

АЛГОРИТМ УПРОЩЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТРЕУГОЛЬНОЙ СЕТКИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЗАДАЧ АЭРОГИДРОДИНАМИКИ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ЛОГОС

Евстифеева Елена Олеговна (EOEvstifeeva@vniief.ru)

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

В работе рассматривается новый подход к перестроению поверхностной треугольной сетки, фасеточное представление которой преимущественно состоит из треугольников с длиной ребра, меньше заданного пользователем размера. Подход основан на алгоритме упрощения исходной поверхностной сетки, который заключается в итерационном «схлопывании» ребер в оптимальную точку. При выборе оптимальной точки учитывается несколько критериев: сохранение объема исходной модели, получение треугольников высокого качества в окружении удаляемого ребра и др. Упрощение сетки происходит до тех пор, пока длины ребер текущей сетки не будут соответствовать размерам, предварительно вычисленным на исходной сетке с учетом кривизны поверхности и заданных пользователем размеров. После выполнения алгоритма упрощения производится поиск треугольников низкого качества и треугольников, не соответствующих заданным размерам, формируются отдельные области, которые перестраиваются методом подвижного фронта.

Ключевые слова: пакет программ ЛОГОС, препроцессор, генератор поверхностной треугольной сетки.

ALGORITHM FOR SURFACE TRIANGULAR MESH SIMPLIFICATION DURING PREPARING AEROHYDRODYNAMICS MODELING IN LOGOS SOFTWARE PACKAGE

Evstifeeva Elena Olegovna (EOEvstifeeva@vniief.ru)

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The paper describes a new mesh generation approach for surface triangular meshes, primarily consisted of triangles with edge length less than user-defined size. The approach is based on an algorithm of initial surface mesh simplification that «collapses» edges to an optimal point. There are several criteria in choosing the optimal point: volume preservation of initial model, generation of high quality triangles in collapsed edge neighborhood, etc. Mesh simplification continues until all edge lengths in current mesh correspond to sizes computed for initial mesh according to surface curvature and sizes defined by user. After simplification algorithm execution the search of low quality triangles and triangles with insufficient edge lengths is ran, then separated triangles regions are formed and meshed by advanced front method.

Key words: LOGOS software package, pre-postprocessor, surface triangular mesh generator.

Введение

В настоящее время в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разрабатывается пакет программ ЛОГОС, который предназначен для подготовки и проведения моделирования физических процессов для задач аэрогидродинамики и прочности с возможностью последующего анализа результатов. Подготовка дискретного представления исходной модели для проведения инженер-

ного анализа в части задач аэрогидродинамики заключается в последовательном построении поверхностной и объемной сетки в препроцессоре ЛОГОС.

Построение поверхностной треугольной сетки по модели в фасеточном представлении стандартным способом осуществляется в пространстве \mathbb{R}^2 методом подвижного фронта для предварительно выделенных областей треугольников [1]. Затем получен-

ная сетка переносится в \mathbb{R}^3 с помощью заданной функции отображения. Для моделей с достаточно нетривиальным описанием поверхности (скругления, изгибы, небольшие выступы и т. п.) и большим количеством треугольников (более 1млн) построение сетки может занимать длительное время.

В работе рассмотрен новый подход к перестроению моделей, фасеточное представление которых преимущественно состоит из треугольников с длиной ребра, меньше заданного пользователем размера. В основе данного подхода лежит алгоритм упрощения сетки.

Большинство моделей, для которых предполагается использовать альтернативное перестроение сетки, представляют собой произвольные загруженные сетки с большим количеством треугольников, для которых необходимо перестроение с более крупным размером (см. рис. 1), или сетки, полученные с помощью генератора замкнутой оболочки [2], фрагмент которой представлен на рис. 2.

