

Научная статья / Original Article

УДК 004.94: 004.925.8

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188125>

EDN: <https://www.elibrary.ru/XSQFVX>

МЕТОД И АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ МНОГОТЕЛЬНОЙ СБОРКИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ

А.А. Захаров, А.А. Панкин, Н.М. Субботина, А.В. Февральских✉

Общество с ограниченной ответственностью «ТЕСИС»,

г. Москва, Россия

✉ a.fevralskih@gmail.com

Цитирование: Захаров А.А., Панкин А.А., Субботина Н.М., Февральских А.В. Метод и алгоритм построения геометрической оболочки многотельной сборки на основе математической модели упругой деформации // Труды МАИ: электрон. журнал. № 147. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188125>

Аннотация. В работе представлен метод построения триангулированной оболочки CAD-модели, состоящей из множества тел, разработанный на основе математической модели упругой деформации. Математическая модель включает расчет «сил» деформации и упругости, реализованный в алгоритме компьютерного моделирования таким образом, чтобы предотвращать вырождение треугольников и их самопересечения. Расчет включает: определение силы растяжения/сжатия на рёбрах и высотах треугольников оболочки; определение силы изгиба оболочки и силы ее притяжения к исходной геометрии. Для обеспечения численной устойчивости в алгоритме для расчета шага итерационного интегрирования введён параметр, ограничивающий максимальное смещение вершин за одну итерацию. Преимущества разработанного метода и алгоритма заключаются в их устойчивости к мелким особенностям и дефектам геометрии, обеспечении связанности треугольников, гладкости в соответствии с заданными геометрическими допусками и

особенностями обрачиваемых тел. Алгоритм предназначен для использования в пакетах программ семейства CAD/CAE и может быть использован для решения широкого круга задач компьютерного моделирования. Апробация метода и алгоритма приведена на примере построения граничных условий в задаче численного моделирования течения на основе метода контрольных объемов (CFD-моделирование) с использованием генератора гекса-сеток с подвешенными узлами.

Ключевые слова: триангулированная оболочка; метод построения; CAD-сборка; CFD-моделирование.

METHOD AND ALGORITHM FOR CONSTRUCTING A GEOMETRIC SHELL OF A MULTI-BODY ASSEMBLY BASED ON A MATHEMATICAL MODEL OF ELASTIC DEFORMATION

A.A. Zakharov, A.A. Pankin, N.M. Subbotina, A.V. Fevral'skikh ✉

«TESIS» Limited Liability Company,

Moscow, Russia

✉ a.fevral'skih@gmail.com

Citation: Zakharov A.A., Pankin A.A., Subbotina N.M., Fevral'skikh A.V. Method and algorithm for constructing a geometric shell of a multi-body assembly based on a mathematical model of elastic deformation // Trudy MAI. 2026. No. 147. (In Russ.).

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188125>

Abstract. This paper presents a method for constructing a triangulated shell of a CAD model composed of multiple bodies, developed on the basis of a mathematical model of elastic deformation. The mathematical model includes the computation of deformation and elasticity «forces» implemented within a computer simulation algorithm in a way that prevents triangle degeneration and self-intersections. The computation comprises: determining stretching/compression forces acting on edges and on triangle heights of the shell; determining shell bending forces; and determining the attraction force that pulls the shell toward the original geometry. To ensure numerical stability, the algorithm introduces a parameter used in the iterative integration step calculation that limits the maximum displacement of vertices per iteration (a CFL-type restriction in the

sense of bounding per-iteration motion by a characteristic local length scale). The advantages of the developed method and algorithm are stated as robustness to small features and geometric defects, preservation of triangle connectivity, and achieving smoothness in accordance with prescribed geometric tolerances and the characteristics of the wrapped bodies. The algorithm is intended for use in CAD/CAE software families and can be applied to a wide range of computer modeling tasks. The method and algorithm are tested on an example related to setting up boundary conditions in a computational fluid dynamics (CFD) flow simulation based on the finite volume method, using a hexahedral mesh generator with hanging nodes. The method is validated on a defective multi-body assembly example, including a car geometry case. The results demonstrate that combining elastic constraints with attraction to the source geometry enables obtaining a closed shell and improves shape stability compared with a variant that relies on attraction only. The resulting triangulated shell is intended for practical application in geometry processing pipelines and preparation of computational models based on surface envelopes.

Keywords: multibody assembly; shell generation; elastic deformation; CFD modeling.

Введение

Задача о построении триангулированной оболочки многотельной CAD-сборки (CAD – computer aided design – автоматизированное проектирование) актуальна для различных процессов цифровой поддержки жизненного цикла изделий [1; 2; 3; 4]. В частности, одним из важнейших этапов формирования вычислительного проекта по CFD-моделированию течений (CFD – computational fluid dynamics – вычислительная динамика жидкости) вблизи объектов техники, состоящих из множества тел – так называемой CAD-сборки – является определение обтекаемой поверхности. Обтекаемая поверхность используется для построения сеточной модели в методе контрольных объемов и постановки граничных условий задачи CFD-моделирования. В большинстве известных пакетов программ определение обтекаемой поверхности выполняется или на этапе подготовки геометрии области течения, или на этапе построения сеточной модели – в зависимости от методики работы с конкретной программой (Fluent,

CFX, StarCCM+, OpenFoam и др.) [5, 6, 7, 8, 9, 10]. Пример схемы вычислительного проекта по CFD-моделированию обтекания компоновки крыла и оперения показан на рисунке 1: каждый элемент этой схемы является частью GUI, через который вызывается соответствующая программа со своим графическим интерфейсом и соответствующими затратами времени на ее загрузку, памяти и пр. Эти этапы являются достаточно трудоемкими и зачастую наиболее длительными в процессе подготовки вычислительного проекта по CFD-моделированию.

