

РАЗРЕЗАНИЕ НЕВЫПУКЛЫХ МНОГОУГОЛЬНЫХ ГРАНЕЙ И МНОГОГРАННЫХ ЯЧЕЕК В ГЕНЕРАТОРЕ ОБЪЕМНЫХ СЕТОК МЕТОДОМ ОТСЕЧЕНИЯ В ЛОГОС.ПРЕПОСТ

М. В. Кузьменко, О. Н. Борисенко, Д. Н. Смолкина

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Для задания начальных данных и генерации сеток, а также предоставления графических интерфейсов для подготовки и выполнения инженерного анализа по комплексу программ ЛОГОС[1] ведется разработка препостпроцессора ЛОГОС-ПреПост [2]. В рамках препостпроцессора для подготовки расчетных сеток для решения задач аэрогидромеханики разрабатываются автоматические генераторы поверхностных триангуляционных сеток и объемных сеток с многогранными элементами методом отсечения.

Особенностью генератора сеток методом отсечения является неоднородная структура сетки. На рис. 1 приведены примеры типов ячеек в генераторе методом отсечения.

Вдали от границ модели ячейки сетки (шаблонные ячейки), рис. 1а, имеют форму куба, но они могут состоять более чем из шести граней. Вблизи границы модели формируются ячейки, являющиеся многогранными призмами, рис. 1в. Отсеченные ячейки, рис. 1б, на стыке шестигранников и призм являются многогранниками произвольной формы (рис. 1). На рис. 2 показан плоский срез геометрии с обозначениями ячеек.

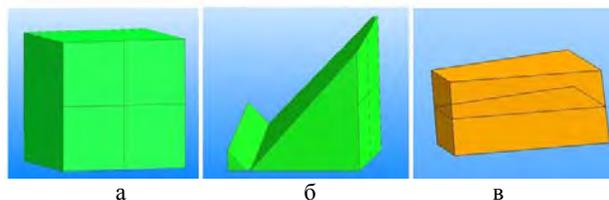


Рис. 1. Примеры типов ячеек в генераторе методом отсечения: а – шаблонная ячейка, б – отсеченная ячейка, в – призматическая ячейка

На рис. 2 показан плоский срез геометрии с обозначениями ячеек.

Счетный код ЛОГОС. Аэродинамика чувствительна к качеству сетки, на которой проводится численное моделирование. От качества сеток зависит как скорость проведения расчета, так и принципиальная возможность проведения расчета. Для моделирования физических процессов предпочтительными сетками являются сетки из правильных шестигранников, но построение таких сеток не может быть проведено автоматическими генераторами.

В процессе адаптации автоматического генератора методом отсечения к решению задач аэрогид-

ромеханики были выработаны критерии качества, которым должны отвечать ячейки многогранной сетки. К наиболее значимым можно отнести следующие критерии: минимальный объем ячеек (менее $1e-21$), соотношение объемов ячеек (более $1e+4$), минимальная площадь грани (менее $1e-10$), невыпуклые ячейки. В генераторе сеток создан модуль улучшения качества сеток, который проводит корректировку сеток для удаления невыпуклых, вырожденных ячеек, ячеек с большими соотношениями объемов и площадей поверхностных граней, и т. д.

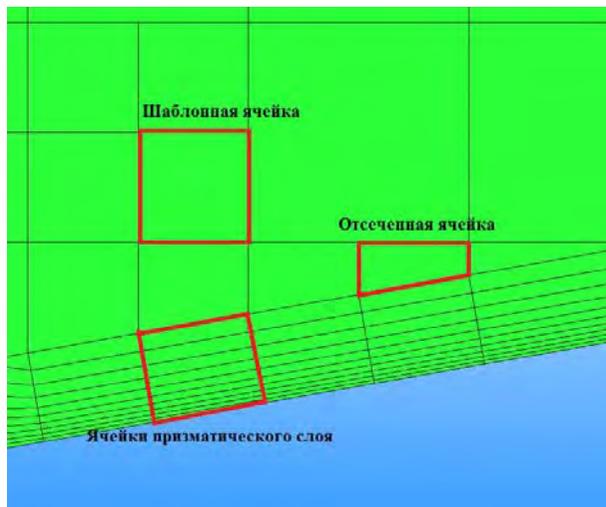


Рис. 2. Плоский срез геометрии

На данный момент в генераторе реализованы следующие модули улучшения качества сетки:

- посадка точек на поверхность;
- объединение малых ячеек сетки;
- объединение поверхностных граней;
- разрезание невыпуклых многогранных ячеек;
- разрезание поверхностных невыпуклых многоугольных граней.

