

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 14-11-00485. Разработка программы была поддержана грантами РФФИ 14-07-00241, 15-01-00508 и 16-07-00434.

Литература

1. Бэдсел Ч., Лэнгдон Б. Физика плазмы и математическое моделирование. М: Мир, 1989.
2. Снытников А. В. Моделирование на суперЭВМ аномальной теплопроводности в плазме термоядерной ловушки // Всероссийская суперкомпьютерная конференция «Научный сервис в сети Интернет: масштабируемость, параллельность, эффективность»: сб. трудов. Новороссийск, 21–26 сентября, 2009. С. 87–90.
3. Вшивков В. А., Григорьев Ю. Н., Федорук М. П. Численные методы «частицы-в-ячейках». М.: Наука, 2000.
4. Вшивков В. А., Вшивков К. В., Дудникова Г. И. Алгоритмы решения задачи взаимодействия лазерного импульса с плазмой // Вычислительные технологии. 2001. Т. 6, № 2. С. 47–63.
5. Месяц Е. А., Снытников А. В., Лотов К. В. О выборе числа частиц в методе частиц-в-ячейках для моделирования задач физики плазмы // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18, № 6. С. 83–96.
6. Birdsall C. K., Particle-In-Cell Charged-Particle Simulations, Plus Monte Carlo Collisions with Neutral Atoms, PIC-MCC // IEEE Transactions on Plasma Science. 1991. Vol. 19, N 2. P. 65–85.

СШИВАНИЕ МНОГОГРАННЫХ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТОК

И. В. Соболев, А. В. Шурыгин

Российский Федеральный Ядерный Центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

В мировой практике, при расчете динамики различных конструкций, достаточно часто возникает общеизвестная проблема построения начальной сетки в геометриях сложной формы. Один из возможных подходов к решению данной проблемы заключается в том, чтобы сначала разбить сложную геометрию на более простые фрагменты, построить в них сетку, а затем сшить полученные сетки в единую счетную сетку. Такой подход позволяет строить сетку достаточно хорошего качества в областях сложной формы.

В настоящее время подобный инструмент разработан и реализован в некоторых коммерческих пакетах программ, например, таких как: CD-Adapco Star-CCM+, Ansys Icem CFD и другие, но нам не удалось найти публикаций на эту тему. В то же время решение данной проблемы является достаточно актуальной и практически значимой задачей и для методики ТИМ-3D [1], предназначенной для решения задач механики сплошной среды на неструктурированных многогранных сетках.

В данной работе представлен метод сшивания, основанный на быстром установлении соответствия между двумя многоугольными поверхностями в пространстве и дроблении граней одной из поверхностей проекциями ребер другой поверхности. Этот метод обобщается на произвольное количество тел, кроме того, границы сшиваемых поверхностей этих тел могут полностью или частично не совпадать. Программная реализация и верификация разработанных алгоритмов проведена в рамках методики ТИМ-3D.

Данный метод работает как в ручном режиме, когда пользователь задает необходимые параметры для сшивки, так и в автоматическом режиме.

Работоспособность метода сшивания продемонстрирована на ряде тестовых примеров и задачах построения расчетных моделей сложных технических конструкций.

Разработанный модуль сшивки в настоящее время используется при расчете начальных данных для методики ТИМ-3D, а также он внедрен в ПреПостПроцессор пакета программ «ЛОГОС» [2, 3] для решения задач инженерного анализа.

1. Алгоритмы сшивания поверхностей и трехмерных сеток

1.1. Соответствие между поверхностями в пространстве

Пусть в трехмерном пространстве заданы две поверхности, состоящие из многоугольников, которые будем называть гранями поверхностей. Предположим, что грани одной из поверхностей (назовем ее основной) являются плоскими и выпуклыми. Другую поверхность назовем вспомогательной, и будем предполагать, что ее грани являются произвольными несамопересекающимися многоугольниками.

Определение 1. Пусть грань P основной поверхности лежит в плоскости π . Будем говорить, что внутренняя вершина V вспомогательной поверхности соответствует грани P , если ее ортогональная проекция U на плоскость π лежит строго внутри многоугольника P (рис. 1). Точку U назовем проекцией вершины V на основную поверхность.

