеек. При таком подходе в ячейку, которая удовлетворяет критерию дробления, встраивается аналогичная независимая матричная сетка с размерностью  $2 \times 2 \times 2$  ячеек (рис. 3).

Для элемента сетки (ячейка или узел) получение информации о соседних элементах выполняется через его индексы. Такой подход сокращает объем информации хранящейся в памяти в 2 раза, что в свою очередь приводит к увеличению скорости генерации замкнутой поверхности более чем в 2 раза.

Второй подход так же позволяет расширить возможности модуля для определения замкнутости исходной поверхности и возможности сформировать замкнутую триангуляционную поверхность из любого заданного пользователем объема. Реализация новых инструментов анализа на основе второго подхода возможна за счет хранения информации по всему габариту исходной геометрии.

В обоих подходах в зависимости от указанного пользователем объема (внешнего или наибольшего внутреннего) на основе объемной сетки формируется внешняя или внутренняя замкнутая поверхность (рис. 4).

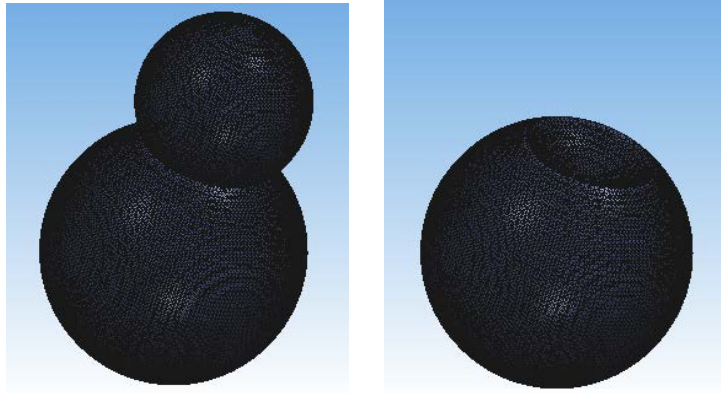


Рис. 4. Замкнутые поверхности, построенные с внешней стороны (слева) и с внутренней стороны (справа)

Генератор дробно-адаптивной сетки имеет ряд инструментов, позволяющий пользователю более детально прописать некоторые особенности исходной поверхности. К таким инструментам относятся контрольные объемы и функция предотвращения контакта между заданными поверхностями. Под контрольными объемами подразумевается набор геометрических примитивов в виде блока, конуса, сферы и цилиндра. Основная идея использования контрольных объемов состоит в том, что пользователь имеет возможность задавать необходимый размер ячеек в объеме, ограниченном одной из геометрических фигур (рис. 5).

Предотвращение контакта используется, когда ячейки сетки заполняют пространство между близкорасположенными поверхностями исходной геометрии. В таком случае размеры ячеек итоговой поверхностной сетки превышают размер щели, заполняя ее, образуют контакт между близкими поверхностями. Функция позволяет при задании достаточно грубых базовых размеров ячеек не допускать контакта между близкими поверхностями (рис. 6).

