

## НОВЫЕ АЛГОРИТМЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЯЧЕЕК В ГЕНЕРАТОРЕ МЕТОДОМ ОТСЕЧЕНИЯ

*Блажнова Ксения Алексеевна (kablazhnova@vniief.ru), Борисенко Ольга Николаевна,  
Смолкина Дина Николаевна*

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

Настоящий доклад посвящен описанию алгоритмов автоматического улучшения качества поверхностных граней ячеек объемной сетки.

**Ключевые слова:** препроцессор пакета программ ЛОГОС, генератор сеток методом отсе-  
чения, качество ячеек, улучшение качества сетки.

## NEW ALGORITHMS FOR IMPROVING THE QUALITY OF CELLS IN CUT MESH GENERATION METHOD

*Blazhnova Ksenia Alekseevna (kablazhnova@vniief.ru), Borisenko Olga Nikolaevna,  
Smolkina Dina Nikolaevna*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The report is devoted to the description of algorithms for automatic improvement of the quality of surface faces of cells of a volumetric mesh.

**Key words:** preprocessor of the LOGOS software package, cut mesh generation method, grid quality improvement.

### Введение

В настоящее время при решении задач инженерного анализа в рамках пакета программ ЛОГОС [1] в связи с нарастающей сложностью расчетных моделей актуальной является задача совершенствования автоматического генератора неструктурированных объемных сеток с многогранными элементами методом отсе-  
чения [2]. Качество расчетных сеток при проведении расчетов является важным фактором, существенно влияющим на корректность описания физических процессов в решаемых задачах и точность получаемых численных решений.

В данной работе предложены алгоритмы автоматического улучшения качества поверхностных граней ячеек объемной сетки: разрезание частично совпадающих граней, разрезание сильно неплоских граней. Предложенные алгоритмы реализованы в рамках генератора объемных сеток с многогранными элементами методом отсе-  
чения в составе пакета программ ЛОГОС. Использование реализованных алгоритмов на ряде тестовых задач позволило улуч-

шить качество поверхностных граней и получить корректные призматические ячейки объемной сетки, что подтверждает применимость разработанных алгоритмов.

### Основные этапы работы генератора объемных сеток методом отсе- чения

Ячейки объемной сетки, используемой для численного моделирования процессов аэрогидромеханики, делятся преимущественно на две части: призматические ячейки вблизи моделируемого объекта и ячейки, заполняющие остальной объем. В рассматриваемом генераторе для заполнения внутреннего объема используется комбинация кубов, находящихся вдали от призматических ячеек, и усеченных кубов вблизи поверхности.

Неоднородная структура сетки является особенностью данного генератора. Вдали от границ модели ячейки сетки (ячейки декартовой адаптивной сетки) имеют форму куба, но они могут состоять более чем из шести граней. Вблизи границы модели формиру-

ются ячейки, являющиеся многогранными призмами. Отсеченные ячейки на стыке адаптивных ячеек и призм являются многогранниками произвольной формы. На рис. Рис. 1 приведен плоский срез сетки с обозначениями ячеек.

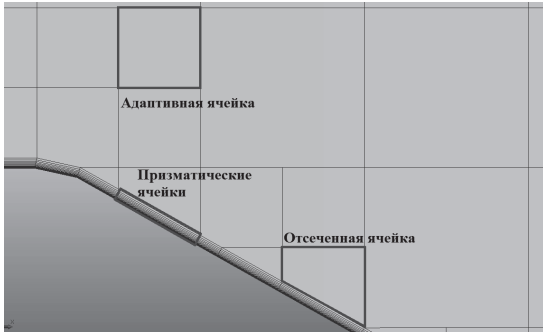


Рис. 1. Плоский срез сетки, построенной методом отсечения

Исходными данными для генератора является поверхностная сетка, состоящая из треугольников, построенная на геометрической модели с учетом кривизны поверхностей и сохранением характерных кривых геометрии. Характерные кривые – кривые, проходящие по особенностям геометрической модели (негладкие места стыковки поверхностей, острые ребра геометрии).

Поверхностная сетка, подаваемая генератору, должна быть удовлетворительного качества. Перед началом работы генератора поверхностная сетка проверяется на наличие в ней ошибок.

Процесс расчета объемной неструктурированной сетки состоит из следующих этапов:

- восстановление/получение характерных кривых (особенностей) модели;

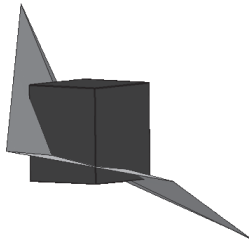


Рис. 2. Пример расположения треугольников относительно ячейки и полученная отсеченная ячейка с неплоской поверхностной гранью

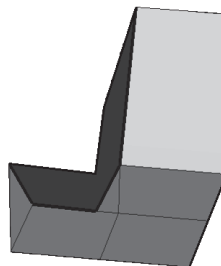
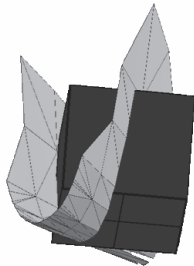
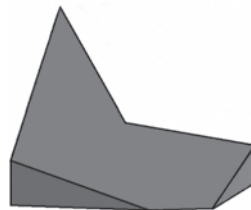


Рис. 3. Пример расположения треугольников относительно шаблонной ячейки и полученная отсеченная ячейка с неплоской поверхностной гранью

- построение смещенной поверхностной треугольной сетки;
- построение декартовой адаптивной сетки;
- проведение отсечения построенных адаптивных ячеек треугольниками смещенной поверхностной сетки;
- улучшение качества отсеченных ячеек;
- построение призматических ячеек.