Перед началом работ были изучены имеющиеся наработки по методам разрезания граней и ячеек. Для избавления от невыпуклости в гранях, предлагалось разбивать грань на треугольники [3], но этот метод вносил слишком много новых граней, что в свою очередь, значительно увеличивало количество ячеек на этапе восстановления призматичности. Для разрезания невыпуклых ячеек рассматривался метод [4], но критерий разбиения, основанный на использовании максимального

количества ребер, невыпуклости и минимального периметра вносил много вырожденных граней.

В данном докладе будут описаны модули разрезания невыпуклых многоугольных граней и разрезания невыпуклых многогранных ячеек в генераторе сеток методом отсечения верши 5.1.

Разрезание невыпуклых граней

Восстановление призматических слоев в генераторе проводится на основе поверхностных граней, полученных после этапа отсечения треугольниками ячеек шаблонной сетки. В случае восстановления призматика с невыпуклой грани все ячейки будут невыпуклыми, что является нежелательным для проведения дальнейшего моделирования по счетному коду ЛОГОС. Аэродинамика. С этой целью в модуль улучшения качества была добавлена возможность разрезания невыпуклых граней. Способ разрезания невыпуклых граней зависит от количества и расположения особых точек на грани.

Алгоритм разрезания грани, рис. 3, состоит из следующих этапов:

- 1) определение точек невыпуклости грани (особые точки) – точка P_c на рис. 3;
- 2) проверка расстояния между особыми точками. Если оно меньше заданной точности, то точка удаляется из списка особых;
- 3) выбор способа разрезания:
 - одноточечное (если грань имеет только одну точку невыпуклости), рис. 3а;
 - многоточечное (если грань имеет несколько последовательных точек невыпуклости), рис. 3б;
 - разрезание по секторам (если грань имеет несколько последовательных точек невыпуклости), рис. 3в.

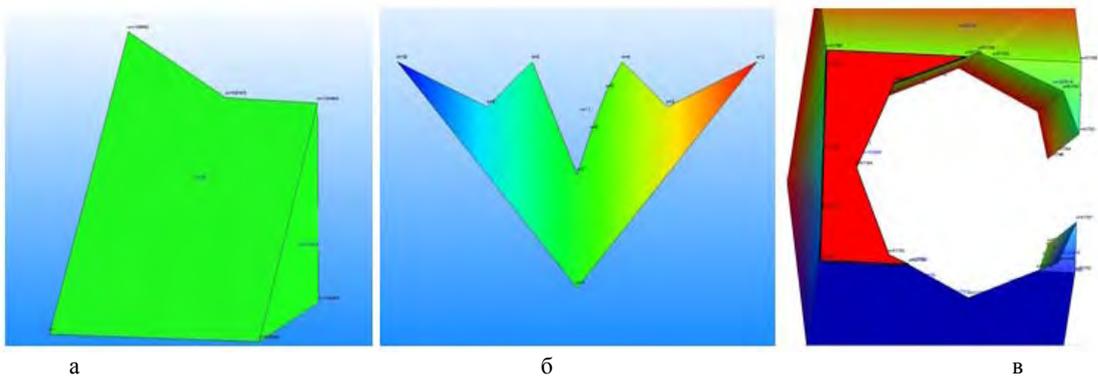


Рис. 3. Примеры типов разрезаний: а – одноточечное разрезание, б – многоточечное разрезание, в – разрезание по секторам

Рассмотрим эти этапы подробнее.