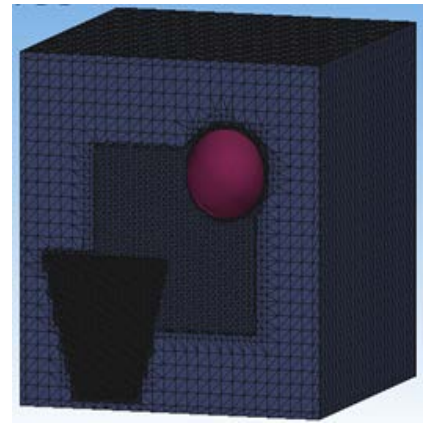


Рис. 5. Использование контрольных объемов

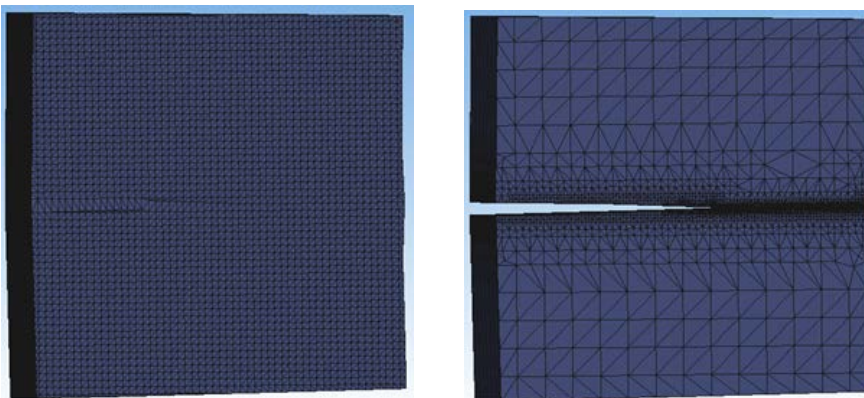


Рис. 6. Итоговая сетка без (слева) и с (справа) использованием функции предотвращения контакта

Результатом работы данного этапа является замкнутая трехмерная поверхность, состоящая преимущественно из четырехугольников (рис. 7).

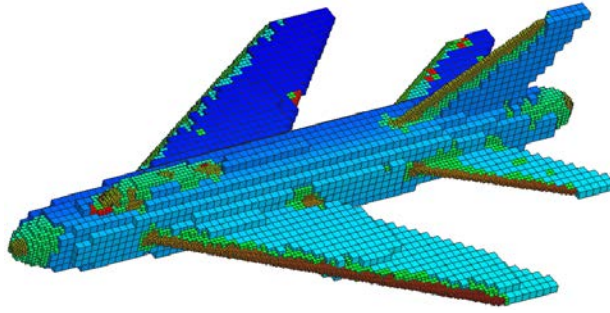


Рис. 7. Внешняя замкнутая поверхность

### Проецирование замкнутой поверхности на исходную поверхность

Работа модуля на этапе проецирования замкнутой поверхности состоит из нескольких шагов.

На первом шаге для каждого узла замкнутой поверхности ищется ближайший треугольник исходной поверхности. На треугольнике вычисляется ближайшая точка к проецируемому узлу. Узел проецируется в найденную точку на треугольнике (рис. 8).

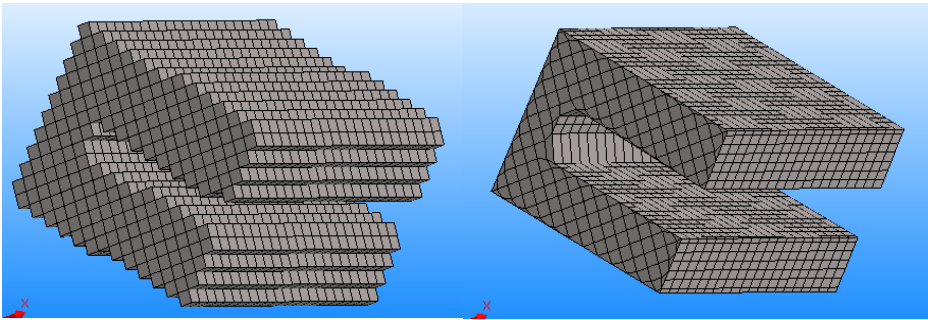


Рис. 8. Замкнутая поверхность до проецирования (слева) и после (справа)

После проецирования все узлы замкнутой поверхности принадлежат исходной поверхности, тем самым достигается уменьшение ошибки аппроксимации. Но полученная поверхность может иметь ряд самопересечений и самоналожений (рис. 9).

Для устранения полученных дефектов поверхности применяются удаление вырожденных многоугольников и локальное сглаживание сетки. В результате изначальное местоположение спроецированных узлов может измениться. Для таких узлов проводится уточнение их положения относительно исходной поверхности, чтобы не нарушить аппроксимацию (рис. 10).

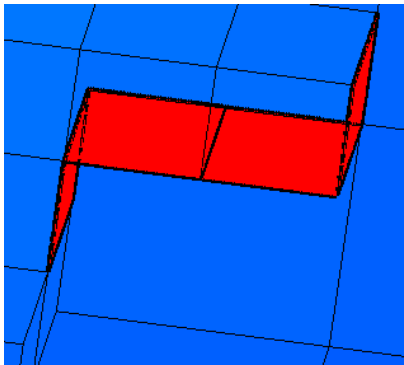


Рис. 9. Подворачивание многоугольников под соседние многоугольники (выделены красным)

