

# ПОСТРОЕНИЕ СМЕЩЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ГЕНЕРАТОРЕ ОБЪЕМНЫХ СЕТОК МЕТОДОМ ОТСЕЧЕНИЯ В ПРЕПОСТПРОЦЕССОРЕ ЛОГОС

*Н. В. Попова, О. Н. Борисенко, Е. В. Потехина, М. Р. Турусов*

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

## Введение

Пакет программ ЛОГОС [1] предназначен для моделирования процессов аэро-, гидро- и газодинамики, турбулентного перемешивания, теплопереноса, прочности и деформации. Применяемые численные методы ориентированы на использование неструктурированных сеток, состоящих из произвольных многогранников.

В препостпроцессоре ЛОГОС [2] реализован метод автоматической генерации неструктурированных сеток с многогранными элементами на основе декартовой адаптивной сетки. Сетки, построенные таким методом, позволяют описать топологически сложные области исходной модели: области высокой кривизны, острые кромки. Среди зарубежных аналогов, использующих похожий подход к построению сеток, можно выделить такие приложения как STAR-CCM+, GAMBIT[3], OPENFOAM[4].

В первую очередь генератор ориентирован на построение сеток для методики ЛОГОС-Аэрогидромеханика. Ячейки объемной сетки делятся на два вида: призматические ячейки вблизи моделируемого объекта и ячейки, заполняющие основной объем (рис. 1). Для заполнения внутреннего объема используется комбинация кубов вдали от призматических ячеек и усеченных кубов вблизи поверхности.

Исходными данными для генератора является триангуляция, построенная на геометрической модели с учетом кривизны поверхностей и сохранением характерных кривых геометрии. Характерные кривые – это кривые, проходящие по негладким местам стыковки поверхностей, острые ребра геометрии. На триангуляции выделены границы. Каждая граница представляет собой набор треугольников, для которого задано граничное условие. Процесс расчета объемной сетки состоит из этапов, описанных ниже.

- Восстановление характерных кривых модели.
- Построение смещенной поверхности.
- Построение декартовой адаптивной сетки.
- Отсечение адаптивных ячеек треугольниками поверхностной сетки.
- Улучшение качества отсеченных ячеек.
- Построение призматических ячеек.

## 1. Построение смещенной поверхности

Одним из этапов расчета объемной сетки на основе адаптивного шаблона является построение смещенной поверхности. Такая поверхность необходима для формирования слоя призматических ячеек (рис. 2).

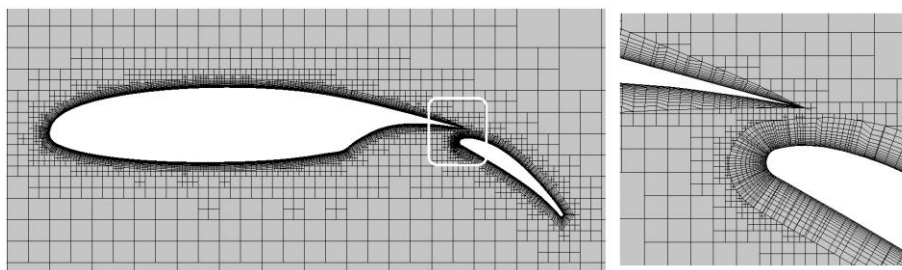


Рис. 1. Вид сетки, построенной методом отсечения

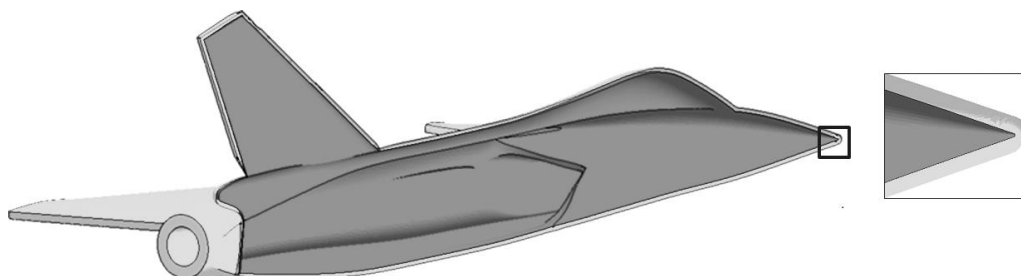


Рис. 2. Темным цветом выделена исходная поверхность, светлым – смещенная поверхность