Определение точек невыпуклости

1. Определяется базовая нормаль N к грани в рассматриваемом узле по методу Ньюэлла [5];
2. Для каждого ребра грани последовательно формируем временные грани трансляцией ребер по

направлению нормали N и вычисляем к ним нормали (N_1, N_2) (рис. 4);

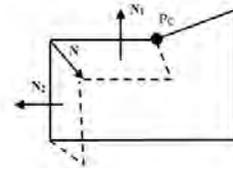


Рис. 4. Трансляция ребра по направлению нормали к грани

$$3. \alpha = \begin{cases} \arccos(-(\vec{N}_1, \vec{N}_2)), & \text{если } [N, (\vec{N}_1, \vec{N}_2)] \\ 2\pi - \arccos(-(\vec{N}_1, \vec{N}_2)), & \text{если } [N, (\vec{N}_1, \vec{N}_2)] \end{cases} \quad (1)$$

При $\alpha \geq \pi$ грань считается выпуклой в узле, а при $\alpha < \pi$ – невыпуклой [6].

Одноточечное разрезание грани

С помощью графовых алгоритмов находятся все возможные варианты разрезания грани. Из полученных вариантов убираем комбинации, содержащие невыпуклые полигоны и полигоны, имеющие площадь меньше 10^{-10} . Из оставшихся вариантов выбираем комбинацию с минимальным соотношением периметров (рис. 5).

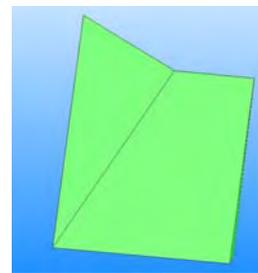


Рис. 5. Результат работы одноточечного метода разрезания

Многоточечное разрезание грани

1. Ищем ближайшие особые точки по и против обхода часовой стрелки (рис. 6);
2. Вычисляем метрики для потенциальных граней 1-2-3-4 и 1-6-7 по формуле:

$$M = N_{\text{узлов}} + \frac{L}{P}, \quad (2)$$

где $N_{узлов}$ – количество узлов новой грани, не лежащих на одной прямой; L – длина нового ребра отрезаемой части; P – периметр отрезаемой части.

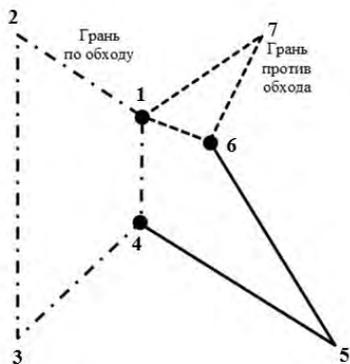


Рис. 6. Пример многоточечного разрезания

3. Выбираем грань 1-2-3-4, подходящую под следующие условия (рис. 7):

- все узлы новой грани лежат по одну сторону от нового ребра;
- метрика минимальна.

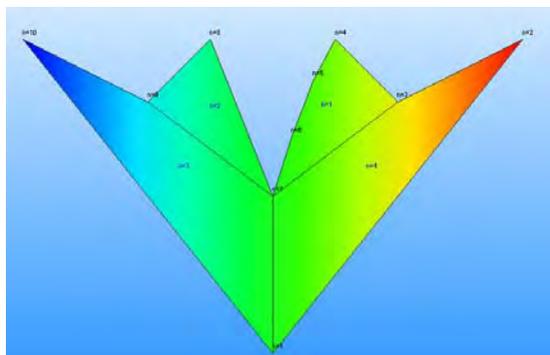


Рис. 7. Результат работы многоточечного метода разрезания

Разрезание грани по секторам

Сектор разреза определяется пересечением положительных полупространств, разделяемых плоскостями, построенными по точкам: CP (текущая точка), NP (следующая по часовой стрелке точка), PP (точка против часовой стрелки). На рис. 8 показан сектор разреза, принадлежащий грани.