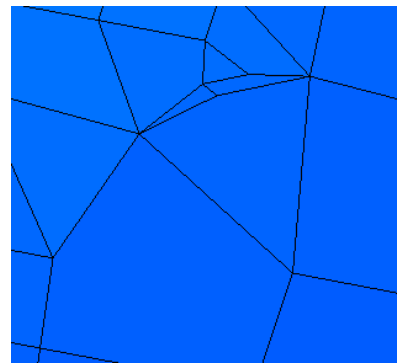


Рис. 10. Исправления сетки после проекции

Следующим шагом для получения качественной аппроксимации является учет характерных особенностей. После проекции и устранения дефектов некоторые углы исходной геометрии остаются скошенными (рис. 11).

При устранении подобных дефектов проводится анализ ребер многоугольной сетки на предмет их расположения относительно исходной геометрии. Если ребро попало под исходную поверхность, то происходит поиск точки на ближайшей характерной кривой для прописывания особенности геометрии. Если такая точка найдена, то один из узлов рассматриваемого ребра переносится в эту точку. В результате замкнутая многоугольная сетка более качественно аппроксимирует исходную геометрию (рис. 12).

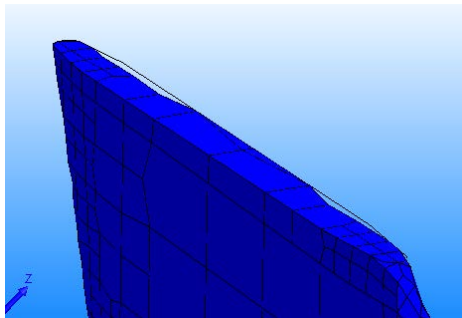


Рис. 11. Скошенные углы на замкнутой поверхности (линией выделена характерная особенность)

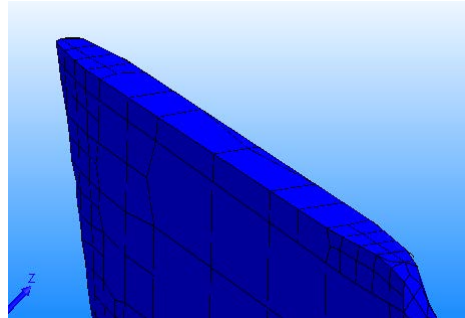


Рис. 12. Учет «внешних» характерных особенностей

Далее проводится учет характерных особенностей, находящихся в вогнутых областях исходной геометрии. Для поиска таких особенностей снова анализируются ребра многоугольной сетки, но рассматриваются только ребра, лежащие с внешней стороны от исходной геометрии. Такие ребра обрабатываются путем вставки на обрабатываемое ребро дополнительного узла, который в свою очередь разбивает ребро на два. Данный узел переносится в найденную точку на характерной особенности (рис. 13).

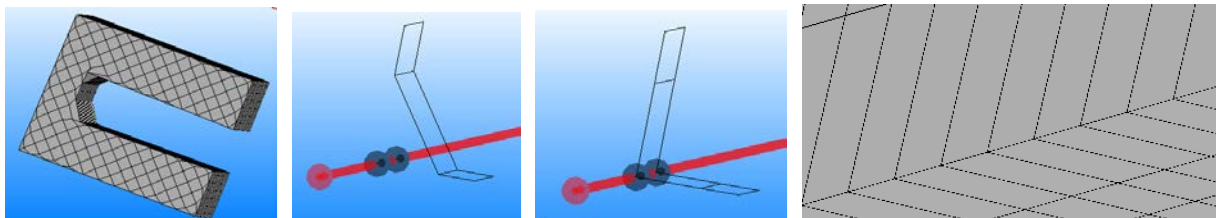


Рис. 13. Учет «внутренних» характерных особенностей

Заключительным шагом проекции является прописывание углов геометрии. Для этого анализируются ребра, у которых узлы расположены на характерных особенностях. Если у анализируемого ребра узлы лежат на разных характерных линиях, то происходит поиск угловой точки. В случае, когда такая точка есть, происходит перенос одного из узлов ребра в эту точку (рис. 14)