Исходными данными является замкнутая триангуляция, разделенная на наборы связанных треугольников с заданными величинами сдвигов (границы), и ребра характерных кривых (рис. 3). Необходимо построить смещенную поверхность без самопересечений, учитывающую характерные особенности модели.

Построение смещенной поверхности основано на геометрическом методе и состоит из трех основных этапов:

- построение оптимального направления сдвига в каждой точке;
- вычисление максимально возможной величины смещения вдоль направления сдвига, не превышающей заданного значения;
- согласование подвижных и неподвижных границ.

### 1.1. Построение оптимальных направлений сдвигов

В зависимости от положения точки в ней рассчитывается средняя нормаль, являющаяся первым приближением оптимального направления сдвига.

Для точек на гладких поверхностях смещаемых границ (рис. 4, а) средняя нормаль рассчитывается как сумма нормалей смежных с ней треугольников, взвешенных по углу и величине смещения (1):

$$n_i = \frac{\sum_j^{N_i} n_{ij} \alpha_{ij} d_{ij}}{\left[ \sum_j^{N_i} n_{ij} \alpha_{ij} d_{ij} \right]}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{ij}$  – угол в  $j$ -м треугольнике при  $i$ -й вершине,  $d_{ij}$  – величина смещения  $j$ -го треугольника,  $n_{ij}$  – нормаль  $j$ -го треугольника при  $i$ -й вершине.

Если точка принадлежит ребру характерной кривой, то на основе средних плоскостей треугольников, разделенных ребрами характерной кривой, формируется двугранный угол. Направление сдвига в такой точке определяется биссектральной плоскостью двугранного угла (рис. 4, б).

Нормаль в точках, входящих в треугольники смещаемых и неподвижных границ, сначала вычисляется по биссектральной плоскости двугранного угла, а затем проектируется на среднюю плоскость треугольников неподвижной границы.

Если точка является вершиной характерной кривой, то для нее строится многогранный угол из ребер характерных кривых, выходящих из рассматриваемой вершины (рис. 5, б). В многогранный угол вписывается шар единичного радиуса таким образом, чтобы он оказался как можно ближе к вершине. Направление смещения в вершине определяется, как направление вектора, соединяющего вершину и центр шара.