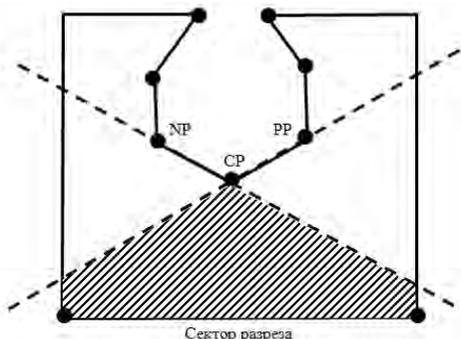


Рис. 8. Пример построения сектора разреза

Затем определяем узлы грани, попавшие в сектор разреза, и выбираем оптимальный следующим образом:

- 1) если в сектор разреза не попал ни один узел грани, то берем ближайший узел по обходу;
- 2) если попал один узел, то берем его;
- 3) если в сектор разреза попало несколько узлов, последовательно соединяем узел CP с каждым из найденных узлов. Для каждого полученного многоугольника вычисляем метрику M и проверяем: все узлы новой грани лежат по одну сторону от нового ребра. Определяем многоугольник, для которого метрика минимальна (рис. 9).

Метрика определяется по формуле:

$$M = K_{square} + K_{nodes} + K_{concave}, \quad (3)$$

Коэффициент площади:

$$K_{square} = \left| S_{loc} - \frac{S_{face}}{N_{SP} + 1} \right| \cdot \frac{1}{S_{face}}, \quad (4)$$

где S_{loc} – площадь новой грани; S_{face} – площадь исходной грани; N_{SP} – количество особых точек в исходной грани.

Коэффициент узлов:

$$K_{nodes} = \begin{cases} 0, & \text{количество узлов новой грани равно 4,} \\ 0,5, & \text{количество узлов новой грани равно 3,} \\ 10, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (5)$$

Коэффициент выпуклости:

$$K_{concave} = \begin{cases} 0, & \text{грань выпуклая,} \\ 100, & \text{грань невыпуклая.} \end{cases} \quad (6)$$

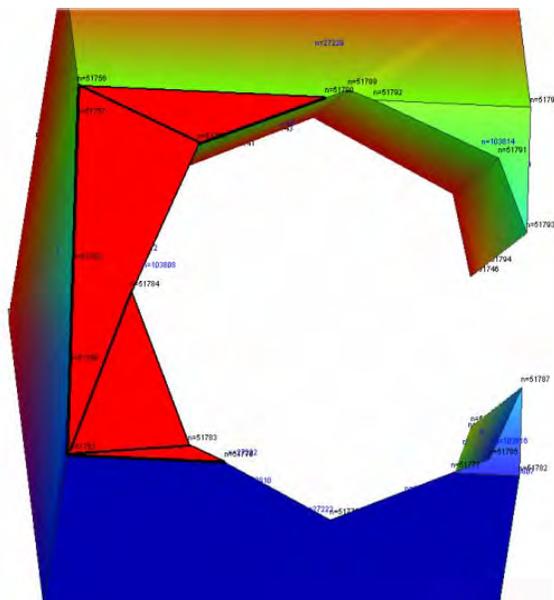


Рис. 9. Результат работы разрезания по секторам

Разрезание невыпуклых ячеек

В процессе проведения операции отсечения, могут возникать ситуации, при которых получаются

невыпуклые ячейки. В версиях генератора 5.0 и ранее использовался метод разрезания ячейки по биссектрисе угла двух внешних граней, образующих невыпуклость, но в процессе использования данного метода были выявлены недостатки. Например, разрезание в ряде случаев проводилось не оптимально с точки зрения распределения объемов между новыми ячейками, также появлялись дополнительные ребра малой длины. Было предложено модернизировать метод разрезания ячейки, исходя из условий минимизации добавления новых узлов в сетку и оптимизации распределения объемов между новыми ячейками. Модификация метода разрезания в основном заключалась в быстром поиске наиболее оптимальной плоскости разреза, в притягивании «ближних» к данной плоскости узлов, в адаптации существующих функций и итерационному разрезанию ячейки другими вариантами плоскостей в случае получения на предыдущей итерации ячеек неудовлетворительного качества.

Согласно формуле (1), описанной в разделе разрезания грани, проводим поиск ребер невыпуклости. Поиск потенциальных плоскостей разрезания, проходящих через ребра, осуществляется:

- по биссектрисе двух внешних граней;
- по двум плоскостям граней, образующих ребро невыпуклости.