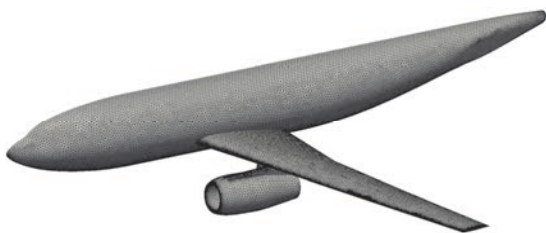


Рис. 1. Фрагмент подробной сетки [3], построенной с малым заданным размером

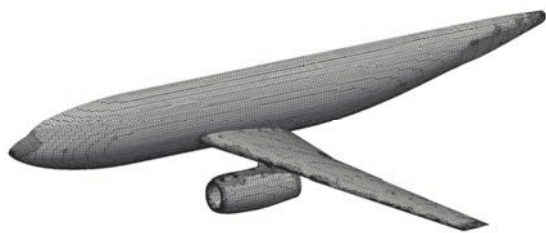


Рис. 2. Фрагмент сетки [3], построенной с помощью генератора замкнутой оболочки

Сетки такого вида зачастую являются излишне подробными, в том числе в областях, где этого не требуется. В этом случае для сокращения времени подготовки расчетной модели и времени расчета необходимо провести перестроение сетки для получения минимального числа треугольников, описывающих поверхность с необходимой точностью. Для сеток, полученных после генерации замкнутой оболочки, перестроение необходимо в том числе для улучшения качества сетки, а также для равномерного распределения треугольников без необоснованных «сгущений» в сетке для поверхностей с постоянным значением кривизны. Для модели, представленной на

рис. 2, отчетливо выделяются полосы сгущений на фюзеляже самолета при визуальном осмотре.

Новый подход к перестроению сетки

Новый подход к перестроению сетки состоит из следующих ключевых этапов:

- 1) вычисление и сглаживание метрик;
- 2) упрощение сетки;
- 3) оптимизация построенной сетки.

Вычисление и сглаживание метрик

На первом этапе производится вычисление метрик во всех вершинах сетки на основе кривизны поверхности [4]. Под метрикой в вершине подразумевается желаемый размер ребер, инцидентных данной вершине, при котором поверхность в окрестности данной вершины будет аппроксимирована с заданной точностью. Затем вычисленные значения метрик ограничиваются размерами (минимальным и целевым), заданными пользователем для каждой из выделенных границ. Для характерных кривых также учитываются размеры, заданные пользователем для каждой кривой.

Поскольку метрики могут сильно различаться для вершин смежных треугольников, например, на стыке границ, на которых заданы разные пользовательские размеры, или в местах резкого изменения кривизны, то производится сглаживание вычисленных метрик. Сглаживание метрик – это изменение значения метрик в соседних вершинах сетки таким образом, чтобы их отношение не превышало заданного порогового значения (скорости роста). Чтобы не потерять описание поверхности, соответствующее вычисленной кривизне, сглаживание метрик производится только в меньшую сторону. Метрика для ребра вычисляется как среднее значение метрик в вершинах этого ребра.

Пример фрагмента сетки на стыке двух границ с большим скачком в значениях метрик для соседних вершин приведен на рис. 3. На границе слева, соответствующей плоскости симметрии, метрика ограничена пользовательским размером, равным 100,0; на границе справа, соответствующей носовой части фюзеляжа, метрика ограничена значением 0,1.

После выполнения этапа сглаживания метрик распределение метрик в вершинах для фрагмента сетки с рис. 3 было преобразовано в соответствие с рис. 4.

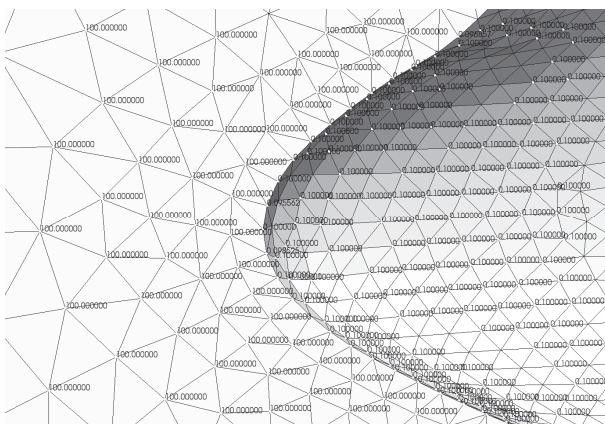


Рис. 3. Распределение метрик для фрагмента сетки на стыке двух границ до сглаживания метрик

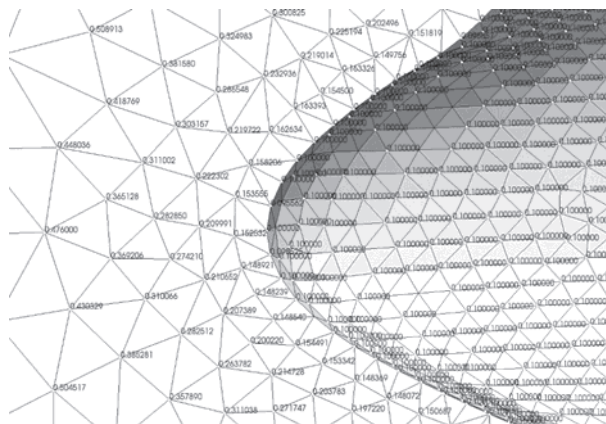


Рис. 4. Распределение метрик для фрагмента сетки на стыке двух границ после сглаживания метрик

Упрощение поверхностной сетки

Основным этапом нового подхода к построению сетки является упрощение сетки, идея которого изложена в [5].