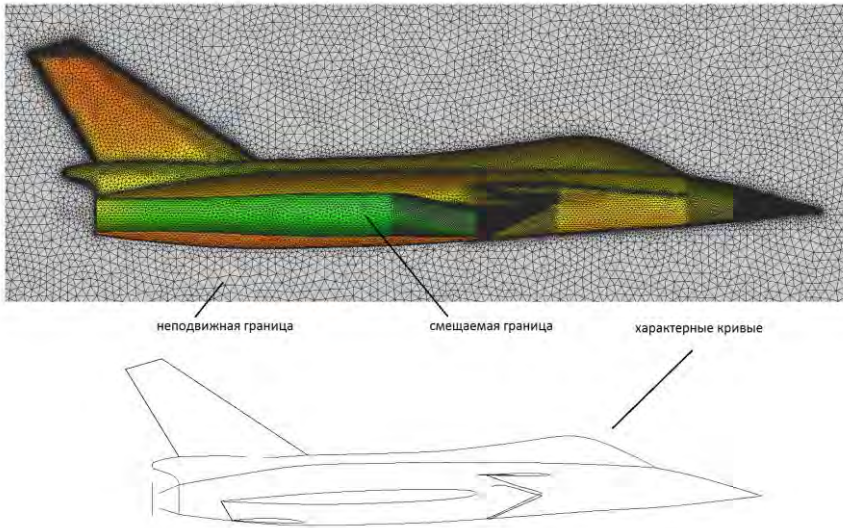


Рис. 3. Исходные данные этапа построения смещенной поверхности

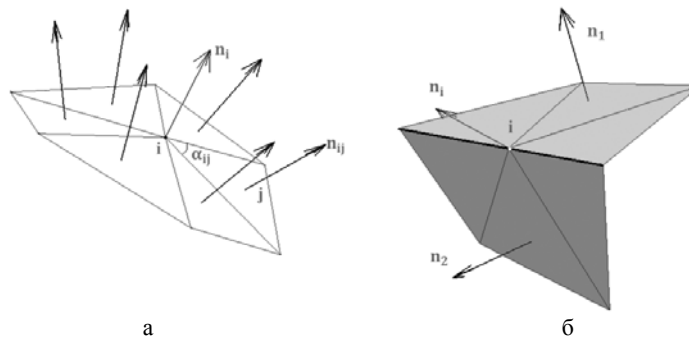


Рис. 4. Определение направления сдвига: а – на гладкой поверхности, б – на ребре характерной кривой

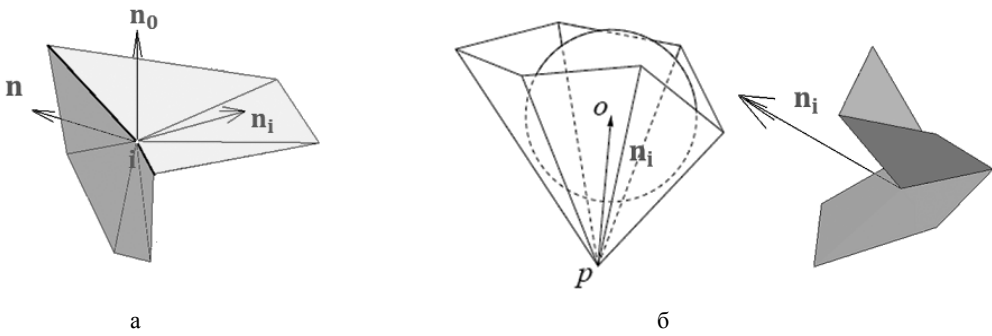


Рис. 5. Определение направления сдвига: а – в граничных точках, б – в вершинах характерных кривых

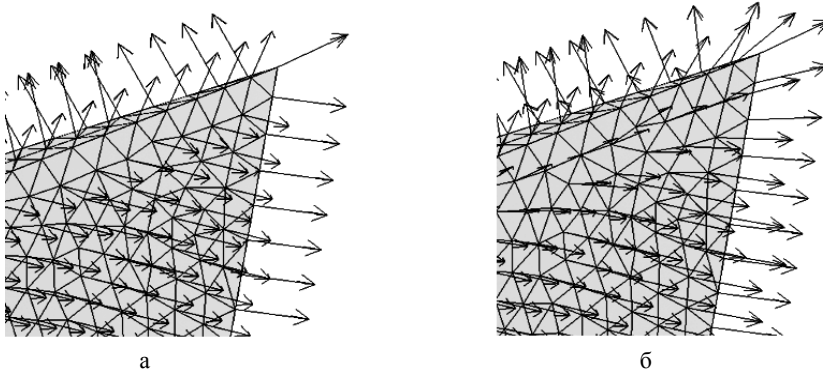


Рис. 6. Сетка с направлениями сдвига: а – первое приближение направлений сдвигов, б – результат сглаживания