Процесс разрезания невыпуклых многогранных ячеек можно разделить на 3 основных шага:

- 1) классификация узлов и граней ячейки относительно режущей плоскости.
- 2) оценка предварительного качества ячеек и выбор варианта оптимального разрезания.
- 3) построение новых ячеек.

Далее подробно рассмотрим эти шаги.

1. Классификация узлов и граней ячейки.

Классификация узлов и граней ячейки относительно режущей плоскости проводится по следующим типам:

- принадлежит плоскости разреза;
- в положительном полупространстве относительно плоскости разреза (далее «выше» плоскости разреза);
- в отрицательном полупространстве относительно плоскости разреза (далее «ниже» плоскости разреза).

Для грани дополнительно определяется, пересекает ли грань плоскость разреза.

Перед тем, как определить к какому типу относится грань, требуется классифицировать все ее узлы. На рис. 10 представлен пример классификации узлов относительно режущей плоскости. Узел 8 примет тип «ниже» плоскости, а узел 12 – «выше» плоскости.

Чтобы минимизировать количество новых узлов при разрезании, и как следствие количество новых граней и ячеек, реализовано изменение положения режущей плоскости путем добавления близких к ней узлов, имеющих в ячейке. Таким образом, узел 12 изменит тип на «принадлежит плоскости разреза» (т.к. расстояние между точкой разреза и узлом меньше $1/10$ от длины ребра [8, 12]).

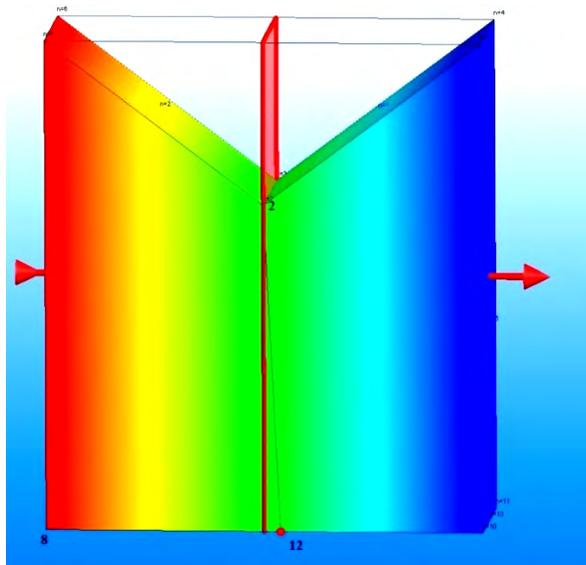


Рис. 10. Классификация узлов относительно режущей плоскости

В зависимости от того, как классифицированы узлы грани, грань принимает тип:

- принадлежит плоскости разреза (например, грань 1 на рис. 11);
- «выше» плоскости разреза (грань 2);
- «ниже» плоскости разреза (грань 7);
- пересекает плоскость разреза (грань 6).

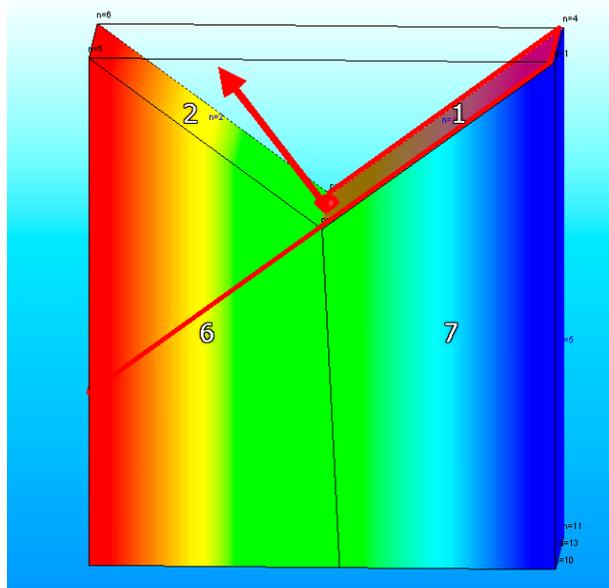


Рис. 11. Классификация граней относительно режущей плоскости

2. Оценка предварительного качества ячеек.