В настоящей работе предлагается модификация алгоритма упрощения, основной целью которого является получение сетки высокого качества с размерами ребер, соответствующими вычисленным на первом этапе метрикам.

Алгоритм упрощения поверхностной сетки состоит из двух этапов:

- упрощение характерных кривых;
- упрощение границ.

Упрощение характерных кривых, в том числе кривых, разделяющих разные границы сетки, производится отдельно для возможности дальнейшего распараллеливания алгоритма упрощения для обработки границ (при условии неизменности ограничивающих их ребер). В остальном, за исключением разницы в некоторых параметрах, алгоритм упрощения характерных кривых совпадает с алгоритмом упрощения границ и заключается в следующем:

1) вычисление информации об окружении (треугольники, ребра, средняя нормаль и др.) и поиск оптимальной точки «схлопывания» для каждого реб-

ра (принадлежащего характерной кривой или треугольникам границы);

2) составление очереди из всех рассматриваемых ребер, сортированной по возрастанию веса ребра, вычисленного по определенному закону;

3) повторение итерации упрощения:

- завершение алгоритма упрощения, если для всех ребер установлен специальный вес;

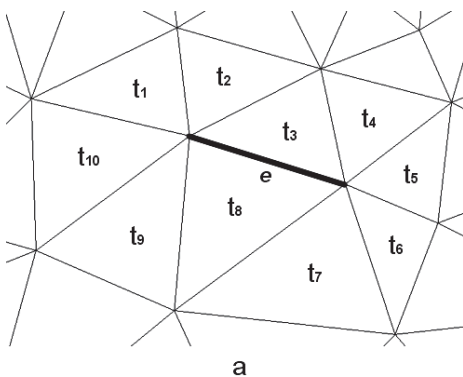
- замена первого в очереди ребра e (см. рис. 5а) вершиной v (или «схлопывание» ребра), координаты которой совпадают с координатами оптимальной точки, вычисленной для выбранного ребра (см. рис. 5б);

- проверка геометрической и топологической допустимости произведенной операции «схлопывания» ребра;

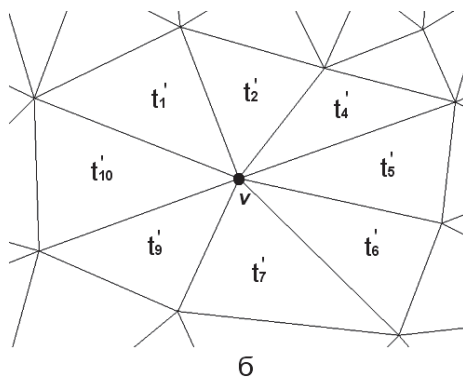
- проверка, что размеры всех измененных ребер, инцидентных новой вершине, не превосходят среднего значения метрик в вершинах данных ребер;

- в случае успешного прохождения проверок с предыдущих шагов – обновление информации для всех ребер, инцидентных новой вершине, обновление очереди; в случае неуспешной проверки – установление для ребра специального веса и откат операции «схлопывания»;

- переход к следующей итерации.



а



б

Рис. 5. Фрагмент сетки: а – до итерации упрощения, б – после итерации упрощения

Поиск оптимальной точки

Для выбора позиции новой вершины было реализовано несколько режимов «схлопывания» ребра: в оптимальную точку, в одну из вершин ребра, в среднюю точку ребра. При упрощении характерных кривых используется режим «схлопывания» в одну из вершин ребра, при упрощении границ – в оптимальную точку. При чем для ребер, у которых только одна из вершин принадлежит характерной кривой, «схлопывание» производится именно в эту вершину.

Позиция оптимальной точки «схлопывания» может рассматриваться как решение задачи оптимизации, где дана целевая функция $f_C(e, v)$, определяющая вес замены ребра e на вершину v , причем v выбирается таким образом, чтобы значение f_C было минимальным.