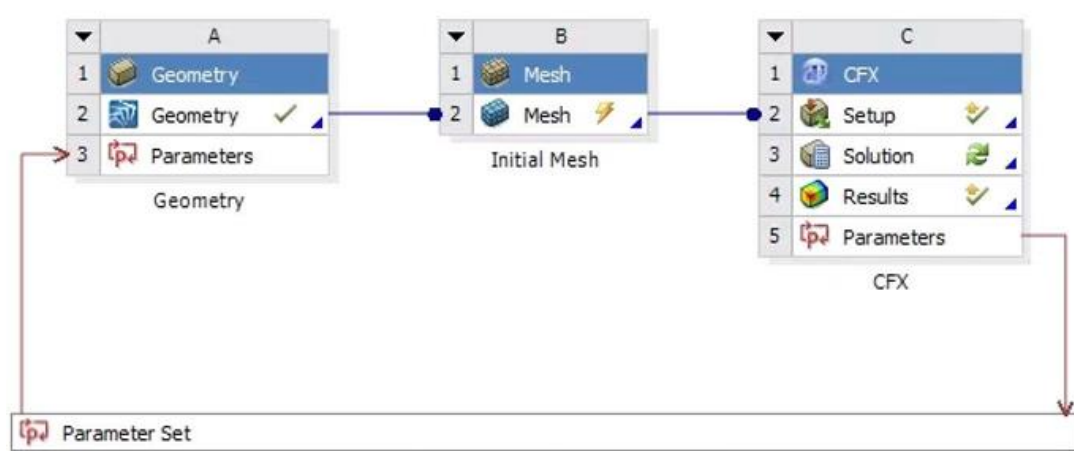


Рисунок 1 – Схема вычислительного проекта в Ansys Workbench [5]

Рассматриваемый же в данной работе подход позволяет вычеркнуть первые 2 этапа этой схемы и в разы ускорить расчёт вычислительных проектов.

В рамках ANSYS типовой подход к подготовке CFD-проекта для Fluent/CFX строится вокруг единого пайплайна Workbench: импорт/сборка CAD → подготовка геометрии (SpaceClaim или DesignModeler) → построение области течения (enclosure/вычитание твердых тел, закрытие протечек, устранение самопересечений, дефичеринг мелких элементов) → присвоение именованных наборов граней (Named Selections) для граничных условий → построение сетки (ANSYS Meshing, Fluent Meshing, ICFM CFD, TurboGrid) → постановка и расчет в решателе → постобработка [11]. Практически важно, что определение обтекаемой поверхности в ANSYS часто материализуется как набор именованных граней/тел, которые должны быть топологически согласованы и

«водонепроницаемы», иначе дальнейшие этапы (автоматическая генерация домена/сеток, корректная постановка BC) становятся нестабильными и начинают требовать ручного исправления геометрии [12].

Для Fluent распространены два сценария: (1) классический Workbench-сценарий с сеткой из ANSYS Meshing и дальнейшей настройкой в Fluent (инфляционные слои, локальные размеры, poly/hexcore в зависимости от доступных модулей), и (2) workflow «Watertight Geometry» или «Fault-tolerant meshing» непосредственно во Fluent Meshing, когда упор делается на устойчивую автоматизацию подготовки «грязной» CAD-геометрии и быстрое получение расчетоспособной сетки. Для CFX чаще держится разделение: сетка готовится внешними средствами (ANSYS Meshing или ICEM CFD), а постановка задачи выполняется в CFX-Pre с характерными для CFX интерфейсами/моделями (например, многочисленные варианты сопряжений, вращающиеся области). На практике различие не в уравнениях, а в том, где именно происходят затраты по времени: Fluent часто позволяет быстрее прийти до первого результата на сложной геометрии за счет более агрессивной автоматизации и терпимости к дефектам CAD, тогда как CFX нередко требует более аккуратной сетки и более дисциплинированной подготовки области, но дает удобную постановку для классов задач типа канальных течений со сложными сопряжениями [13, 14].

Отдельный класс составляют бессеточные пакеты, такие как ParticleWorks, где вместо объемной сетки используются частицы. Их сильная сторона – задачи со свободной поверхностью, брызгообразованием, переливом, перемешиванием, взаимодействием жидкости с движущимися твердыми телами, где построение качественной сетки при больших деформациях домена становится узким местом. Но «без сетки» не означает «без геометрии»: границы все равно задаются поверхностным представлением (обычно треугольной оболочкой), и требования к корректности обтекаемой поверхности остаются – замкнутость, отсутствие самопересечений, правильные нормали, разумная детализация. Ограничения тоже принципиальные: точность определяется шагом частиц (для тонких пограничных слоев нужно резко увеличивать число частиц), устойчивость диктует малые шаги по времени, а для внешней аэродинамики и необходимости

точного описания трения/отрыва метод часто становится вычислительно тяжелым и менее предсказуемым по погрешности, чем классический FVM на качественной сетке [15].

Переход от CAD-сборки к обтекаемой поверхности в вычислительном смысле почти всегда сводится к построению триангулированной оболочки (часто в формате STL/OBJ/PLY) и последующей обработке этой оболочки: ремонт топологии (закрытие щелей, удаление самопересечений, обеспечение манефолдности), сохранение острых кромок/разрывов нормали, а затем ремешинг для получения приемлемых размеров и качества треугольников. Ключевой момент: численные методы (и сеточные, и бессеточные) требуют дискретной границы, поэтому «определение обтекаемой поверхности» фактически включает выбор допусков триангуляции (например, угловой допуск) и правил уплотнения по кривизне, иначе либо теряются важные геометрические детали, либо появляется избыточная дискретизация, которая делает сетку/частицы слишком дорогими [16].

Во многих CFD-пайплайнах широко применяют вращающиеся – алгоритмы, которые строят новую триангулированную оболочку вокруг исходной многотельной геометрии. По сути это формализованная процедура получения расчётоспособной обтекаемой поверхности, где важны не столько идеальная CAD-точность, сколько замкнутость, отсутствие самопересечений, корректная ориентация нормалей и управляемая детализация. На практике выделяют несколько классов вращающихся.

Поверхностные (проекционные, shrinkwrap-типа) стартуют с некоторой опорной сетки и итеративно притягивают её к исходной геометрии (проекцией на ближайшие точки/по лучам/по нормали). Они быстры и удобны, когда исходник относительно чистый, но плохо лечат топологические дефекты и легко наследуют проблемы: щели, самопересечения и разрывы часто превращаются в нестабильные места на дальнейшей генерации домена.

Объёмные (SDF-wrap) сначала переводят CAD/треугольники в объёмное представление (воксели, октодерево или signed distance field), затем извлекают изоповерхность (например, по порогу расстояния) и уже её ремешат. Этот класс

чаще даёт устойчивый замкнутый результат и переносит проблемную сборку в корректную оболочку ценой дискретизационной ошибки, зависящей от разрешения.