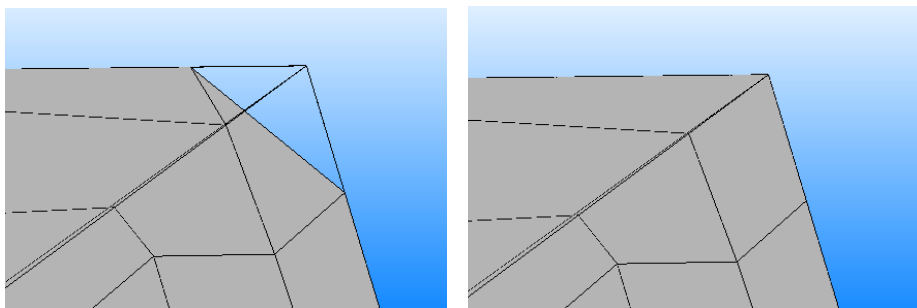


Рис. 14. Прописывание углов геометрии

После проецирования узлов на характерные особенности замкнутая многоугольная поверхность более приближена к исходной поверхности.

### Постобработка результирующей поверхности

На этом этапе происходит преобразование многоугольной поверхностной сетки в триангуляционную поверхностную сетку. При триангуляции учитывается кривизна исходной поверхности так, чтобы новые ребра имели минимальное отклонение от исходной поверхности (рис. 15)

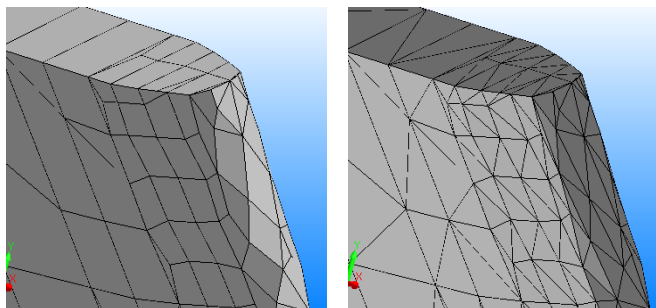


Рис. 15. Триангуляция многоугольной поверхности

После триангуляции сетки, проводится анализ ее качества на наличие самопересекающихся треугольников, треугольников малой площади, ребер не характерного размера, либо изначальная геометрия недостаточно точно описывается (ошибка аппроксимации углов, не сохранение характерных линий). В первом случае наличие проблем в замкнутой поверхностной сетке не позволяет применить алгоритм построения тетраэдризации, поскольку для этого необходимо наличие замкнутой не самопересекающейся поверхностной триангуляции. В другом случае наличие проблем отражается на качестве представления изначальной геометрии.

Для выявления набора треугольников неудовлетворительного качества проводится анализ построенной поверхностной сетки. Все выявленные в ходе анализа треугольники подвергаются перестройке. В настоящее время в модуле реализовано 2 подхода: перестроение с использованием информации об исходной поверхностной сетке и перестроение без использования информации об исходной поверхностной сетке.

В первом подходе для устранения проблемных участков в построенной триангуляции реализован альтернативный метод построения поверхностной сетки, который работает только в некоторой выделенной области.

По граничным узлам данной области строится контур, внутри которого далее будет построена триангуляция, а также формируется набор треугольников исходной поверхности, по которому данная новая триангуляция будет строиться («подложка»). Помимо координат граничных узлов задается порядок обхода данного контура, а также координаты векторов внешних нормалей в каждой точке контура.

Идея описываемого метода состоит в выделении на подложке почти плоских участков. Каждый почти плоский участок проецируется на плоскость, строится его двумерная триангуляция, которая затем проецируется обратно на поверхность. После этого построенные треугольники запоминаются, а контур уменьшается. Затем рассматривается следующий почти плоский участок, пока контур не станет пустым. Поскольку выделяемые участки поверхности являются почти плоскими, то искажения геометрии области незначительны.

Стоит отметить, что рассматриваемый метод применим к достаточно сложным геометриям, например, на рис. 16 представлена окончательная триангуляция контура, полученная в процессе выделения 22 плоских участков.

Второй подход по перестроению локальных зон поверхностной триангуляционной сетки состоит из нескольких блоков и применяется для исправления сетки, полученной после неуспешной работы первого подхода при помощи замены сетки во фрагменте.