При составлении системы уравнений $a_i^T v = b_i$ для поиска оптимальной точки каждое новое ограничение проверяется на линейную независимость с уже добавленными. Таким образом новое ограничение (a_n, b_n) добавляется к существующим ограничениям (A, b) только в том случае, если нормаль к плоскости a_n с отклонением на угол α не является линейной комбинацией нормалей $\{a_i : 0 < i < n\}$ предыдущих ограничений. Если ограничение удовлетворяет этим условиям, то оно является α -допустимым. После того, как были найдены все ограничения, новая вершина v вычисляется как:

$$v = A^{-1}b. \quad (1)$$

При составлении системы уравнений для поиска оптимальной точки учитываются следующие критерии:

- 1) сохранение объема;
- 2) оптимизация формы треугольников;
- 3) оптимизация объема.

Когда треугольник $t = (v_0^t, v_1^t, v_2^t)$ заменяется треугольником $t' = (v, v_1^t, v_2^t)$, происходит изменение объема, который ограничен тетраэдром (v, v_0^t, v_1^t, v_2^t) .

Если оптимальная точка v находится «над» поверхностью треугольника t (т. е. вне модели), то будем считать, что объем тетраэдра положительный и модель локально увеличилась в объеме относительно треугольника t . Соответственно, если вершина v находится «под» поверхностью треугольника t , то изменение в объеме отрицательное, следовательно, модель уменьшилась. Первое ограничение добавляется для сохранения объема модели и имеет следующий вид:

$$\sum_i V(v, v_0^t, v_1^t, v_2^t) = \sum_i \frac{1}{6} \begin{vmatrix} v_x & v_{0x}^t & v_{1x}^t & v_{2x}^t \\ v_y & v_{0y}^t & v_{1y}^t & v_{2y}^t \\ v_z & v_{0z}^t & v_{1z}^t & v_{2z}^t \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 0. \quad (2)$$

Второе условие направлено на оптимизацию формы треугольников, полученных в окрестности ребра после его «схлопывания», таким образом, что равносторонние треугольники являются предпочтительнее вытянутых. Для измерения величины качества треугольника по форме было выбрано следующее выражение:

$$f_S(e, v) = \sum_i L(v, v_i)^2, \quad (3)$$

правосторонняя часть которого есть сумма квадратов длин ребер, инцидентных новой вершине v .

Минимизацией f_S достигается максимальное качество полученных треугольников. Так как изменяемая локальная поверхность является плоской с учетом некоторого небольшого отклонения, выбор v не сильно изменяет сумму площадей инцидентных треугольников после операции удаления ребра. Таким образом, минимизация длин ребер гарантирует, что для полученных треугольников отношение площади к периметру максимально.

В случае, когда новые ограничения линейно зависят от предыдущих ограничений, добавленных в матрицу, для получения решения потребуются рассмотреть дополнительные условия, например, оптимизацию объема.

Оптимизация объема заключается в минимизации суммы беззнаковых объемов тетраэдров, определяющих значение локального отклонения для соответствующих треугольников в окружении удаленного ребра. Для минимизации отклонения ищется минимум следующей функции:

$$f_V(e, v) = \sum_i V(v, v_0^t, v_1^t, v_2^t)^2. \quad (4)$$

Очередность обработки ребер

После первого шага алгоритма упрощения для каждого ребра заполнена информация о его окружении, включая список треугольников и ребер, инцидентных вершинам ребра, оптимальную точку для «схлопывания».

На втором шаге алгоритма упрощения выполняется составление очереди из всех рассматриваемых ребер, сортированная по возрастанию веса ребра. Вес ребра вычисляется подстановкой оптимальной точки в функционал (4).

Ребра, для которых не удалось выполнить операцию упрощения, помечаются специальным весом и перемещаются в конец очереди. Также при выполнении упрощения сетки на границах в очередь не добавляются ограничивающие их ребра, которые предварительно обрабатываются на этапе упрощения характерных кривых.

Проверка топологической и геометрической допустимости операции

После выполнения каждой итерации упрощения до глобального изменения сетки производится поиск топологических и геометрических ошибок сетки в окрестности новой вершины.

Топологически недопустимым является появление многосвязных треугольников. Для проверки геометрической допустимости операции оценивается изменение качества треугольников в окружении новой вершины: минимальное качество треугольника не должно опускаться ниже порогового значения. Также учитывается изменение углов между нормальными векторами в окружении новой вершины.