Отдельно встречаются гибридные подходы, которые сочетают агрессивное закрытие дефектов с локальным восстановлением поверхности и последующим ремешингом. В прикладных задачах это обычно то, что позволяет быстро получить первую сетку на сложной сборке без длительного использования инструментов графического интерфейса для перестроения фрагментов поверхности.

С инженерной точки зрения различия между видами врапперов проявляются в том, какие геометрические огрехи они считают допустимыми и какими параметрами управляется результат.

В настоящей работе предлагается автоматизированный подход к определению обтекаемой поверхности многотельной геометрии, который позволяет уйти от необходимости ручного построения геометрии области течения и поверхностной сетки, с последующим выполнением сеточного разбиения области течения контрольными объемами с подвешенными узлами и срезанными ячейками.

Исходная обтекаемая поверхность рассматривается как замкнутая треугольная оболочка, заданная вершинами, рёбрами и треугольниками, а также исходной геометрией, относительно которой задаются целевые (недеформированные) параметры: длины рёбер, высоты в треугольниках и целевые двугранные углы между смежными треугольниками. Каждому типу воздействия назначается свой коэффициент жёсткости.

На каждой итерации вычисляется суммарная сила в каждой вершине как сумма нескольких вкладов: по каждому ребру действует пружинная сила растяжения/сжатия по закону Гука, стремящаяся довести длину ребра до целевого значения. По каждому треугольнику добавляется сила сохранения высоты, полученная как градиент потенциальной энергии отклонения высоты от целевой. По каждому внутреннему ребру, общему для пары треугольников, считается двугранный угол и добавляется сила, стремящаяся приблизить

текущий угол к целевому (с учётом выпуклости и порога критического угла). Все рассчитываемые силы нацелены на сохранение качества треугольников. Дополнительно для вершин вводится сила притяжения, которая гарантирует схождение оболочки к исходной геометрии.

После этого, для каждой вершины локально вычисляется предикат-корректор, с учётом которого находится значение минимальной длины ребра и по аналогии с CFL задаётся верхний предел смещения, то есть шаг движения вершин принудительно изменяется по локальным для каждой ячейки параметрам.

Затем выполняется обновление координат вершин с этим ограничением смещения, возвращаются фактические смещения, и цикл останавливается, когда максимальное смещение за итерацию становится меньше заданного допуска или когда исчерпано заранее заданное предельное количество итераций.

Моделирование деформации оболочек является важной задачей в компьютерной графике и математическом моделировании инженерных задач. Предлагаемая модель использует дискретное представление оболочки в виде треугольной сетки и систему физически обоснованных сил для управления деформацией.

Основные понятия разрабатываемой математической модели

Для обозначения основных элементов триангулированной оболочки используются следующий формализм:

- множество вершин: $V = \{v_i\}_{i=1}^N$, где $v_i \in R^3$ – координата i -й вершины.
- исходная геометрия: $V^0 = \{v_i^0\}_{i=1}^N$
- множество рёбер: E . Ребро $e_{ij} \in E$ соединяет вершины v_i и v_j
- множество треугольников: T . Треугольник $t_\alpha \in T$ задаётся тройкой вершин $(v_{\alpha 1}, v_{\alpha 2}, v_{\alpha 3})$

Перечень производных геометрических величин включает следующие наименования:

- длина ребра: $l_{ij} = \|v_j - v_i\|$

- площадь треугольника: $A_\alpha = \frac{1}{2} \|(v_j - v_i) \times (v_k - v_i)\|$
- высота треугольника: $h_{i,\alpha} = \frac{2A}{l_{jk}}$
- нормаль треугольника: $n_\alpha = \frac{(v_j - v_i) \times (v_k - v_i)}{\|(v_j - v_i) \times (v_k - v_i)\|}$

Целевые параметры, определяемые в процессе решения математической модели:

- l_{ij}^0 – длина ребра e_{ij} в недеформированном состоянии
- h_{ij}^0 – высота из вершины v_i в треугольнике t_α в недеформированном состоянии
- θ_{pq}^0 – целевой двугранный угол между смежными треугольниками
- θ_{pq}^m – критический двугранный угол.

Для двух смежных треугольников t_p и t_q с общим ребром e_{ij} и учитывая выпуклость получаемого двугранного угла: $\cos \theta_{pq} = n_p \cdot n_q$

В качестве управляющих коэффициентов математической модели используются «коэффициенты жёсткости» триангулированной сетки:

- k_s – коэффициент жёсткости растяжения
- k_h – коэффициент сохранения высоты
- k_b – коэффициент изгиба
- k_c – коэффициент притяжения к исходной геометрии

В процессе численного решения уравнений разрабатываемой математической модели используются следующие параметры, определяющие устойчивость решения:

- число Куранта-Фридрихса-Леви: $C \in (0,1)$
- минимальная длина ребра: $d_{min}^k = \min_{j \in N(k)} l_{kj} = \min_{j: e_{jk} \in E} \|v_j - v_k\|$,

где $N(k)$ – множество вершин, смежных с вершиной k .

- максимальное смещение: $\delta^k = C \cdot d_{min}^k$

3. Система сил модели

В процессе решения задачи упругой деформации триангулированной оболочки важным является определение системы силы, действующих на каждый узел оболочки.

Сила растяжения или сжатия F_i^s , действующая на вершину v_i со стороны ребра e_{ij} , моделируется в соответствии с законом Гука (1).

$$F_i^s = \sum_{j \in N(i)} k_s (l_{ij} - l_{ij}^0) \frac{v_j - v_i}{l_{ij}}, \quad 1)$$

где $N(i)$ – множество вершин, смежных с вершиной i .

Схема действия сил растяжения/сжатия рёбер, действующих на вершины треугольника показана на рисунке 2.