### Диагностика искривленных граней объемной сетки

Поверхностные грани отсеченной многогранной ячейки в областях, содержащих характерные кривые, могут иметь сложную форму. Такие грани, например, могут быть неплоскими и с большим количеством узлов. Так же причинами формирования искривленных граней могут быть обрыв характерной кривой внутри ячейки или наличие крупных ячеек шаблонной сетки в областях с высокой кривизной исходной поверхности. В случае восстановления призматического слоя с сильно неплоской грани, все ячейки будут сильно неплоскими, что может приводить к снижению точности получаемого решения, вплоть до получения некорректных результатов расчета.

Степень искривленности грани вычисляется по формуле:

$$\alpha = 2 \cdot \arctg \left( \frac{d^2}{S} \right), \quad (1)$$

где  $d$  – максимальное расстояние между соседними узлами грани, умноженное на единичные вектор нормали грани;  $S$  – площадь грани. Грань считается сильно искривленной, если значение угла  $\alpha$  больше  $50^\circ$ .

Примеры ячеек с искривленными гранями приведены на рис. 2 и рис. 3.

## Разрезание искривленных граней

Для решения описанных выше проблем предложен алгоритм разрезания сильно неплоских граней. В ходе реализации алгоритма разрезания неплоских и невыпуклых граней поставлены и решены две основные задачи:

- формализован критерий для выявления искривленных граней;
- разработан и реализован алгоритм разбиения неплоских граней на простые фигуры с учетом особенностей триангуляционной сетки.

Алгоритм основывается на идее непрерывности поля нормалей для грани отсеченной ячейки. Для каждого узла грани по соседним узлам считается нормаль с учетом особенностей триангуляционной сетки ( $\vec{e}$ ).

Для новой грани узлы набираются так, чтобы угол между их нормальями был не более  $45^\circ$ .

$$\cos(\vec{e}, \vec{n}) < 0,7; \quad (2)$$

где  $\vec{e}$  – нормаль в узле с учетом особенностей треугольной сетки,  $\vec{n}$  – нормаль в узле для поверхностной грани. Направления нормалей схематично показаны на рис. 4.

Разрезание грани проводится до тех пор, пока количество узлов не станет меньше четырех или по-

ле нормалей для нее не будет гладким. Примеры разрезания граней представлены на рис. 5 и рис. 6.

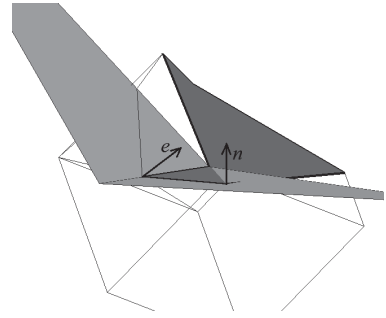


Рис. 4. Обозначения к формуле (2)

## Диагностика частично совпадающих граней объемной сетки

После проведения отсечения ячеек адаптивной сетки треугольниками поверхностной сетки или в результате работы некоторых методов улучшения качества сетки, могут появиться ячейки с частично совпадающими гранями. Грани одной ячейки, имеющие больше двух общих узлов, соединенных ребрами и не лежащих на одной прямой, будем называть частично совпадающими гранями. Поверхностная и внутренняя грани ячейки могут совпадать частично или полностью, так же могут появляться случаи двух внутренних совпадающих граней.

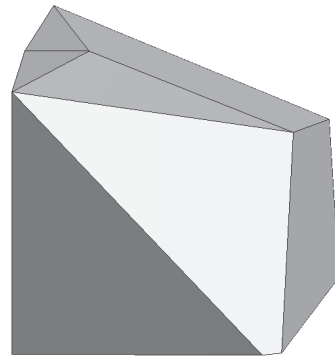
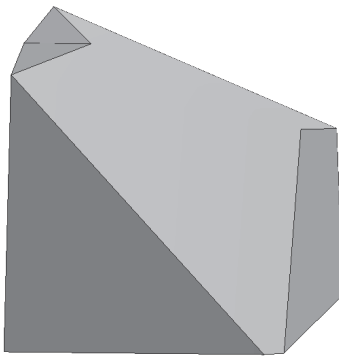