Проверка ребер на соответствие заданным размерам

Завершающим этапом итерации упрощения является проверка размеров измененных ребер в окружении новой вершины. Длина l_i' измененного ребра не должна превышать среднего значения метрик в его вершинах:

$$l_i' \leq \alpha_{lower} \cdot \frac{m_i^1 + m_i^2}{2}, \quad (5)$$

где m_i^1, m_i^2 – метрики в вершинах ребра; α_{lower} – масштабирующий коэффициент, допускающий отклонение размера.

Если неравенство (5) выполнено, то итерация упрощения считается успешной и выполняется переход к следующей итерации, иначе проверяется выполнение следующих условий:

$$l_i' \leq \alpha_{upper} \cdot \frac{m_i^1 + m_i^2}{2}, \quad (6)$$

$$q_{avg}' > q_{avg}, \quad (7)$$

где α_{upper} – масштабирующий коэффициент, допускающий отклонение размера; q_{avg} и q_{avg}' – среднее значение качества треугольников в окрестности заменяемого ребра до и после итерации упрощения.

Если выполнены оба неравенства (6) и (7), то итерация упрощения считается успешной.

При выборе масштабирующих коэффициентов нужно учитывать, что $1 \leq \alpha_{lower} < \alpha_{upper}$. Например, при установке значений $\alpha_{lower} = 1,1$; $\alpha_{upper} = 1,25$ гарантируется, что размер полученных ребер не будет превышать значений, вычисленных по кривизне, более чем на 25 %.

Оптимизация построенной сетки

На завершающем этапе нового подхода к перестроению сетки выполняется оптимизация сетки, полученной после этапа упрощения. Оптимизация заключается в следующем:

1) локальное перестроение областей с несоответствующим размером и низким качеством треугольников, а также большой разницей площадей соседних треугольников;

2) исправление ошибок, критичных для генерации объемной сетки, таких как пересечения треугольников [6], затягивание отверстий, удаление вырожденных треугольников, исправление многолистности.

Результаты

Для демонстрации работы алгоритма упрощения на излишне подробных моделях рассмотрим сетку для модели гидродинамики, фрагмент которой представлен на рис. 6. Средний размер ребра сетки вне зон видимых сгущений для фрагмента, выделенного рамкой, равен 0,0008.

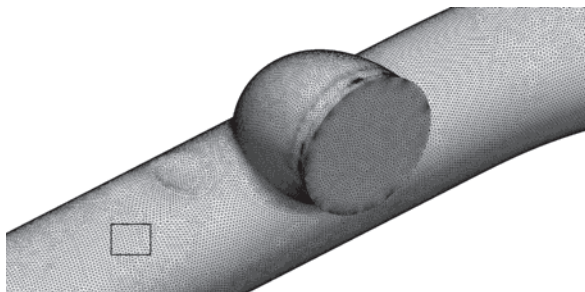


Рис. 6. Фрагмент излишне подробной сетки

Значения пользовательских размеров h_{min} и h_{max} заданы равными 0,001 и 0,005 соответственно. После этапа сглаживания метрик значения метрик для фрагмента, выделенного рамкой на рис. 6, приблизительно равны h_{max} , что согласуется с кривизной поверхности.

После выполнения алгоритма упрощения сетка для модели с рис. 6 имеет вид, представленный на рис. 7. Максимальный размер ребра построенной сетки не превышает $\alpha_{upper} \cdot h_{max} = 0,00625$, где $\alpha_{upper} = 1,25$, минимальный размер ребра имеет значение не ниже h_{min} .

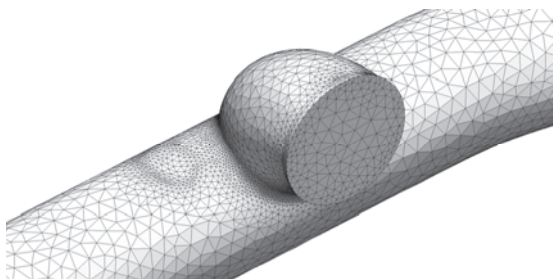


Рис. 7. Фрагмент сетки после выполнения алгоритма упрощения

Фрагмент сетки с рис. 7 после локального перестроения представлен на рис. 8. Кругами серого цвета выделены зоны сетки, которые были перестроены. В данном случае были найдены треугольники с качеством ниже порогового значения $\alpha_Q = 0,6$, а также пары смежных треугольников, для которых отношение площадей удовлетворяет неравенству $\frac{a_{t_1}}{a_{t_2}} < 0,3$, $a_{t_1} < a_{t_2}$. Найденные треугольники затем

были дополнены треугольниками окружения, инцидентными их вершинам, и выделенные несвязные зоны были перестроены для улучшения качества сетки.