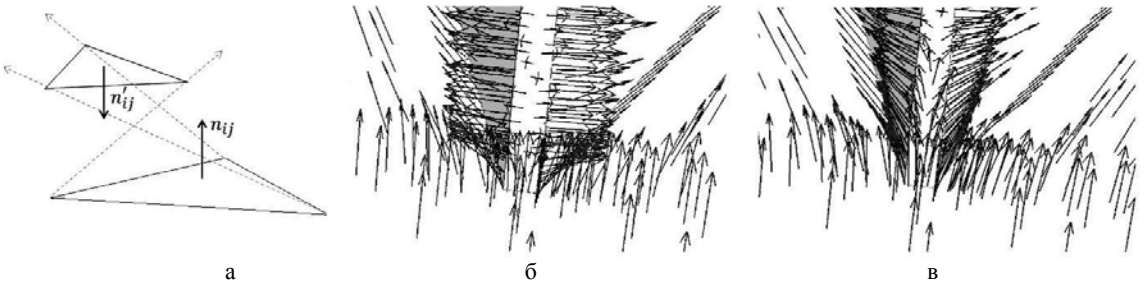


Рис. 7. Смещение вершин треугольника вдоль найденных направлений сдвига, приводящее к его развороту на  $180^\circ$ : а – схема смещения, б – направления сдвигов в области стыковки фюзеляжа с хвостовым оперением, нуждающиеся в дополнительном сглаживании, в – направления сдвига после дополнительного сглаживания

После вычисления первых приближений направлений сдвига проводится их сглаживание. Оно осуществляется подвижным фронтом от характерных кривых вглубь гладких поверхностей. Направление в точке рассчитывается с учетом нормализованной суммы направлений в соседних точках, взятых с весовыми коэффициентами по формуле (2):

$$n'_i = n_i(1 - \alpha) + \frac{\sum_j^{N_i} n_{ij} \omega_{ij}}{\sum_j^{N_i} \omega_{ij}} \alpha. \quad (2)$$

Весовой коэффициент  $\omega_{ij}$  для  $j$ -й вершины при сглаживании нормали в  $i$ -й точке рассчитывается по формуле (3) [5]:

$$\omega_i = \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha_{j+1}}{2} + \operatorname{tg} \frac{\alpha_j}{2}}{l_{ij}}, \quad (3)$$

где  $\alpha_{i+1}$  и  $\alpha_i$  – углы, смежные с ребром, соединяющим  $i$ -ю и  $j$ -ю точки,  $l_{ij}$  – его длина. На рис. 6 изображена сетка с направлениями сдвигов до сглаживания и после.

В некоторых моделях присутствуют области, в которых смещение вдоль найденных направлений сдвигов на заданную величину приводит к развороту треугольников более чем на  $90^\circ$  (рис. 7, а, б). Если говорить о задачах авиации, то такие ситуации возникают в местах стыковки фюзеляжа с хвостовым оперением и крыльями. Эти области нуждаются в дополнительном сглаживании направлений сдвигов.

## 1.2. Определение величины смещения вдоль оптимального направления

Начальные величины смещения в узлах треугольников рассчитываются как минимальные про-

екции нормалей смежных с ними треугольников на направление смещения (4):

$$d_i = \min \left\{ \frac{d_{ij}}{n_{ij} l_i} \right\}, \quad (4)$$

где  $d_{ij}$  – заданная величина смещения  $j$ -го треугольника,  $n_{ij}$  – нормаль  $j$ -го треугольника,  $l_i$  – направление смещения в  $i$ -м узле.

Для каждого треугольника исходной поверхностной сетки рассчитывается допустимая величина смещения  $d$  – расстояние между смещенным и исходным треугольниками, при котором треугольник может повернуться не более чем на  $90^\circ$  по отношению к исходному положению. Исходя из допустимого расстояния сдвига, корректируются начальные величины смещений в узлах треугольников по формуле (5):

$$d'_{ij} = \min \left\{ d_{ij}, 0,9 \frac{d}{n_{ij} l_i} \right\}, \quad (5)$$

где  $d'_{ij}$  – новая величина смещения в  $i$ -й точке  $j$ -го треугольника,  $d_{ij}$  – исходная величина смещения в  $i$ -й точке  $j$ -го треугольника,  $d$  – допустимое расстояние между исходным и смещенным треугольниками,  $n_{ij}$  – нормаль  $j$ -го треугольника,  $l_i$  – направляющий луч в  $i$ -й точке.