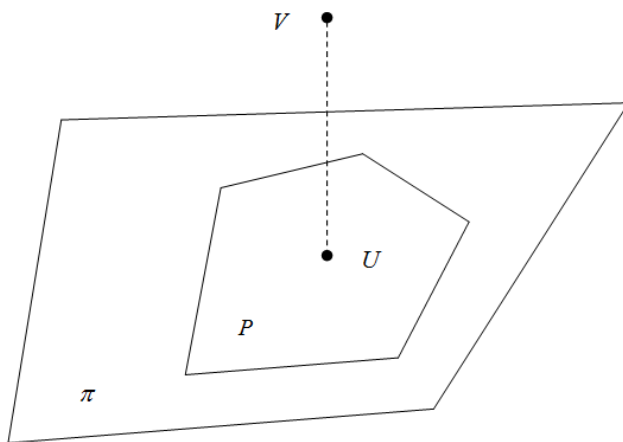
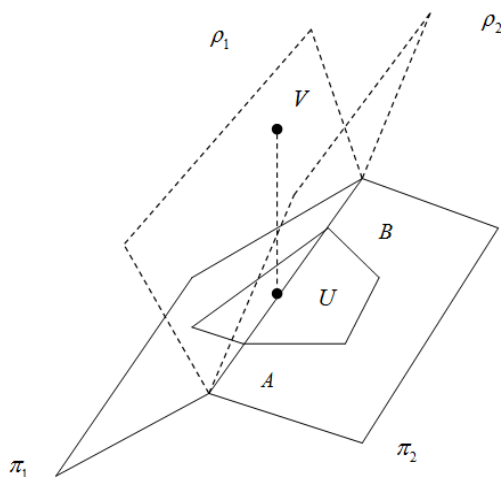
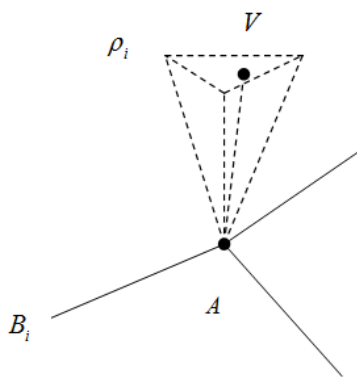


Рис. 1. Вершина V соответствует грани P

Определение 2. Пусть ребро AB основной поверхности разделяет грани P_1 и P_2 , лежащие в плоскостях π_1 и π_2 соответственно. Пусть l – прямая, содержащая отрезок AB , ρ_i – плоскость, проходящая через прямую l перпендикулярно к π_i и H_i – полупространство, ограниченное плоскостью ρ_i и не содержащее многоугольник P_i . Будем говорить, что внутренняя вершина V вспомогательной поверхности соответствует ребру AB , если она лежит внутри или на границе двугранного угла, образованного пересечением полупространств H_1 и H_2 , и ее проекция U на прямую l лежит строго внутри отрезка AB (рис. 2). Точку U назовем проекцией вершины V на основную поверхность.

Рис. 2. Вершина V соответствует ребру AB

Определение 3. Пусть во внутренней вершине A основной поверхности сходятся ребра AB_1, \dots, AB_n . Обозначим через ρ_i плоскость, проходящую через точку A перпендикулярно к отрезку AB_i . Пусть H_i – полупространство, ограниченное плоскостью ρ_i и не содержащее отрезок AB_i . Будем говорить, что внутренняя вершина V вспомогательной поверхности соответствует вершине A , если она лежит внутри или на границе многогранного угла, образованного пересечением полупространств H_i (рис. 3). Проекцией вершины V на основную поверхность назовем точку A .

Рис. 3. Вершина V соответствует вершине A

Пусть теперь даны две многоугольные поверхности: основная S_1 и вспомогательная S_2 . Рассмотрим ребро AB поверхности S_2 . Пусть A' и B' – проекции вершин A, B на поверхность S_1 . Плоскость, проходящая через точки A', B' и A пересечет S_1 по некоторой ломаной. Часть этой ломаной, лежащую между точками A' и B' , назовем проекцией ребра AB на S_1 . Проекции всех ребер вспомогательной поверхности разбивают грани основной поверхности на некоторые многоугольники. Обозначим через S поверхность, состоящую из этих многоугольников. Будем говорить, что S получена сшиванием поверхностей S_1 и S_2 .

Построение поверхности S происходит в два этапа. На первом этапе для каждой вершины поверхности S_2 находится грань, ребро или вершина поверхности S_1 , которым она соответствует. На втором этапе грани поверхности S_1 разрезаются проекциями ребер поверхности S_2 .

Для практических приложений необходимо не только построить поверхность S , но и установить соответствие между гранями и вершинами поверхностей S и S_i . Каждая грань поверхности S_1 после второго этапа оказывается разбитой на меньшие грани поверхности S . Аналогично, проекции ребер каждой грани поверхности S_2 образуют на поверхности S некоторую замкнутую ломаную, внутри которой лежат грани S . Для каждой грани поверхности S_i мы также будем вычислять множество граней поверхности S , на которые она разбивается после сшивания.

1.2. Установление соответствия между поверхностями

Используемый нами алгоритм основан на следующей идее. Предположим, что вершина V поверхности S_2 соответствует грани P поверхности S_1 . Пусть вершина U принадлежит ребру поверхности S_2 , другим концом которого является вершина V . Естественно предположить, что вершина U соответствует некоторой грани Q , «близкой» к P (возможно, даже $Q = P$). Поиск соответствия для вершины U мы начнем с грани P . Если U соответствует P , то для U задача решена, если нет, то рассмотрим грани P_1, \dots, P_n , соседние с P через ребро или вершину и проверим, не соответствует ли U какой-либо из них. Если U не соответствует никакой из граней P_i , повторим для каждой из них ту же процедуру, что для P . Таким образом будем проверять все более далекое окружение грани P , пока не найдем соответствие для U .