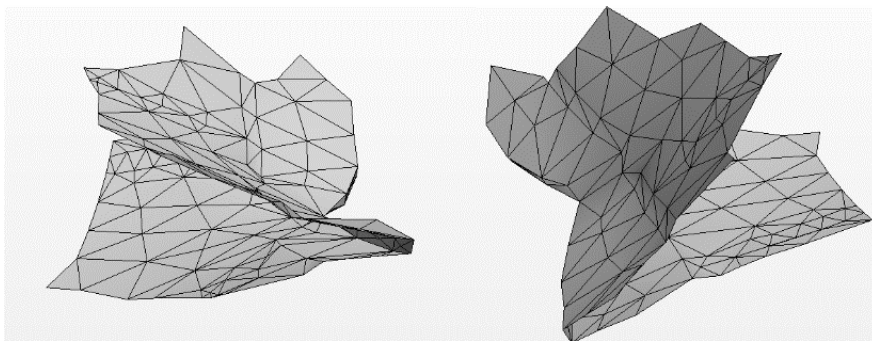


Рис. 16. Триангуляция сложного контура

Суть состоит в том, что в случае, если получаемая сетка не удовлетворяет заданным критериям качества или не может быть построена в выбранном фрагменте задачи, ограниченном некоторым контуром, производится перестроение ее в данном контуре, на основе известного метода [10] триангуляции полигонов «отсечение уха» - от контура в каждый момент времени отсекается «ухо» в виде треугольника, состоящего из трех подряд идущих вершин контура. Данным методом можно произвести триангуляцию любого выпуклого или невыпуклого полигона на плоскости, однако в пространстве, триангуляция пространственного полигона сопряжена с рядом трудностей, связанных, во-первых, с невозможностью определения пересечения вводимых в триангуляцию новых треугольников с уже имеющимися, во-вторых, с невозможностью учесть кривизну получаемой поверхности (рис. 17)



Рис. 17. Выделенный контур, с удаленными ячейками внутри него (слева) и триангуляция выделенного полигона (справа)

Отрезание «уха» производится и с учетом характерной длины ребер треугольников, которые были в выделенном контуре до его перестроения. В этом случае, в триангуляцию добавляются не только новые ребра, но и новые узлы. После добавления нового узла, имеющиеся ячейки дробятся на треугольники (рис. 18).

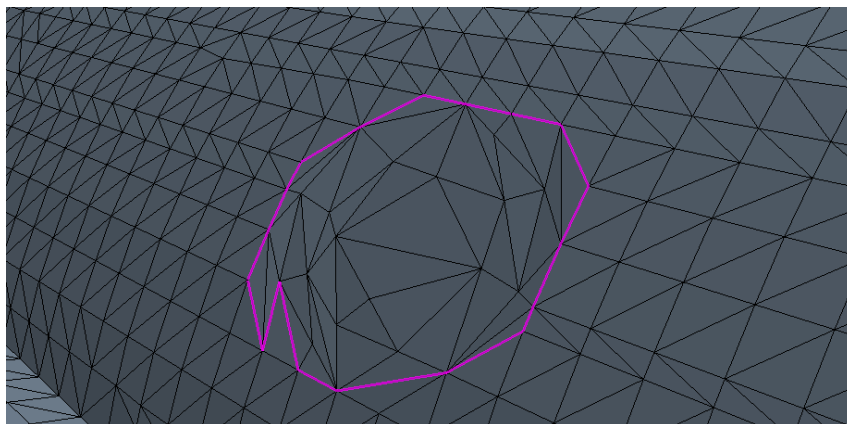


Рис.18. Выделенный фрагмент, заполненный сеткой с добавлением новых узлов



На довольно сложных контурах построить сетку без существенной потери описываемой геометрии с таким подходом невозможно, так как нет дополнительных данных о характерных кривых. В этом случае могут происходить случаи, рассмотренные на рис. 19 слева. Однако так как этот способ перестроения является дополнительным, то такие ситуации на большинстве геометрий не происходят, либо их количество минимально, и потеря качества минимизирована (рис. 19).