Исходя из рассчитанных направлений сдвигов и величин смещений, вычисляются положения точек смещенной поверхности, и проверяется сохранение формы исходной поверхности. Для этого рассчитывается допустимый угол между нормальными треуголь-

ника в исходном и смещенном положениях. Он меняется от  $17^\circ$  в областях, близких к характерным особенностям модели, до  $60^\circ$  в областях, удаленных от характерных кривых. Если угол между нормальными итогового и исходного треугольников превышает допустимый угол, то считается, что для рассматриваемого треугольника смещенная поверхность нуждается в сжатии. Для этого у треугольника находится узел с наименьшей величиной смещения  $d_{\min}$ . Для двух других узлов треугольника величина смещения корректируется по формуле (6):

$$d'_{ij} = \min \left\{ d_{ij}, \frac{d_{ij} + \frac{d_{\min}}{n_{ij} l_i}}{2} \right\} \quad (6)$$

где  $d'_{ij}$  – новая величина смещения  $i$ -го узла  $j$ -го треугольника,  $d_{ij}$  – исходная величина смещения,  $n_{ij}$  – нормаль  $j$ -го треугольника,  $l_i$  – направляющий луч в  $i$ -й точке. На рис. 8 изображена смещенная поверхность до коррекции формы и после.

Если заданная величина смещения больше, чем расстояние, на которое можно сдвинуть поверхность, то в процессе построения возникают пересечения исходной и смещенной поверхностей или самопересечения. В этом случае происходит итерационное сжатие смещенной поверхности. Уменьшение величины смещения осуществляется не для всей смещенной поверхности, а только в проблемных областях – в узлах треугольников, которые были определены, как пересекающиеся (рис. 9).

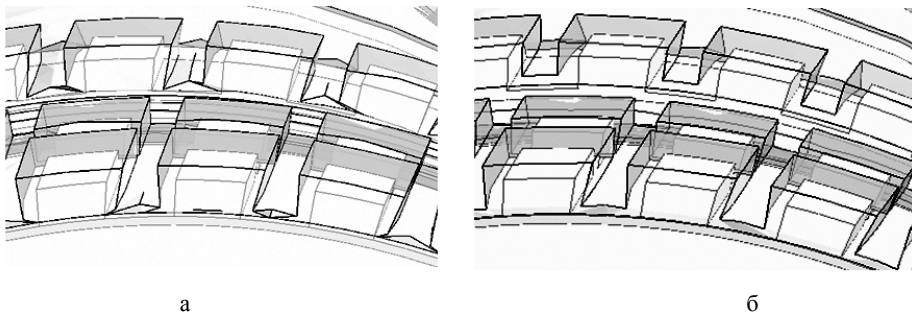


Рис. 8. Коррекция формы смещенной поверхности:  
а – до коррекции; б – после коррекции

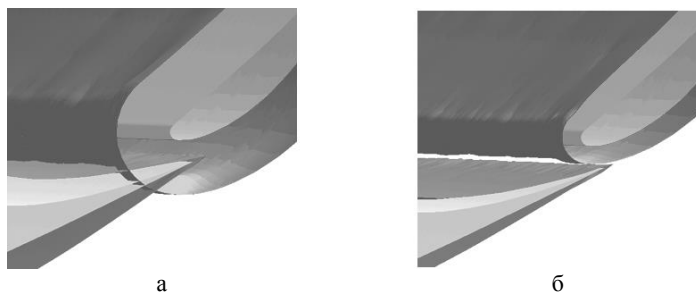


Рис. 9. Пересечение и сжатие смещенной поверхности:  
а – пересечение границ, б – сжатие смещенной поверхности

Формирование и коррекция формы смещенной поверхности, проверка на самопересечение и пересечение и, при необходимости, поджатие смещенной поверхности осуществляется итерационно до тех пор, пока имеются пересечения.

### 1.3. Согласование подвижных и неподвижных границ

Если треугольник подвижной границы смещенной поверхности накладываются на треугольники неподвижной границы, то проводится их согласование. Для этого находятся точки пересечения ребер треугольников неподвижных границ с краем смещенной границы. Чтобы полностью не перестраивать триангуляцию неподвижной границы, для сшивки вводится отступ, связывающий точки пересечения с треугольниками неподвижной границы. Толщина отступа не превосходит точность модели и определяется минимальной высотой треугольника. На рис. 10 представлены этапы согласования границ.