Общая схема алгоритма такова. Сначала из каких-либо соображений строится множество вершин поверхности S_2 , для которых соответствие с поверхностью S_1 известно (обозначим это множество через R_1). Далее, если построено множество R_n , то строится множество R_{n+1} , содержащее R_n , и обладающее тем свойством, что для любой вершины $U \in R_{n+1}$ существует вершина $V \in R_n$, такая, что U и V являются концами некоторого ребра поверхности S_2 . После этого устанавливается соответствие между вершинами множества R_{n+1} , не принадлежащими R_n , и гранями поверхности S_1 в предположении, что для R_n это соответствие уже установлено. Данная процедура повторяется, пока множество R_{n+1} не совпадает с R_n .

Для того, чтобы реализовать описанную схему, нужно иметь данные о соседстве между гранями, ребрами и вершинами многоугольной поверхности. Структура, хранящая эту информацию, аналогична структуре данных о двумерной многоугольной нерегулярной сетке методики ТИМ-2D [4], и имеет следующие свойства:

1. Элементами структуры являются грань, ребро и вершина.
2. Для грани хранится список ребер, перечисленных в порядке положительного направления обхода, которое задается ориентацией поверхности.
3. Для ребра хранятся две грани, которые оно разделяет, и две вершины, являющиеся его концами. Эти грани и вершины упорядочены так, что данное ребро в первой грани обходится от первой вершины ко второй в положительном направлении.
4. Для ребра, лежащего на границе поверхности, вместо номера первой грани хранится номер границы со знаком минус.
5. Для вершины хранится число границ, сходящихся в ней, и номер одного из сходящихся в ней ребер (опорное ребро).
6. Хранятся координаты вершин и центров граней.

Выбор данного формата обусловлен тем, что он позволяет достаточно быстро получить информацию о соседстве элементов сетки.

1.3. Различные типы сшивания и построение множества R_1

В настоящее время реализовано четыре типа сшивания поверхностей (рис. 4):

1. Граница одной поверхности проектируется в границу другой.

2. Граница одной поверхности проектируется внутрь другой.
3. Часть границы одной поверхности проектируется внутрь другой.
4. Границы поверхностей частично перекрываются.

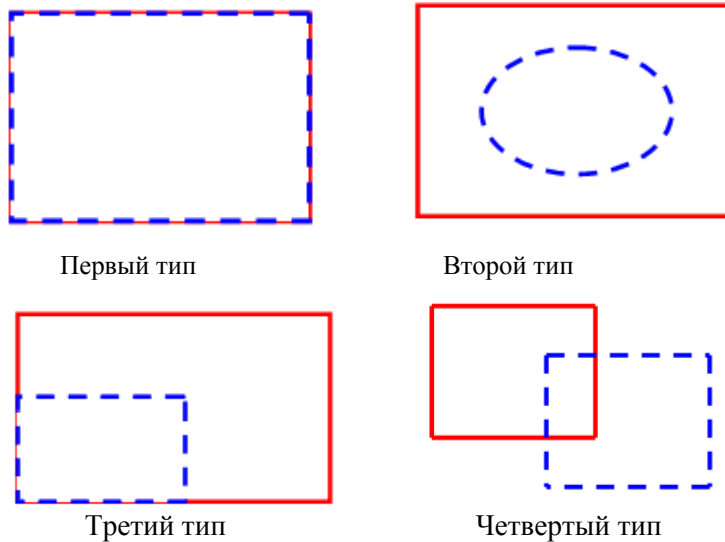


Рис. 4. Типы сшивания поверхностей

Для каждого из этих типов построение множества R_1 несколько различается. Пусть реализуется первый тип сшивания. Рассмотрим три случая.

1. Границы поверхностей S_i непустые и представляют собой набор незамкнутых ломаных. Концы этих ломаных будем называть угловыми точками. Пусть D_1, \dots, D_n – угловые точки поверхности S_2 , C_1, \dots, C_n – угловые точки поверхности S_1 . Будем считать, что вершина D_i соответствует ближайшей к ней вершине $C_{j(i)}$. Пусть граничная ломаная M_{rt} поверхности S_2 имеет концы D_r, D_t , а граничная ломаная L_{rt} поверхности S_1 – концы $C_{j(r)}, C_{j(t)}$. Пусть $V_1 = D_r, V_2, \dots, V_{k-1}, V_k = D_t$ – вершины ломаной M_{rt} , $U_1 = C_{j(r)}, U_2, \dots, U_{l-1}, U_l = C_{j(t)}$ – вершины ломаной L_{rt} . Если вершина V_a соответствует ребру $U_b U_{b+1}$ или одной из его граничных вершин, то для определения соответствия для вершины V_{a+1} будем последовательно перебирать ребра $U_i U_{i+1}$ для всех $i \geq b$. Таким образом, мы установим соответствие между всеми граничными вершинами поверхности S_2 и граничными ребрами и вершинами поверхности S_1 .