Рис. 5. Пример разрезания неплоских и невыпуклых граней

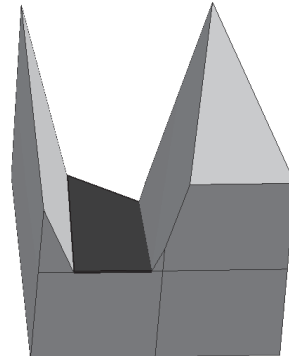
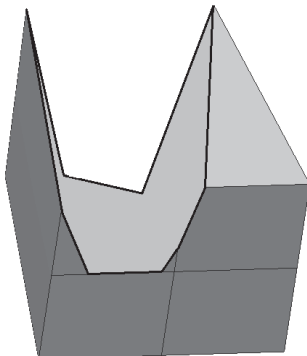


Рис. 6. Пример работы разрезания неплоских и невыпуклых граней

Поиск частично совпадающих граней проводится среди всех ячеек, содержащих поверхностные грани. Алгоритм реализован следующим образом: среди отсеченных ячеек ведется поиск граней, имеющих больше двух общих узлов, соединенных ребрами, и далее проверяется их взаимное расположение.

На рис. 7 приведен пример ячейки с частично совпадающими гранями: узлы ABC образуют общую часть граней ABCD и AECB.

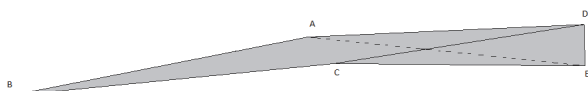


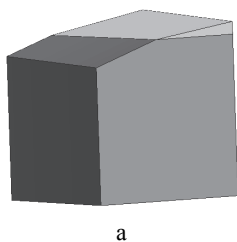
Рис. 7. Ячейка с частично совпадающими гранями

### Разрезание частично совпадающих граней

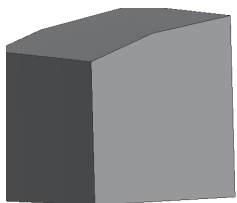
Для решения описанной выше проблемы предложен алгоритм разрезания частично совпадающих граней. В ходе реализации алгоритма поставлены и решены две основные задачи:

- формализован критерий для выявления частично совпадающих граней;
- разработан и реализован алгоритм разрезания частично совпадающих граней.

Алгоритм состоит из нескольких этапов. На первом этапе проводится проверка возможности объединения двух ячеек: рассматриваемой ячейки и соседней через частично совпадающую внутреннюю грань с образованием выпуклой ячейки. В случае если такое объединение корректно, то оно выполняется. На рис. 8 представлен пример объединения ячеек, имеющих частично совпадающую грань. На рис. 8,а представлены ячейки до объединения, а на рис. 8,б представлен результат объединения ячеек.



а

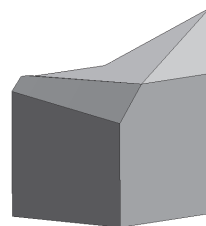


б

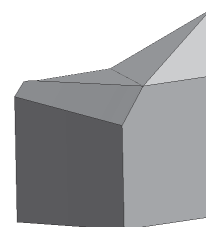
Рис. 8. Объединение ячейки с частично совпадающими гранями с соседней: а – ячейки до объединения, б – результат объединения

В случае если на первом этапе не удастся объединить две ячейки, содержащие частично совпадающую грань, то выполняется процесс разрезания. На втором этапе в рассматриваемой ячейке совпадаю-

щая часть удаляется, а в соседней ячейке становится поверхностной гранью. Далее для соседней ячейки вызывается процедура объединения поверхностных граней. На рис. 9 представлен пример разрезания частично совпадающих граней. На рис. 9,а приведен пример входных данных, а на рис. 9,б – результат работы алгоритма разрезания.



а



б

Рис. 9. Пример разрезания частично совпадающих граней: а – пример входных данных, б – результат работы алгоритма разрезания

### Заключение

Анализ результатов работы предложенных алгоритмов, реализованных в рамках генератора методом отсечения в составе пакета программ ЛОГОС, показал, что для всех задач из базы тестирования выявлено улучшение качества поверхностных граней ячеек объемной сетки. Тестирование работы алгоритмов проведено на 72 задачах, в результате получено, что алгоритм разрезания искривленных граней обрабатывает до 75 % неплоских граней в многогранной сетке. Предложенный в работе алгоритм разрезания частично совпадающих граней позволяет обрабатывать до 90 % граней в многогранной сетке.

### Список литературы

1. Козелков А. С., Дерюгин Ю. Н., Жучков Р. Н., Зеленский Д. К., Полищук С. Н., Лашкин С. В., Глазунов В. А., Яцевич С. В., Курулин В. В. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: Физико-математические модели расчета задач аэро-, гидродинамики и теплопереноса // Препринт № 111. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013.
2. Смолкина Д. Н., Борисенко О. Н., Попова Н. В., Черенкова М. В., Гиниятуллина А. Г., Кузьменко М. В., Чухманов Н. В., Потехина Е. В., Турусов М. Р. Автоматический генератор неструктурированных многогранных сеток в препроцессоре пакета программ ЛОГОС // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 2. С. 25–39.