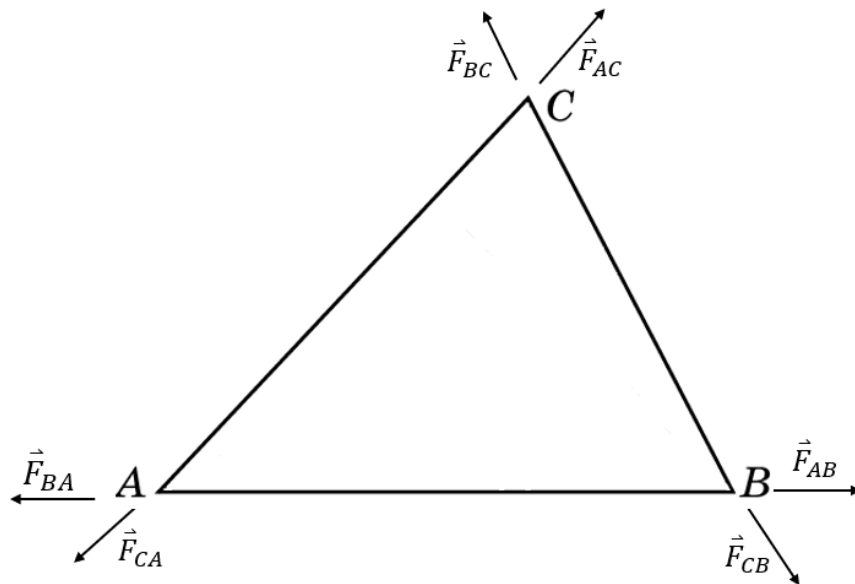


Рисунок 2 – Система сил растяжения/сжатия рёбер

Обеспечение сохранения геометрического качества треугольников, препятствующее их вырождению в процессе деформации, обеспечивается требованием по сохранению высоты треугольников. Потенциальная энергия $U_{i,\alpha}^h$, затрачиваемая на изменение высоты треугольника, рассчитывается в соответствии с формулой (2).

$$U_{i,\alpha}^h = \frac{1}{2} k_h (h_{i,\alpha} - h_{i,\alpha}^0)^2 \quad 2)$$

Сила $F_{i,\alpha}^h$, действующая на вершину v_i рассчитывается по формуле (3).

$$F_{i,\alpha}^h = -\nabla_{v_i} U_{i,\alpha}^h = -k_h (h_{i,\alpha} - h_{i,\alpha}^0) \nabla_{v_i} h_{i,\alpha}$$

3)

Градиент высоты $\nabla_{v_i} h_{i,\alpha}$ определяется по формуле (4).

$$\nabla_{v_i} h_{i,\alpha} = \frac{2}{l_{jk}} \nabla_{v_i} A_\alpha, \quad (4)$$

где градиент площади треугольника:

$$\nabla_{v_i} A_\alpha = \frac{1}{2} (n_\alpha \times (v_k - v_j))$$

Полная сила F_i^h , действующая на вершину v_i , рассчитывается по формуле (5).

$$F_i^h = \sum_{t_\alpha \ni v_i} F_{i,\alpha}^h \quad (5)$$

Схема действия сил сохранения высот, действующих на вершины треугольника показана на рисунке 3.

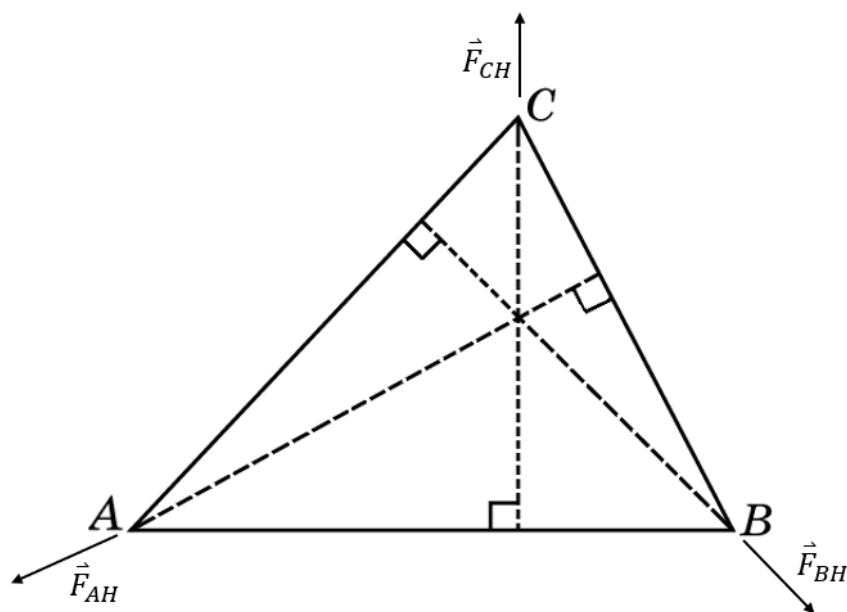


Рисунок 3 – Система сил сохранения высот

Сила, действующая на общие вершины треугольников, вычисляется как:

$$F_{p,q}^b = \delta^k \frac{\theta_{pq}^0}{\theta_{pq}^m - \theta_{pq}^0} \theta_{pq}^m - \theta_{pq}^m - \theta_{pq} \sqrt{\frac{\theta_{pq}^m - \theta_{pq}^0}{\theta_{pq}^m - \theta_{pq}^0} \cdot n_{avg}}, \quad (6)$$

где $n_{avg} = \frac{n_p + n_q}{n_p + n_q}$.

Схема действия сил раскрытия двугранного угла между треугольниками, действующих на вершины показана на рисунке 4.

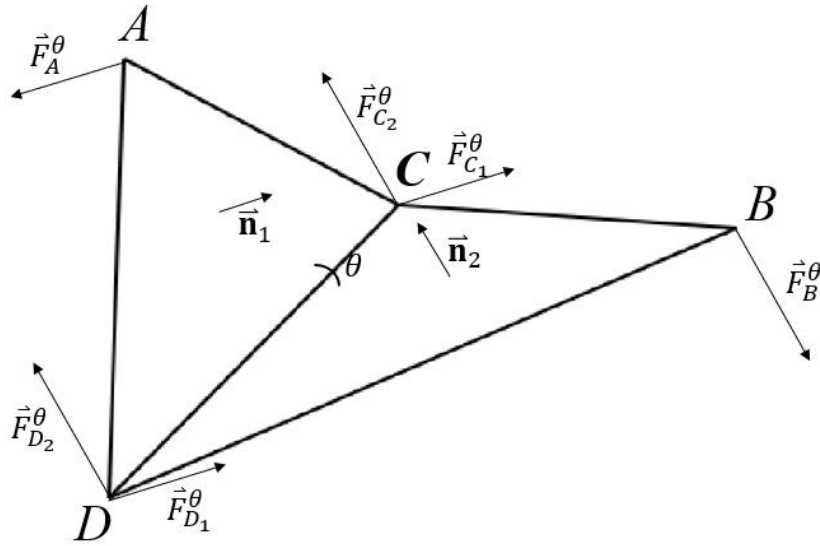


Рисунок 4 – Система сил раскрытия двугранного угла

Для обеспечения соответствия (морфологического подобия) оболочки оборачиваемой многотельной конструкции используется сила притяжения к исходной геометрии, которая рассчитывается по формуле (7).