2. Границы поверхностей S_i непустые и представляют собой набор замкнутых ломаных. В этом случае границы поверхностей представляют собой два набора замкнутых ломаных. Пусть L_1, \dots, L_n – компоненты границы поверхности S_1 , M_1, \dots, M_n – компоненты границы поверхности S_2 . Пусть V_i – произвольная вершина ломаной M_i . С помощью полного перебора найдем все ребра ломаных L_1, \dots, L_n , которым соответствует V_i , и выберем среди них то, для которого расстояние от вершины V_i до ее проекции на поверхность S_1 минимально. Пусть это ребро принадлежит ломаной $L_{j(i)}$. Будем считать, что вершины ломаной M_i соответствуют ребрам или вершинам ломаной $L_{j(i)}$. В остальном вычисление соответствия между границей поверхности S_2 и поверхностью S_1 аналогично первому случаю.

3. Границы поверхностей S_i пусты. Возьмем произвольную вершину V поверхности S_2 и полным перебором получим все грани, ребра и вершины поверхности S_1 , которым соответствует V . Среди всех проекций вершины V на поверхность S_1 выберем ту, для которой расстояние до V минимально.

В случаях 1 и 2 множество R_1 состоит из всех граничных вершин поверхности S_2 , в случае 3 – из одной вершины.

Если реализуется второй тип сшивания, то множество R_1 состоит из одной вершины, а ее проекция находится так же, как в третьем случае первого типа сшивания. Для третьего типа множество R_1 состоит из граничных вершин поверхности S_2 , которые проектируются в границу поверхности S_1 , а их проекции находятся так же, как для первого типа.

Для четвертого типа сшивания сначала строится контур пересечения ломаных, являющихся границами поверхностей S_i . На каждой из поверхностей S_i этот контур вырезает поверхность \tilde{S}_i , причем границы поверхностей \tilde{S}_1 и \tilde{S}_2 совпадают, а сшивание вдоль поверхностей S_1 и S_2 эквивалентно сшиванию первым типом вдоль поверхностей \tilde{S}_1 и \tilde{S}_2 .

1.4. Сшивание поверхностей

Пусть AB – ребро поверхности S_2 , A' и B' – проекции вершин A, B на поверхность S_1 , точка A' лежит внутри грани P , точка B' – внутри грани Q . Рассмотрим плоскость π , проходящую через точки A', B' и A . Эта плоскость пересекает многоугольник P по отрезку A_1A_2 , многоугольник Q – по отрезку B_1B_2 . Ломаную $L_{AB} = A_1A'A_2C_1 \dots C_nB_1B'B_2$, лежащую в пересечении плоскости π и поверхности S_1 , назовем проекцией ребра AB (рис. 5). Для построения ломаной L_{AB} используются те же алгоритмы, что и для дробления ячеек при локальных перестройках двумерной нерегулярной сетки [5].

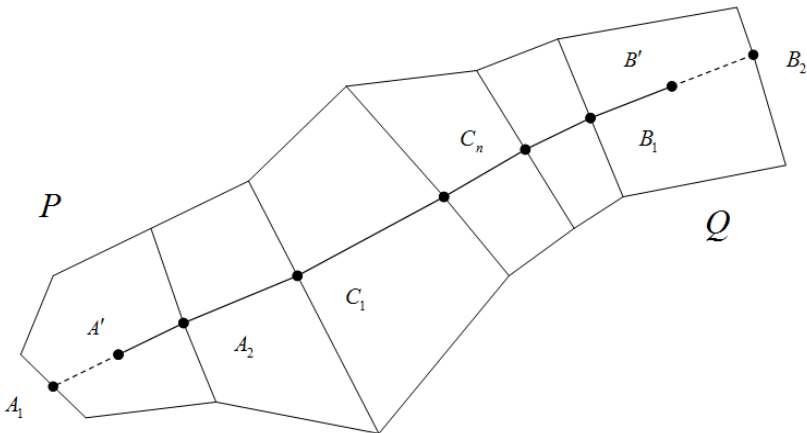


Рис. 5. Проекция ребра AB на поверхность S_1

Поверхность S строится в два этапа. На первом этапе происходит последовательное дробление граней поверхности S_1 проекциями всех ребер поверхности S_2 . Получившаяся в результате этого поверхность будет иметь «лишние» ребра и вершины, не соответствующие никаким ребрам и вершинам поверхности S_2 . Для ребра AB «лишними» являются вершины A_1 и B_2 и ребра A_1A' и $B'B_2$ (рис. 5). На втором этапе происходит объединение пар граней, разделяемых ребрами такого вида и удаление лишних вершин.

1.5. Сшивание трехмерных сеток

Пусть есть две трехмерные области T_1 и T_2 , заполненные неструктурированными многогранными сетками, которые хранятся в формате, описанном в работе [5]. Пусть в каждой из T_i выделена граничная многоугольная поверхность S_i . Процедура сшивания областей T_1 и T_2 вдоль границ S_i состоит из следующих этапов:

1. Строится поверхность S , полученная сшиванием S_1 и S_2 , с указанием для каждой грани P поверхности S_i множества граней $M(P)$ поверхности S , которое получено в результате дробления многоугольника P (при $i = 1$) или его проекции на поверхность S_j (при $i = 2$) ребрами поверхности S_j ($j \neq i$). Также указывается соответствие между вершинами поверхностей S и S_2 .