## 2. Анализ качества смещенной поверхности

Качество объемной сетки вблизи модели зависит от качества сетки смещенной поверхности. Поэтому в модуле построения смещенной поверхности реализованы средства поиска геометрических и топологических ошибок. Критерии качества смещенной поверхности описаны ниже:

- отсутствие свободных ребер, принадлежащих только одному треугольнику (рис. 11);
- отсутствие совпадающих ребер, принадлежащих не двум треугольникам, а более;
- отсутствие вырожденных треугольников с нулевыми площадями;
- отсутствие пересечений треугольников.

Также оцениваются объемные призматические ячейки. Основания призм являются соответствующие треугольники исходной и смещенной триангуляции. Критерии качества описаны ниже:

- отсутствие призм с отрицательным объемом;
- отсутствие призм с самопересечением;
- отношение площадей оснований не менее 0.001;
- угол между основаниями не более  $60^\circ$ ;
- отношение расстояния между центрами оснований к заданной величине смещения в диапазоне  $[0,5; 1,5]$ ;
- отсутствие плоских призм (основания в одной плоскости);
- угол между основанием и боковой гранью в диапазоне  $[3^\circ, 225^\circ]$ .

## 3. Тестирование модуля построения смещенной поверхности

Модуль построения смещенной поверхности реализован в рамках библиотеки 3DTV [6], подключаемой к препроцессору. Для проведения испытаний на соответствие требованиям и функциональную пригодность производится запуск тестового приложения. Входными данными является xml-файл, содержащий информацию о параметрах расчета и ссылки на файлы с данными о триангуляции, о ребрах характерных кривых. После зачитывания входных данных и диагностики исходной триангуляции на наличие геометрических и топологических ошибок запускается метод построения смещенной поверхности. Выходной поток представляет собой vtk-файл с данными о смещенной поверхности, файлы о качестве сетки и сравнения с эталонными значениями.

Для исследования надежности модуля реализована возможность итерационного запуска по заданному диапазону значений величины смещения с нижней и верхней границей и шагом.

Тестирование программы осуществляется как в автономном режиме на ПЭВМ, а так и в автоматизированном режиме. Для визуального анализа сетки используются такие приложения, как ScientificView [7], ParaView [8].

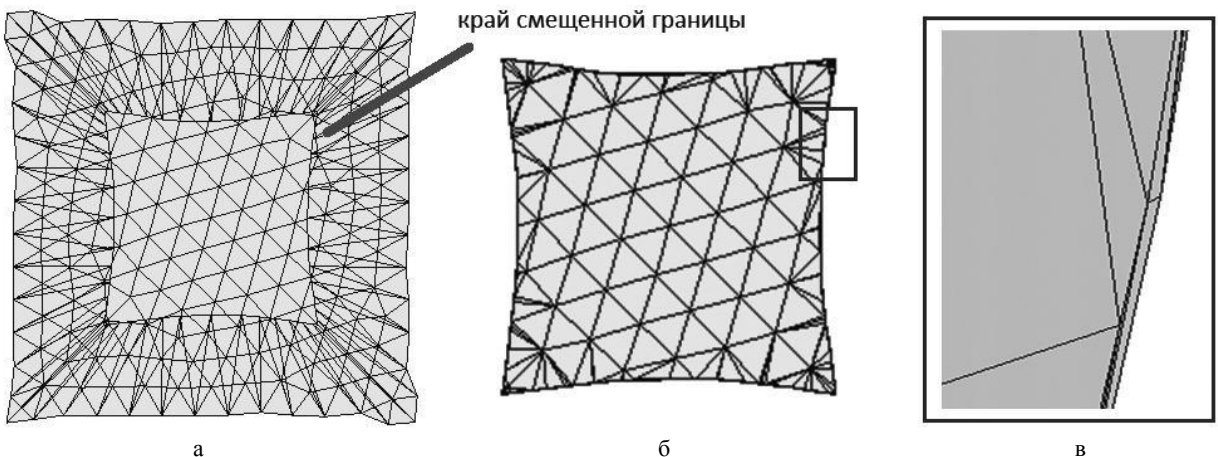


Рис. 10. Согласование подвижной и неподвижной границ; а – неподвижная граница до согласования узлов; б – неподвижная граница после согласования; в – тонкая прослойка треугольников для согласования границ