$$F_i^c = k_c(v_i^0 - v_i) \quad 7)$$

В результате получается, что положение узла триангулированной сетки определяется как результат суперпозиции сил в соответствии с формулой (8).

$$F_i^{total} = F_i^s + F_i^h + F_i^b + F_i^c \quad 8)$$

Алгоритм расчета положения узлов триангулированной сетки таким образом сводится к решению системы уравнений (9).

$$\begin{aligned} \Delta v_i^k &= \alpha \cdot F_i^{total,k} \\ \Delta_{max}^k &= \max_i \|\Delta v_i^k\| \\ \delta^k &= C \cdot \min_{e_{ij} \in E} \|v_j^k - v_i^k\| \\ v_j^{k+1} &= v_i^k + \Delta v_i^k \cdot \min\left(1, \frac{\delta^k}{\Delta_{max}^k}\right) \end{aligned} \quad 9)$$

Листинг псевдокода основного цикла, реализующего решение системы уравнений (9), показан на рисунке 5.

```

Function simulateDeformation(vertices, edges, triangles, params):
    for iteration in range(max_iterations):
        // 1. Вычисление суммарных сил
        total_forces = computeTotalForces(vertices, edges, triangles, params)

        // 2. Вычисление минимального ребра для CFL условия
        min_edge_length = computeMinEdgeLength(vertices, edges)
        msx_displacement = params.CFL * min_edge_length

        // 3. Обновление позиций с ограничением
        actual_displacements = updatePositionWithCFL(vertices, edges, triangles, params)

        // 4. Проверка критерия остановки
        if max(actual_displacements) < tolerance:
            break

```

Рисунок 5 – Листинг псевдокода основного цикла реализации математической модели

Блок-схема основного алгоритма показана на рисунке 6.

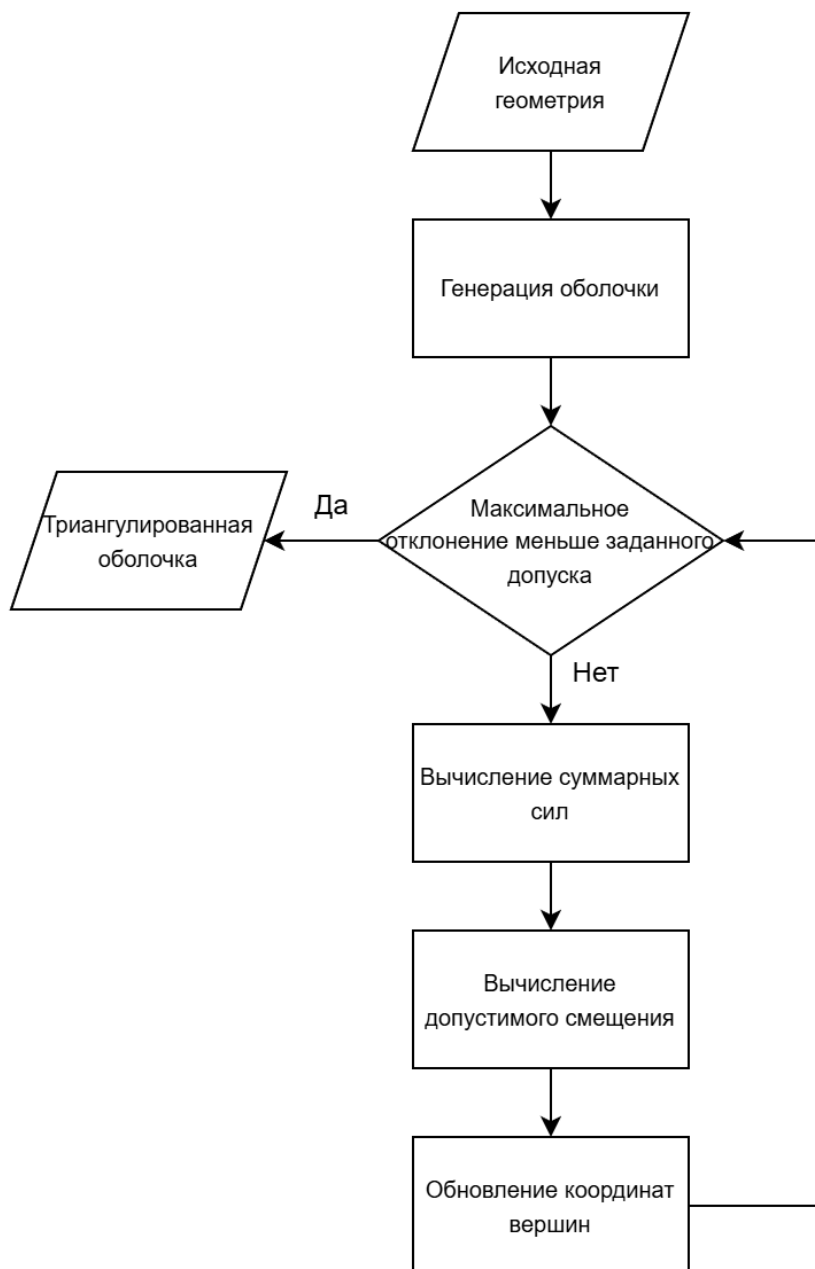


Рисунок 6 – Блок-схема описываемого алгоритма

Апробация разработанной математической модели и алгоритма реализации

Апробация разработанной математической модели и алгоритма реализации было произведено над моделью автомобиля с большим количеством ошибок геометрии – самопересечения, многолистность, граничные рёбра (показаны красным на рисунке 7). Для апробации было проведено два теста: притягивание вершин к исходной геометрии без использования модели деформации (результат стягивания показан на рисунке 8) и с использованием этой модели (результат стягивания показан на рисунке 9): красным цветом на иллюстрациях изображены грани дефектных треугольников, которые перекрываются или являются многолистными. Иллюстрации показывают, что применение предложенной модели деформации позволяет получить достаточно качественную триангулированную оболочку исходной многотельной геометрии.