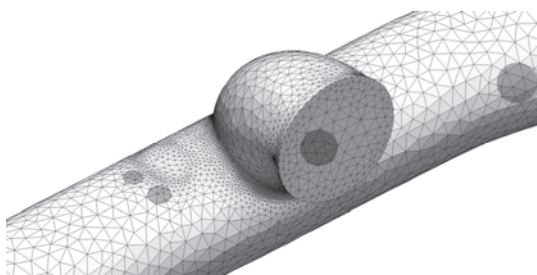


Рис. 8. Фрагмент сетки после этапа оптимизации с выделенными перестроенными зонами

Сравнение скорости построения сетки с помощью стандартного и разработанного подходов представлено на рис. 9. В качестве тестовых моделей рассматривались сетки с большим количеством треугольников (от 1,4 млн треугольников).

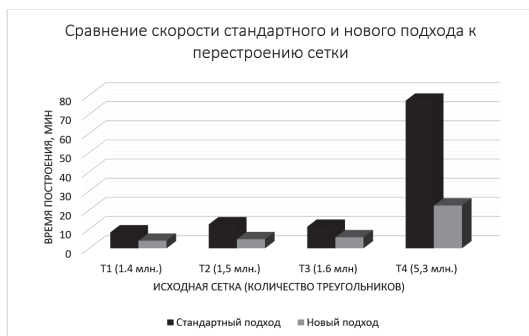


Рис. 9. Сравнение времени построения для сеток большой размерности

Сравнение поверхностных сеток, построенных с помощью стандартного и нового подходов, проводилось с помощью программы metro [0], измеряю-

щей расстояние Хаусдорффа. По результатам сравнения отклонение не превышает $0,0009d$, где d – длина диагонали габаритной коробки, описывающей модель.

Заключение

В результате проведенной работы был разработан новый подход к перестроению подробных фасеточных моделей, состоящих из большого количества ячеек, и реализован алгоритм упрощения поверхностной треугольной сетки. Приведены примеры результатов работы алгоритма упрощения сетки, а также нового подхода к перестроению сетки в целом.

Применение реализованных алгоритмов в сквозной цепочке подготовки дискретных расчетных моделей для задач аэрогидродинамики позволило сократить время построения поверхностных сеток для подробных фасеточных моделей в препостпроцессоре пакета программ ЛОГОС.

Список литературы

1. 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 / 15-ая научно-техническая конференция «Молодежь в науке» // Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. С. 73–78.
2. Никитин В. А., Шурыгин А. В., Новиков И. Г., Егоров А. В., Соколов С. С., Панов А. И. Программный модуль генерации замкнутой поверхностной триангуляционной сетки в пакете программ ЛОГОС // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2021. Вып. 2. С. 70–79.
3. 3rd AIAA CFD Drag Prediction Workshop, San Francisco, June 2006 // URL: <http://aiaa-dpw.larc.nasa.gov/Workshop3/workshop3.html> (дата обращения: 08.07.2021).
4. Белова А. И., Лукичев А. Н., Борисенко О. Н. Вычисление кривизны дискретных поверхностей в генераторе поверхностных триангуляционных сеток ЛОГОС.Препост / 15-ая научно-техническая конференция «Молодежь в науке» // Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. С. 34–40.
5. Lindstrom P., Turk G. Fast and Memory Efficient Polygonal Simplification // Proc. Visualization '98, IEEE Computer Soc. Press. Oct. 1998. P. 279–286.
6. Евстифеева Е. О., Панкратов Д. М., Цалко Т. В. Алгоритмы автоматического исправления пересечений, реализованные в генераторе поверхностных треугольных сеток в пакете программ ЛОГОС / Международная конференция XXII Харитоновские тематические научные чтения // Сборник тезисов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2021. С. 43–45.
7. Cignoni P., Rocchini C., Scopigno R. Metro: Measuring Error on Simplified Surfaces. // Technical Report B4-01-01-96, Istituto I. E. I.-C. N. R. – Pisa, Italy. January. 1996.