Для автоматизированной проверки внесенных в код изменений производится запуск скрипта на языке Python для построения смещенных поверхностей из большого набора геометрических моделей. Тесты запускаются параллельно, что позволяет быстро получать обратную связь, находить ошибки, готовить версии библиотеки для подключения к препроцессору и поставок на предприятия.

#### 4. Примеры построения смещенной поверхности

Вид исходной и смещенной поверхностей для задачи «Двухзвенный профиль крыла» изображены на рис. 11. На рис. 12 изображена смещенная поверхность для модели «Рафаль», на рис. 13 – для модели пассажирского самолета DLRF6.

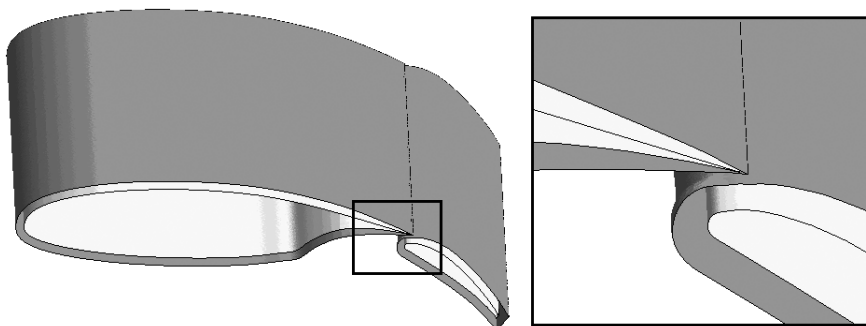


Рис. 11. Смещенная поверхность для модели «Двухзвенный профиль крыла»

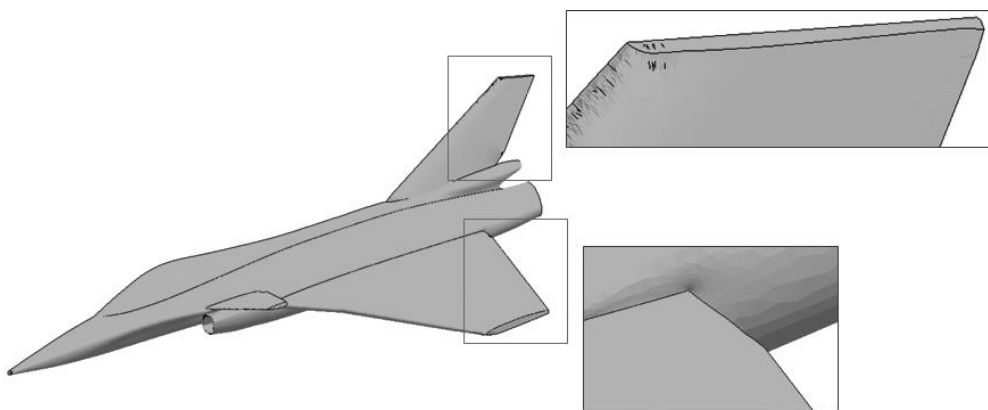


Рис. 12. Смещенная поверхность для модели «Рафаль»