Рисунок 7 – Выбранная для тестирования геометрия с самопересечениями



Рисунок 8 – Результат стягивания без учёта модели упругой деформации



Рисунок 9 – Результат стягивания с учётом модели упругой деформации

Для того, чтобы детально удостовериться в корректности реализуемого алгоритма рассмотрим примеры исправления триангуляции поверхностей капота (рисунки 10 и 11) и двери модели (рисунки 12 и 13).

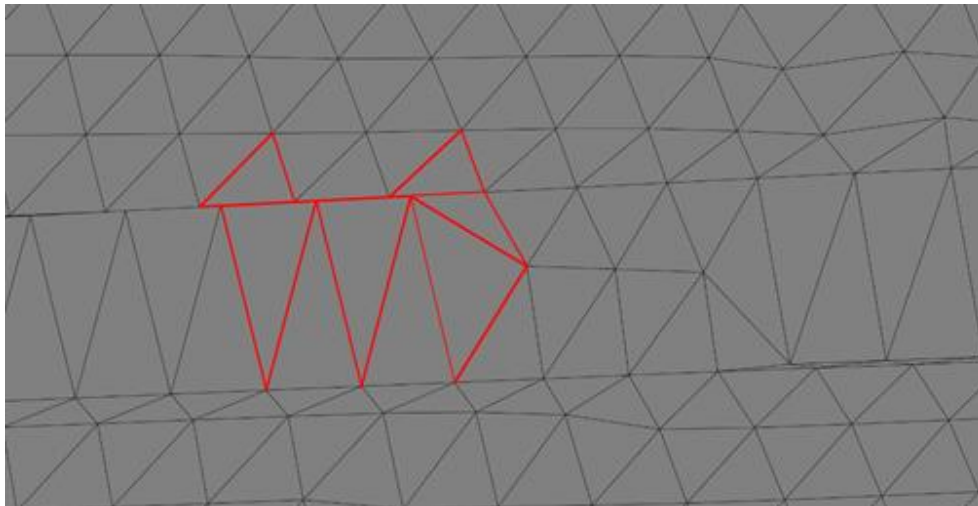


Рисунок 10 – Результат триангуляции фрагмента поверхности капота без учёта модели упругой деформации

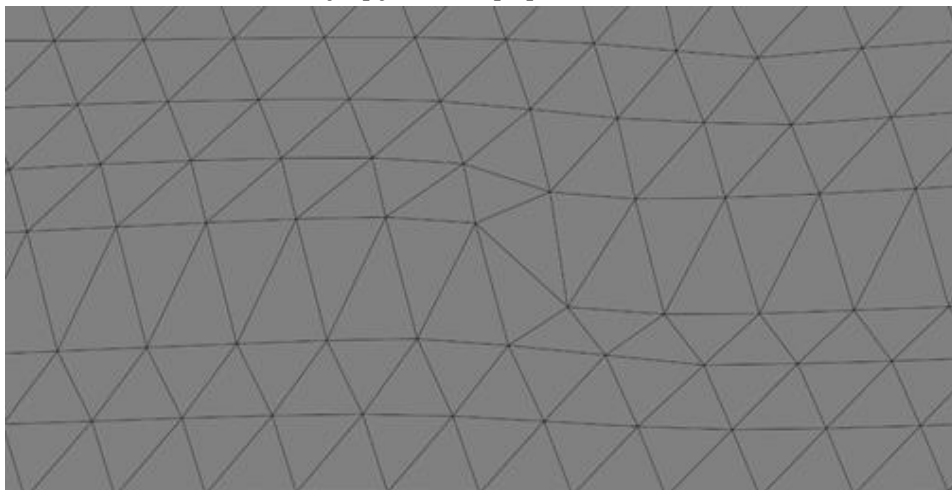


Рисунок 11 – Результат триангуляции фрагмента поверхности капота с учётом модели упругой деформации

На рисунке 10 видно полное вырождение ряда треугольников на капоте модели, соседи которых помечены красным цветом и наблюдается сильное сгущение треугольников в правой части рисунка, которые к этому очень близки. На рисунке же 11 показано, что при использовании алгоритма контроля деформации треугольников можно избежать такой ситуации и вернуть сетке равномерность и консистентность. На рисунке 12 изображено вырождение ряда фасеток на двери исходной при отсутствии алгоритма упругой деформации. На рисунке 13 показан результат применения модели с учётом алгоритма упругой деформации, который противодействует вырождению треугольников в геометрии оболочки.

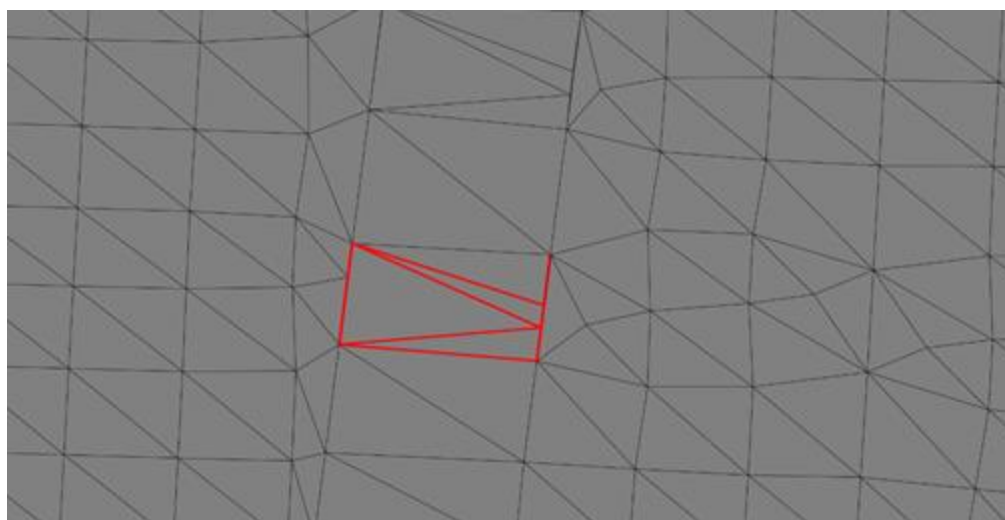


Рисунок 12 – Результат стягивания поверхности двери без учёта модели упругой деформации