2. К первой области добавляются вершины поверхности S , не совпадающие с вершинами поверхности S_1 .

3. Для всех ячеек, содержащих грани поверхностей S_i , эти грани удаляются из списка граней ячейки, и заменяются на соответствующее множество граней поверхности S .

4. Если ребро грани P , не принадлежащей S_i , проходит по граничной поверхности, то к списку вершин грани P добавляются вершины поверхности S , лежащие на этом ребре.

5. К первой области добавляются вершины и грани второй области, не лежащие на поверхности S_2 , а также все ячейки второй области, перенумерованные так, чтобы в сшитой области сохранилась сквозная нумерация.

2. Примеры сшивания сеток

2.1. Сшивание с использованием различных типов

Ниже показаны примеры (рис. 6–8) сшивания различных сеток вдоль плоской, цилиндрической и сферической поверхностей с использованием первого типа.

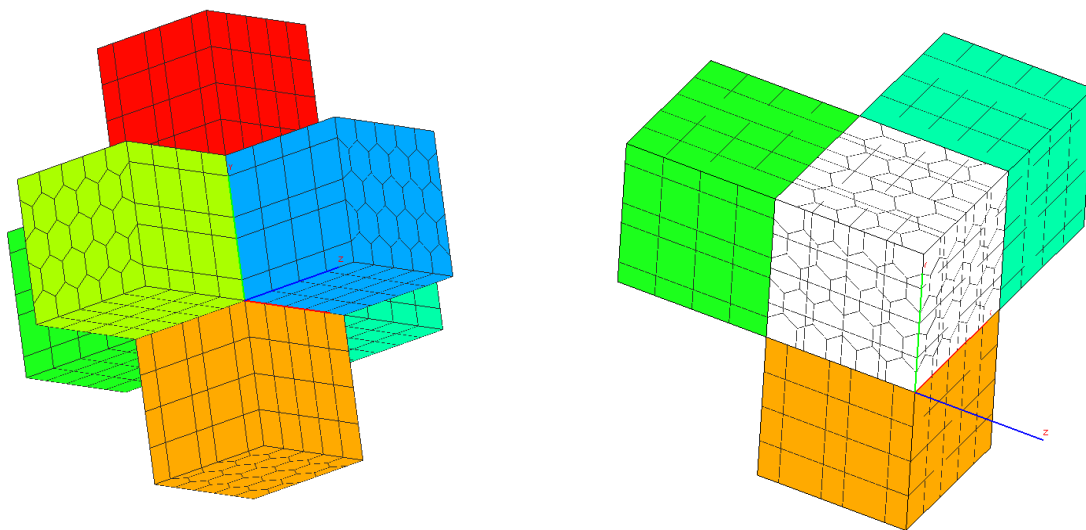


Рис. 6. Сшивание вдоль плоской границы первым типом (слева), граница между областями после сшивания (справа)

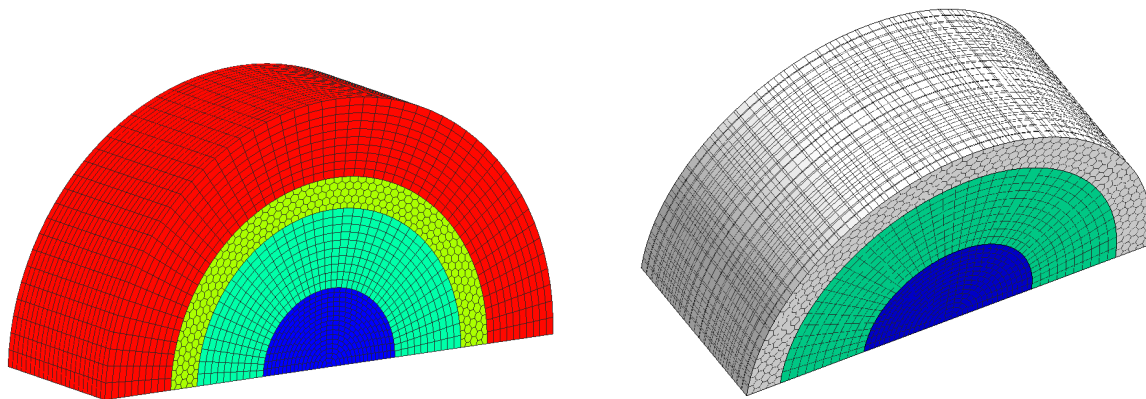


Рис. 7. Сшивание вдоль цилиндрических границ первым типом (слева), граница между областями после сшивания (справа)