Чтобы выбрать оптимальный вариант разрезания, необходимо провести предварительную оценку качества потенциальных ячеек.

На первом этапе происходит оценка отклонения грани разреза от плоскости, полученного в результате притягивания узлов к плоскости сечения. Для этого

для всех узлов, имеющих тип «на плоскости разреза», считаем расстояние до плоскости разреза (исключение составляют узлы, лежащие на ребре невыпуклости, а также узлы грани, если плоскость разреза строилась по грани, образующей ребро невыпуклости) (рис. 12).

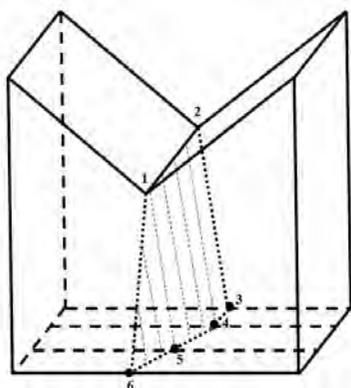


Рис. 12. Грань разреза, состоящая из узлов 1, 2, 3, 4, 5, 6

Вычисляем отклонение узлов от плоскости разреза следующим образом:

1) находим узел с наибольшим положительным и отрицательным отклонением от плоскости разреза (узел 3 и узел 6 на рис. 13);

2) вычисляем нормали к плоскостям по трем точкам – узлы ребра невыпуклости и узлы с максимальным отклонением (1, 2, 3 и 2, 1, 6 на рис. 13);

3) если угол между этими нормальными меньше 150° , то узлы грани считаются сильно отклоненными от плоскости. Поэтому меняем признак узла с максимальным отклонением на «выше» или «ниже» плоскости разреза в зависимости от знака.

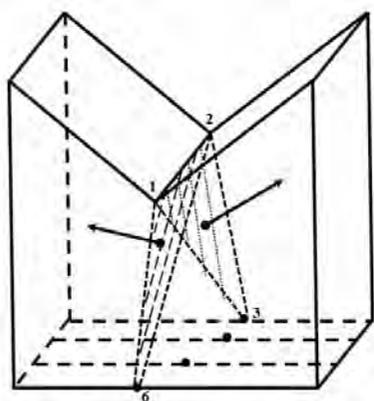


Рис. 13. Вычисление отклонения грани от плоскости

На втором этапе вычисляем коэффициент качества ячеек по формуле:

$$K = 1 - \frac{N_{ПУ}}{N_{ПГ}} + \frac{S_1}{S_2}, \quad (7)$$

где $N_{ПУ}$ – количество притянутых узлов; $N_{ПГ}$ – количество порезанных граней; S_1, S_2 – площади неразрезанных граней, лежащих выше и ниже плоскости разреза.

В качестве плоскости разреза выбирается плоскость с наибольшим значением коэффициента качества.

3. Построение новых ячеек.

На первом этапе сортируем грани ячейки по корзинам «выше» и «ниже» плоскости разреза. Если грань принадлежит плоскости разреза, то она добавляется в противоположный список от грани, соседней с ней по ребру невыпуклости.

Проводим разрезание граней, которые пересекаются с плоскостью разреза. Разрезание грани состоит из следующих шагов:

- поиск точек пересечения плоскости разреза с ребрами грани;
- упорядочиваем точки;
- формируем новые ребра;
- строим новые грани.

Перед этапом непосредственного построения новых ячеек запоминаем прежние состояния граней (номера разделяемых ячеек, список узлов). Новые ячейки формируются из граней, находящихся в разных корзинах. При разрезании ячейки в каждом из полупространств может быть сформировано несколько ячеек.

В случае получения после разрезания неудовлетворительной по качеству ячейки (большое соотношение объемов с соседями, наличие свободных ребер, отрицательный объем одной из новых ячеек), ячейка возвращается в исходное состояние и выбирается следующий по метрике вариант разрезания. Если ни одним из вариантов разрезаний невозможно получить удовлетворительные ячейки, производится полный откат до исходного состояния сетки.