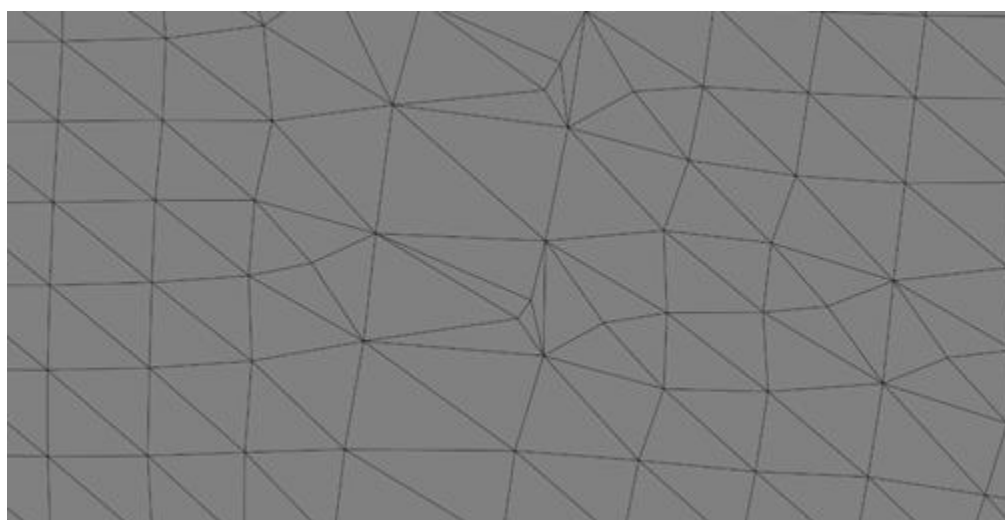


Рисунок 13 – Результат стягивания поверхности двери с учётом модели упругой деформации

Заключение

Предложенный метод аппроксимации, направленный на сглаживание нагруженных узлов сетки и выравнивание поверхностного разбиения эффективен в качестве инструмента препроцессинга для вычислительной гидродинамики. Модель позволяет кратно сократить временные затраты на расчет сложных геометрических моделей. Универсальность подхода обуславливает его высокую востребованность не только в аэрокосмических технологиях и инженерном анализе (CAE), но и в смежных дисциплинах, таких как компьютерная графика, где задача построения качественной полигональной сетки является первостепенной. В ракетно-космической отрасли применение предложенной модели триангуляции позволит повысить эффективность процесса определения аэродинамических характеристик в ходе численного моделирования за счет ускорения процедуры выделения обтекаемой геометрии и построения сеточной модели из конструкторской многотельной сборки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Нуштаев Д. В., Волков-Богородский Д. Б., Ардатов К. В. К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ УПАКОВАННОЙ КОНФИГУРАЦИИ ОБОЛОЧКИ БАЛЛОНА СИСТЕМЫ ДОСТАВКИ КОРОНАРНЫХ СТЕНТОВ // Российский журнал биомеханики. 2020. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-postroeniya-upakovannoy-konfiguratsii-obolochki-ballona-sistemy-dostavki-koronarnyh-stentov> (дата обращения: 15.12.2025).
2. Тисленко, И. В. Теоретический расчет плотнооблегающих оболочек из текстильных материалов (Часть 1) / И. В. Тисленко, В. Е. Кузьмичев // Швейная промышленность. – 2014. – № 5. – С. 28-31. – EDN TIRFBJ.

3. Волобой А. Г., Ершов С. В., Валиев И. В. ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ОСВЕЩЕНИЯ ИНТЕРЬЕРНЫХ СЦЕН ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ // Программные продукты и системы. 2020. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-rascheta-osvescheniya-interiernih-stsen-dlya-stohasticheskoy-trassirovki-luchey> (дата обращения: 15.12.2025).

4. Холодилов, А. А. Анализ технологии перевода трехмерной модели из CAD-формата в управляющий код при 3D-печати / А. А. Холодилов, Е. В. Фалеева, М. В. Холодилова // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2020. – Т. 2. – С. 296-301. – EDN KLUEIV.

5. Грамузов Е.М., Любимов В.И., Смирнов К.В., Соснов А.В., Февральских А.В. Автоматизированная оптимизация компоновки крыла и горизонтального оперения экраноплана по результатам численного моделирования аэродинамики // Морские интеллектуальные технологии. - 2019. - № 1 (43) - Т.3. - С. 3847

6. Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Кривель С.М. Аэродинамическое проектирование экраноплана с высокими несущими свойствами на основе численного моделирования с применением ansys. В сборнике: Авиамашиностроение и транспорт Сибири. сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции. Иркутский государственный технический университет. 2014. С. 51-55.

7. Хасенова, С. М. Разработка оптимизационной модели в программе ANSYS FLUENT для теплообменника натриевой петли / С. М. Хасенова, А. С. Акаев, Е. А. Мартыненко // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – № 4. – С. 88-91.

8. Нигматзянов, А. Р. Численное моделирование кожухотрубчатого теплообменника в программном комплексе ANSYS CFX / А. Р. Нигматзянов, А. А. Салин // Вестник Технологического университета. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 96-100.

9. Иванов, Н. В. Применимость программного комплекса ANSYS CFX для решения задач аэродинамической устойчивости и стабилизации летательных аппаратов / Н. В. Иванов // Молодежь. Техника. Космос : труды X Общероссийской молодежной научно-технической конференции, Санкт-

Петербург, 18–20 апреля 2018 года. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2018. – С. 86-91.

10. Турганбаева, А. Б. Расчет обтекания горы Сулайман в пакете openfoam / А. Б. Турганбаева, А. Ы. Курбаналиев // Вестник Ошского государственного университета. Математика. Физика. Техника. – 2022. – № 1. – С. 92-101.

11. Khadse N. A., Zaveri S. R. Modal Analysis of Aircraft Wing using Ansys Workbench Software Package // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2015. Vol. 4, no. 7. P. 225–230.

12. Махнев, М. С. Верификация результатов определения вращательных производных по крену ЛА в широком диапазоне углов атаки / М. С. Махнев, А. В. Февральских // Труды МАИ. – 2019. – № 109. – С. 23.

13. Рагулин, И. А. Численное моделирование обтекания модельного гребного винта / И. А. Рагулин // Труды МАИ. – 2025. – № 143.

14. Глазков, В. С. Верификация программного пакета ANSYS Fluent при исследовании аэродинамических характеристик ветроколеса Савониуса / В. С. Глазков, Ю. М. Игнаткин // Труды МАИ. – 2018. – № 100. – С. 11.