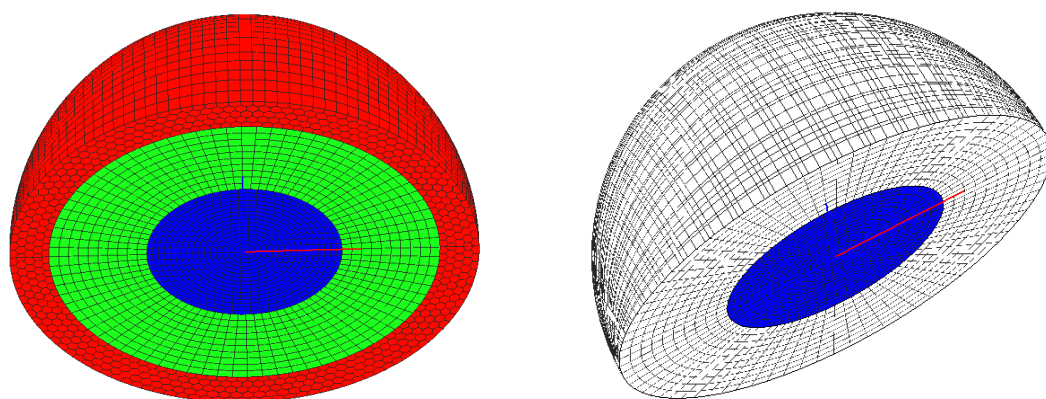


Рис. 8. Сшивание вдоль сферической границы первым типом (слева), граница между областями после сшивания (справа)

На рис. 9 показан пример сшивания областей с использованием второго типа.

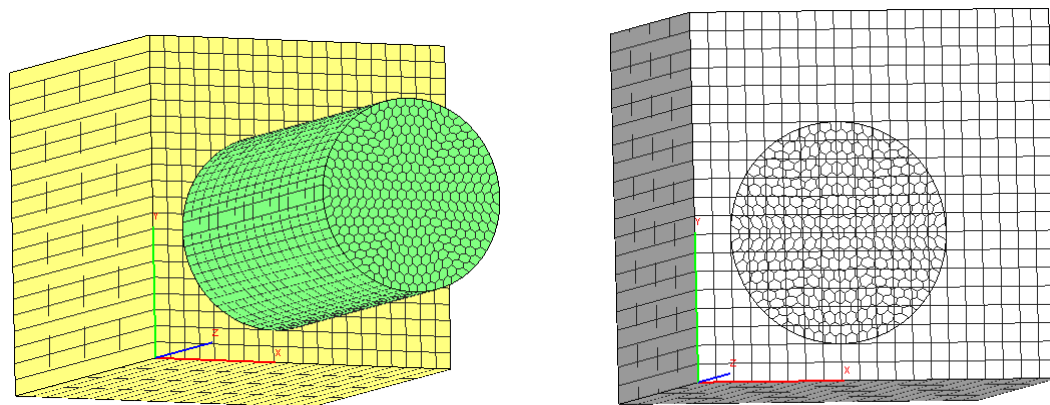


Рис. 9. Сшивание областей вторым типом (слева), граница между областями после сшивания (справа)

На рис. 10 показан пример сшивания областей с использованием третьего типа.

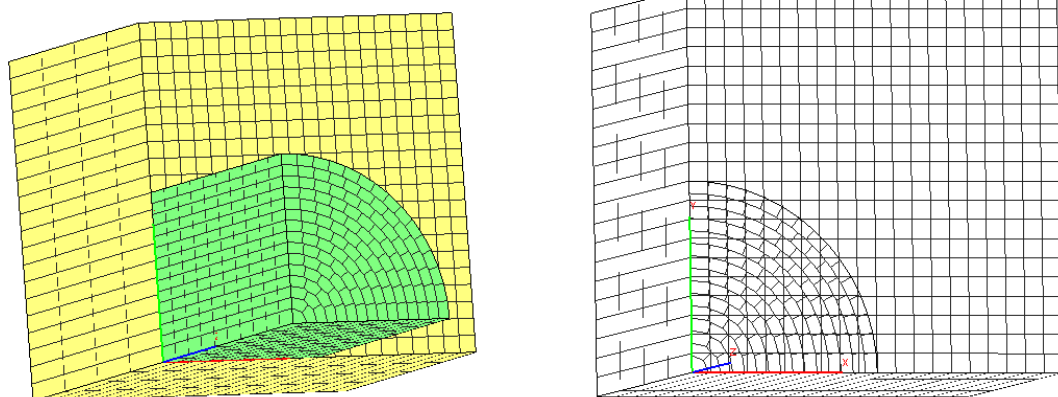


Рис. 10. Сшивание областей третьим типом (слева), граница между областями после сшивания (справа)

На рис. 11 показан пример сшивания областей с использованием четвертого типа.