На рис. 14–15 приведены примеры отсеченных ячеек сетки без разрезаний и с разрезаниями.

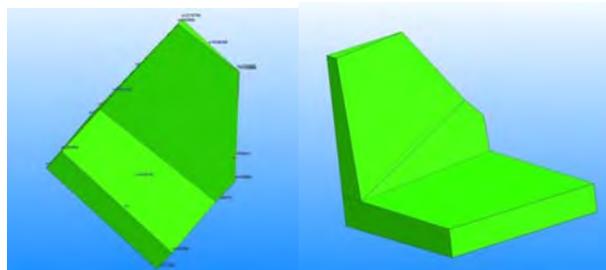


Рис. 14. Отсеченная невыпуклая ячейка и совокупность ячеек после разрезания на модели «Самолет»

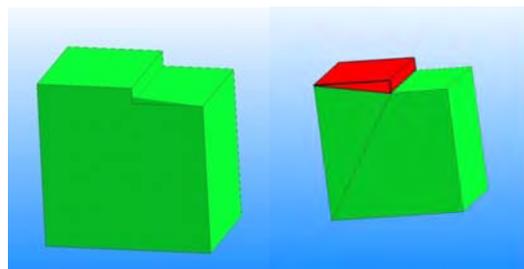


Рис. 15. Отсеченная невыпуклая ячейка и совокупность ячеек после разрезания на модели «Здание»

Статистика по разрезанию граней и ячеек для моделей «Здание» и «Самолет»

	«Здание» Число ячеек - 3660 тыс. Число граней - 11746 тыс.		«Самолет» Число ячеек 2235 тыс. Число граней - 7253 тыс.	
	Количество невыпуклых граней тыс.	Количество невыпуклых ячеек тыс.	Количество невыпуклых граней тыс.	Количество невыпуклых ячеек тыс.
Без разрезов	4,159	39,636	5,822	10,402
Разрезание ячеек по биссектрисе + одноточечное разрезание граней	0,442	5,868	0,800	5,765
Разрезание ячеек по биссектрисе + модифицированное разрезание граней	0,387	5,871	0,439	5,922
Модифицированное разрезание ячеек + одноточечное разрезание граней	0,433	5,119	0,801	5,767
Модифицированное разрезание ячеек + модифицированное разрезание граней	0,380	5,116	0,441	5,723

В таблице приведена статистика по различным вариантам разрезания невыпуклых граней и ячеек для практических задач «Здание» и «Самолет».

Заключение

В рамках генератора объемных сеток методом отсечения проводится работа по улучшению качества построенных расчетных сеток. В данном докладе были описаны модифицированные методы разрезания невыпуклых граней и ячеек. Приведена статистика по различным вариантам разрезания граней и ячеек для практических задач. При разрезании невыпуклых элементов данными методами видно, что статистика по качеству улучшилась, но будут проводиться работы по дальнейшей оптимизации.

Литература

1. Козелков А. С., Дерюгин Ю. Н., Зеленский Д. К. и др. Многофункциональный пакет про-

грамм ЛОГОС для расчета задач гидродинамики и теплопереноса на супер-ЭВМ: базовые технологии и алгоритмы // Труды XII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / Под ред. Р. М. Шагалиева – Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. С. 215–230.

2. Фархутдинов В. Ф., Тарасов В. И., Соловьев А. Н., Борисенко О. Н., Смолкина Д. Н., Кузьменко М. В. и др. Обзор возможностей по обработке геометрических и построению сеточных моделей в ЛОГОС.Препост // Труды XIV Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование». 2013. С. 585–592.

3. Avis D., Toussaint G. An efficient algorithm for decomposing a polygon into star-shaped polygons, 1999.

4. Dawei R., Yanpeng L. Algorithm of decomposing arbitrary polyhedrons into convex pieces, 2012.

5. J.owen S. Non-simplicial unstructured mesh generation U.S.A, 1999.

6. Хилл Ф. OpenGL. Программирование компьютерной графики. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2002. С. 355–357.