15. Pavlovic D., Todorovic M., Jovanovic M., Milosavljevic P. Comparison of Commercial CFD Software Packages: proceedings of the 3rd International Conference on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education (ICAICTSEE-2013), Sofia, Bulgaria, December 6–7, 2013 / Univ. of Niš, Faculty of Mechanical Engineering. – Sofia: UNWE, 2013. – P. 361–371.

16. Якунин В. И. Методологические вопросы геометрического проектирования и конструирования сложных поверхностей / Учебное пособие, МАИ, 1990

References

1. Nushtaev D.V., Volkov-Bogorodskii D.B., Ardatov K.V. K voprosu postroeniia upakovannoi konfiguratsii obolochki ballona sistemy dostavki koronarnykh stentov. Rossiiskii zhurnal biomekhaniki. 2020;(2). Available at: [[https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-postroeniya-upakovannoy-konfiguratsii-obolochki-ballona-sistemy-dostavki-koronarnykh-](https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-postroeniya-upakovannoy-konfiguratsii-obolochki-ballona-sistemy-dostavki-koronarnykh)

stentov][<https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-postroeniya-upakovannoy-konfiguratsii-obolochki-ballona-sistemy-dostavki-koronarnykh-stentov>] (accessed 15.12.2025). (In Russ.).

2. Tislenko I.V., Kuz'michev V.E. Teoreticheskii raschet plotnooblegaiushchikh obolochek iz tekstil'nykh materialov (Chast' 1). Shveinaia promyshlennost'. 2014;(5):28–31. EDN TIRFBJ. (In Russ.).

3. Voloboi A.G., Ershov S.V., Valiev I.V. Optimizatsiia rascheta osveshcheniia inter'ernykh stsen dlia stokhasticheskoi trassirovki luchei. Programmnye produkty i sistemy. 2020;(4). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-rascheta-osvescheniya-interiernykh-stsen-dlya-stokhasticheskoy-trassirovki-luchey> (accessed 15.12.2025). (In Russ.).

4. Kholodilov A.A., Faleeva E.V., Kholodilova M.V. Analiz tekhnologii perevoda trekhmernoi modeli iz CAD-formata v upravliaiushchii kod pri 3D-pechati. Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke. 2020;2:296–301. EDN KLUEIV. (In Russ.).

5. Gramuzov E.M., Liubimov V.I., Smirnov K.V., Sosnov A.V., Fevral'skikh A.V. Avtomatizirovannaia optimizatsiia komponovki kryla i gorizontal'nogo opereniia ekranoplana po rezul'tatam chislennogo modelirovaniia aerodinamiki. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019;1(43);3:38–47. (In Russ.).

6. Vshivkov Iu.F., Galushko E.A., Krivel' S.M. Aerodinamicheskoe proektirovanie ekranoplana s vysokimi nesushchimi svoistvami na osnove chislennogo modelirovaniia s primeneniem ANSYS. In: Aviamashinostroenie i transport Sibiri. Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference. Irkutskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet; 2014. p. 51–55. (In Russ.).

7. Khasenova S.M., Akaev A.S., Martynenko E.A. Razrabotka optimizatsionnoi modeli v programme ANSYS FLUENT dlia teploobmennika natrievoi petli. Vestnik NIaTs RK. 2020;(4):88–91. (In Russ.).

8. Nigmatzyanov A.R., Salin A.A. Chislennoe modelirovanie kozhukhotrubchatogo teploobmennika v programmnom komplekse ANSYS CFX. Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. 2024;27(3):96–100. (In Russ.).

9. Ivanov N.V. Primenimost' programmnoogo kompleksa ANSYS CFX dlia resheniia zadach aerodinamicheskoi ustoichivosti i stabilizatsii letatel'nykh apparatov. In: Molodezh'. Tekhnika. Kosmos: Proceedings of the X All-Russian Youth Scientific and Technical Conference, Saint Petersburg, 18–20 April 2018. Saint Petersburg: Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet "Voenmekh"; 2018. p. 86–91. (In Russ.).

10. Turganbaeva A.B., Kurbanaliev A.Y. Raschet obtekaniia gory Sulaiman v pakete OpenFOAM. Vestnik Oshskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Fizika. Tekhnika. 2022;(1):92–101. (In Russ.).

11. Khadse N.A., Zaveri S.R. Modal Analysis of Aircraft Wing using Ansys Workbench Software Package. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2015;4(7):225–230.

12. Makhnev M.S., Fevralskikh A.V. Verifikatsiia rezul'tatov opredeleniia vrashchatel'nykh proizvodnykh po krenu LA v shirokom diapazone uglov ataki. Trudy MAI. 2019;(109):23. (In Russ.).

13. Ragulin I.A. Chislennoe modelirovanie obtekaniia model'nogo grebnogo vinta. Trudy MAI. 2025;(143). (In Russ.).

14. Glazkov V.S., Ignatkin Iu.M. Verifikatsiia programmnoogo paketa ANSYS Fluent pri issledovanii aerodinamicheskikh kharakteristik vetrokolesa Savoniusa. Trudy MAI. 2018;(100):11. (In Russ.).

15. Pavlovic D., Todorovic M., Jovanovic M., Milosavljevic P. Comparison of Commercial CFD Software Packages. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education (ICAICTSEE–2013), Sofia, Bulgaria, December 6–7, 2013. Sofia: UNWE; 2013. p. 361–371.

16. Yakunin V.I. Metodologicheskie voprosy geometricheskogo proektirovaniia i konstruirovaniia slozhnykh poverkhnostei. Uchebnoe posobie. MAI; 1990. (In Russ.).

Информация об авторах

Артем Андреевич Захаров, начальник группы ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия.

Андрей Андреевич Панкин, программист ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия.

Надежда Максимовна Субботина, программист ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия.

Андрей Владимирович Февральских, доктор технических наук, начальник группы ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия. e-mail: a.fevralskih@gmail.com

Information about the authors

Artem A. Zakharov, Group Head, TESIS LLC, Moscow, Russia

Andrei A. Pankin, Software Engineer, TESIS LLC, Moscow, Russia

Nadezhda M. Subbotina, Software Engineer, TESIS LLC, Moscow, Russia

Andrei V. Fevralskikh, Doctor of Technical Sciences, Group Head, TESIS LLC, Moscow, Russia; e-mail: a.fevralskih@gmail.com

Получено 23 декабря 2025 ● Принято к публикации 20 марта 2026 ● Опубликовано 30 апреля 2026
Received 23 December 2025 ● Accepted 20 March 2026 ● Published 30 April 2026