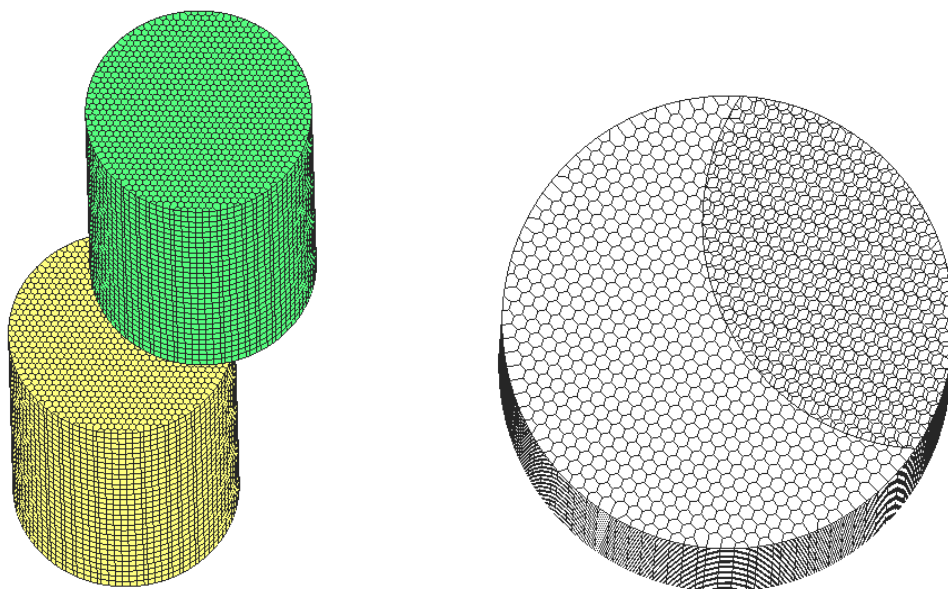


Рис. 11. Сшивание областей четвертым типом (слева), граница между областями после сшивания (справа)

2.2. Примеры сшивания в автоматическом режиме

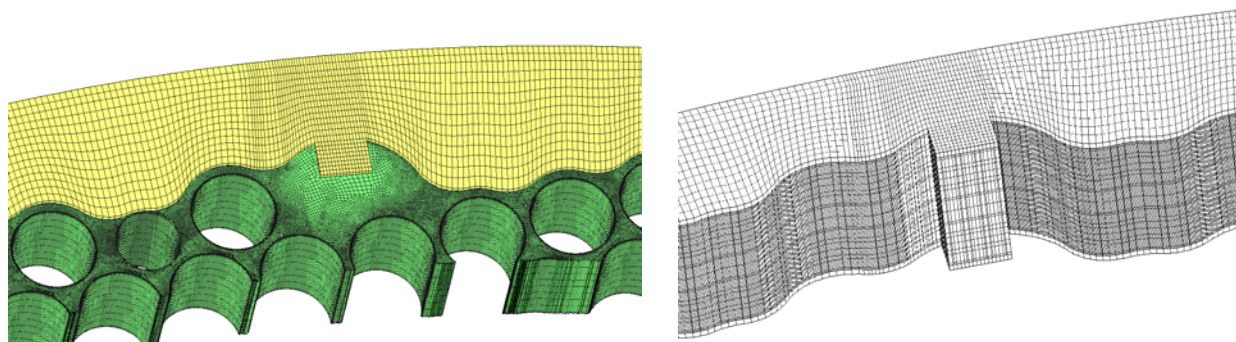


Рис. 12. Фрагмент исходной сетки (сверху), граница между областями после сшивания (снизу)

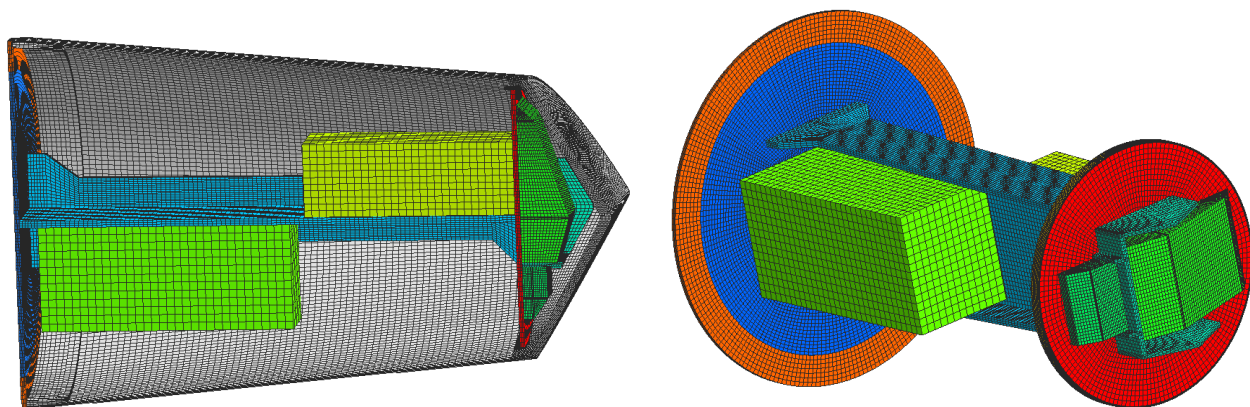


Рис. 13. Исходная геометрия с сеткой в разрезе (слева), исходная геометрия без кожуха (справа)