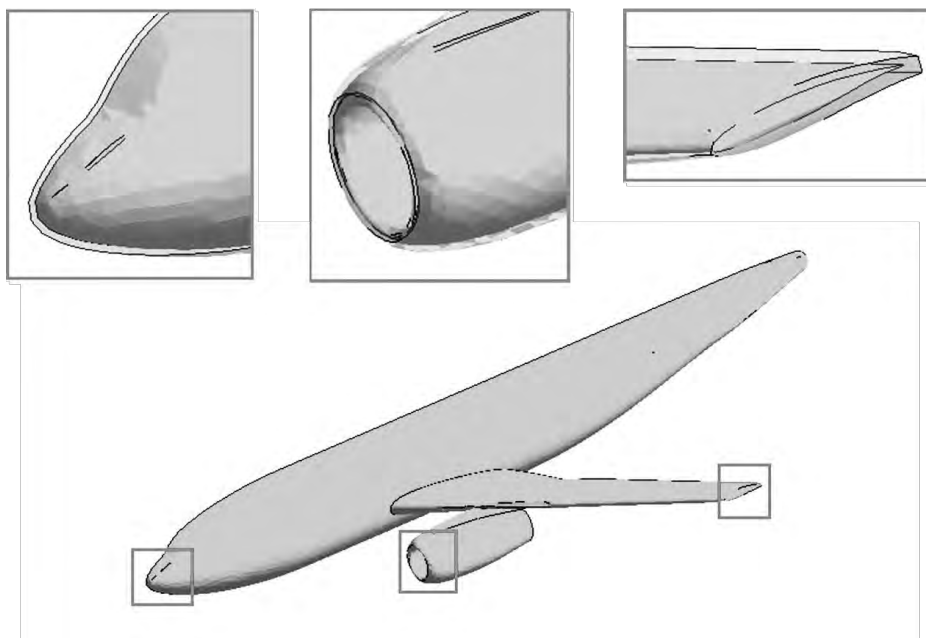


Рис. 13. Смещенная поверхность для модели пассажирского самолета DLRF6

## Заключение

В статье рассмотрены основные этапы построения смещенной поверхности, приведены критерии качества, описаны способы проведения тестовых испытаний. Модуль построения смещенной поверхности используется в генераторе неструктурированных многогранных сеток методом отсечения, реализованного в препостпроцессоре программного комплекса ЛОГОС.

## Литература

1. Козелков А. С., Дерюгин Ю. Н., Зеленский Д. К., Глазунов В. А. и др. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС для расчета задач гидродинамики и тепломассопереноса на суперЭВМ. Базовые технологии и алгоритмы // Сборник трудов XII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование», Саров, 2011. С. 215.

2. Фархутдинов В. Ф., Тарасов В. И., Соловьев А. Н., Борисенко О. Н. 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.

1. Козелков А. С., Дерюгин Ю. Н., Зеленский Д. К. и др. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС для расчета задач гидродинамики и тепломассопереноса на суперЭВМ // Тезисы докладов на XIV

Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование», Саров. 2012. С. 108.

3. Jiangtao Hu, Lee Y. K. Lee, Blacker T., Jin Zhu. Overlay grid based geometry cleanup // 11<sup>th</sup> IMR. 2002.

4. Karlsson J. Implementing Anisotropic adaptive mesh refinement in OpenFOAM // Master's Thesis in Computer Science, Algorithms, Languages and Logic. 2012.

5. Floater M. S. Mean value coordinates. Computer Aided Geometric Design, 20(1): 19–27, 2003.

6. Щеляев А. Программный комплекс 3DTransVidia – качественная трансляция цифровой модели изделия // САПР и графика, «Проектирование промышленных объектов». 2014. Вып. 6. С. 49–54.

7. Потехин А. Л., Тарасов В. И., Фирсов С. А., Логинов И. В. и др. «ScientificView – параллельная система постобработки результатов, полученных при численном моделировании физических процессов» // ВАНТ, Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 2008. Вып. 4. С. 37–45.

8. Henderson A., Ahren J., etc. The ParaView guide. Published by Kitware, Inc. 2004.

9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Изд-во «Наука», 1974.

10. Александров А. Д. Выпуклые многогранники. Москва, Ленинград: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950.

11. Extensible Markup Language [Electronic resource]. Mode of access: [www.xml.com](http://www.xml.com).

12. VTK 5.4.2 Documentation. [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.vtk.org>.