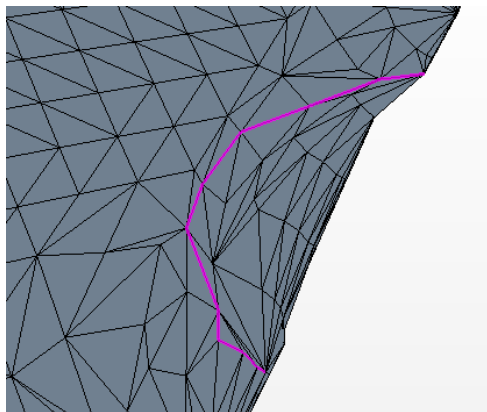


Рис. 19. Фрагмент с потерей качества аппроксимации исходной поверхности по алгоритмам отрезания «уха»

После окончания последнего этапа модуля результирующая триангуляционная поверхностная сетка передается в пре-постпроцессор «ЛОГОС-ПреПост» в качестве основы для работы поверхностного или объемного генераторов.

## Литература

1. Погосян М. А., Савельевских Е. П., Шагалиев Р. М., Козелков А. С., Стрелец Д. Ю., Рябов А. А., Корнев А. В., Дерюгин Ю. Н., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В. Применение отечественных суперкомпьютерных технологий для создания перспективных образцов авиационной техники // Журнал ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, 2013, вып.2, стр. 3–17.
2. Фархутдинов В. Ф., Тарасов В. И., Соловьев А. Н., Борисенко О. Н., Лазарев В. В., Логинов Д. В., Аверина Н. С., Марунин А. В., Гриднев А. И., Федякина М. Г., Кузнецов М. Г., Черенкова М. В., Фролова Е. А., Лукичев А. Н., Смолкина Д. Н., Купалова А. Г., Кузьменко М. В., Ховрин Н. А., Сергеева А. С., Попова Н. В., Баканова Т. Ю. Обзор возможностей по обработке геометрических и построению сеточных моделей в ЛОГОС-ПреПост // Труды XIV Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование». Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013. С. 585–592.
3. Смолкина Д. Н., Борисенко О. Н., Черенкова М. В., Гиниятуллина А. Г., Кузьменко М. В., Чухманов Н. В., Потехина Е. В., Попова Н. В., Турусов М. Р. Автоматический генератор неструктурированных многогранных сеток в препроцессоре пакета программ "ЛОГОС" // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 2. С. 25–39.
4. Лукичев А. Н., Цалко Т. В., Панкратов Д. М., Логинов Д. В., Белова А. И., Моськина Е. О. Особенности построения триангуляционных сеток на поверхностях в аналитическом и фасеточном представлении // Сборник докладов 15 научно-технической конференции «Молодежь в науке». Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. С. 73–78
5. Leif P. Kobbelt, Jens Vorsatz, Ulf Labsik Hans-Peter Seidel. A Shrink Wrapping Approach to Remeshing Polygonal Surfaces. 1999. EUROGRAPHICS '99, vol 18, number 3
6. Wei Yuan. United States Patent Application Publication. Methods for generating digital or visual representations of a closed tessellated surface geometry. 2007.

7. Zhao J., Ledoux H., Stoter J. Automatic repair of citygml LOD2 buildings using shrink-wrapping. Volume II-2/W1, ISPRS 8th 3DGeoInfo Conference & WG II/2 Workshop, 27–29 November 2013, Istanbul, Turkey
8. Marcel Campen, Leif Kobbelt. Eurographics 2012 Tutorial. A Practical Guide to polygon mesh repairing.
9. Erling Eklund, Y. K. Lee, H. Vardhan Mesh, H. Ghazialam. ANSYS Inc. Generation of Large Size Industrial CFD Applications using a Cartesian Grid based Shrink Wrap approach. 2007.
10. (1993) «Slicing an ear using prune-and-search». Pattern Recognition Letters 14 (9): 719–722. DOI: 10.1016/0167-8655(93)90141-

## **A PROGRAM MODULE FOR GENERATION OF A CLOSED SURFACE TRIANGULAR GRID IN “LOGOS” SOFTWARE PACKAGE**

*V. A. Nikitin, A. V. Shurygin, I. G. Novikov, A. V. Egorov, S. S. Sokolov, A. I. Panov*

Russian Federal Nuclear Center –  
All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov

The paper presents a program module of the LOGOS PrePost prepostprocessor that allows generating a closed surface triangular grid on the base of the vacuum packaging method. The surface grid generation stages are described. The approach used in each grid generation stage is discussed.

*Key words:* surface grid generator, the vacuum packaging method, a closed surface triangular grid, the LOGOS software package.