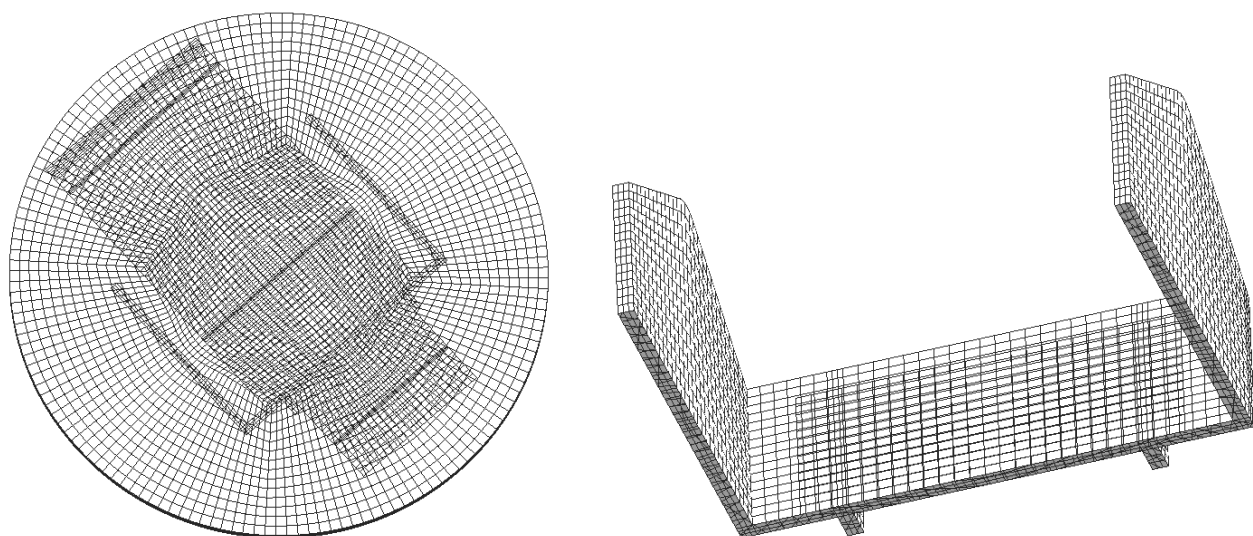


Рис. 14. Границы между некоторыми областями после сшивания

Выводы

В рамках данной работы создан быстрый алгоритм проектирования одной многоугольной поверхности на другую поверхность. Разработана и реализована программа сшивания многогранных неструктурированных сеток, время работы которой пропорционально числу ячеек сетки. Она работает как в ручном режиме, когда пользователь задает необходимые параметры для сшивки сеток, так и в автоматическом режиме.

Модуль сшивания используется для подготовки и расчета начальных данных для методики ТИМ-3D. Внедрение данного модуля в ПреПостПроцессор «ЛОГОС» значительно увеличило круг его пользователей, и соответственно расширило класс решаемых задач с помощью пакета программ «ЛОГОС».

В настоящее время модуль сшивания прошел стадию валидации и верификации на производственных задачах промышленности. Следует отметить, что этот модуль в связке с сеточными генераторами ПреПостПроцессора «ЛОГОС» является необходимым инструментом для подготовки сеточных моделей сложных конструкций промышленности.

Литература

1. Соколов С. С., Панов А. И., Воропинов А. А. и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 3. С. 37–52.
2. Фархутдинов В. Ф., Тарасов В. И., Соловьев А. Н. и др. Обзор возможностей по обработке геометрических и построению сеточных моделей в ЛОГОС.Препост // XIV Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование»: сб. докл. 2013. С. 585–592.
3. Дерюгин В. И., Дюпин В. Н., Санталов А. С. ЛОГОС.Препост. Универсальный пользовательский интерфейс задания начальных и граничных условий // XIV Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование»: сб. докл. 2013. С. 225–234.
4. Соколов С. С., Воропинов А. А., Новиков И. Г. и др. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2006. Вып. 4. С. 29–43.
5. Новиков И. Г., Соколов С. С. Локальные перестройки нерегулярной сетки в методике ТИМ-2D // VI научно-техническая конференция «Молодежь в науке»: сб. докл. Саров, 1 ноября 2007. С. 136.

ОБЪЕДИНЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РЕЙНОЛЬДСОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ SSG/LRR- ω С МОДЕЛЯМИ ОТСОЕДИНЕННЫХ ВИХРЕЙ И ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА

А. А. Уткина, Р. Н. Жучков, К. Б. Володченкова

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

В настоящее время при решении большей части практических задач аэродинамики используются RANS модели турбулентности. Классические подходы описания турбулентности основаны на обобщенной гипотезе Буссинеска, предполагающей линейную зависимость между тензором Рейнольдсовых напряжений и осредненными градиентами скоростей:

$$\tau_{ij} = -R_{ij} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}.$$

На данном подходе построены такие модели, как Спаларта–Аллмараса (SA) [1] и двухпараметрическая модель турбулентности Ментора SST [2]. Эти модели хорошо зарекомендовали себя при решении задач, в которых рассматривается стационарный трансзвуковой поток. В случае нестационарных отрывных течений на основе этих моделей были разработаны DES подходы, которые обеспечивают приемлемую точность предсказания параметров осредненного течения в LES области и эффективно моделируют пограничные слои в RANS области. Для описания развития пограничного слоя эти модели были дополнены моделью ламинарно-турбулентного перехода.

Следует подчеркнуть, что гипотеза Буссинеска не имеет какого-либо теоретического обоснования, и для некоторых течений, строго говоря, не выполняется. К ним относятся течения с сильной кривизной линии тока, струйные течения, и течения, в которых существенным образом проявляется