

УДК 519.6

ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЕТОК ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АЭРО- И ГИДРОДИНАМИКИ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ "ЛОГОС"

Е. О. Евстифеева, О. Н. Борисенко, Д. М. Панкратов, Т. В. Цалко, А. И. Шавхитдинова
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области)

Описаны возможности автоматического построения поверхностных треугольных сеток в пакете программ "Логос". Показано, что построение поверхностных сеток проводится с предварительным заданием минимального количества параметров и направлено на подготовку расчетных сеток высокого качества для решения задач аэро- и гидродинамики. На примерах продемонстрировано, что технология построения сеток, используемая в автоматическом генераторе сеток пакета программ "Логос", достаточно универсальна и позволяет расширить область его применения.

Ключевые слова: пакет программ "Логос", поверхностная сетка, автоматический генератор сетки, задачи аэро- и гидродинамики.

Введение

Стремительное развитие областей промышленности, использующих и внедряющих в свои технологии трехмерное (3D) моделирование, приводит к необходимости постоянного совершенствования программных модулей для генерации расчетных сеток.

Ввиду большого различия средств для подготовки начальной геометрической модели, а именно САД-проектирование, 3D-сканирование, генерация замкнутой оболочки и др., расширяется набор типов исходных данных, по которым необходимо построить дискретную расчетную модель.

В современных программных модулях для генерации сеток с увеличением разнообразия исходных данных наблюдается стремление к поддержке большого числа доступных пользователю форматов, а также обработке нетривиальных геометрических особенностей загружаемых моделей и построению сеток высокого качества за короткое время. Большинство инженерных пакетов и программных кодов для генерации сеток являются коммерческими [1–4] и не доступны для общего использования. Открытые коды [5–7] содержат неполный набор инструментов для генерации качественных сеток с нужной степенью адаптации размеров ячеек и исправления

ошибок для промышленно-ориентированных задач.

Подготовка к моделированию физических процессов при решении задач аэро- и гидродинамики [8] включает в себя построение расчетной дискретной модели, состоящее из последовательной генерации поверхностной сетки и строящейся на ее основе объемной сетки. Пакет программ (ПП) "Логос" [9] предоставляет возможности использования автоматических генераторов поверхностных треугольных сеток [10, 11], а также объемных — построенных методом отсечения [12], тетраэдральных [13], многогранных на основе тетраэдров [14].

От качества поверхностной сетки напрямую зависят как возможность построения, так и качество объемной расчетной сетки. Также немаловажен выбор размеров ячеек на поверхности, поскольку он определяет точность аппроксимации исходной геометрической модели и скорость генерации сетки. Данные факты обуславливают актуальность развития автоматического генератора поверхностных сеток, выполняющего построение сетки без ошибок с минимальной предварительной настройкой параметров размеров ячеек.

В настоящей работе показаны возможности автоматического построения поверхностных се-

ток, необходимые для получения расчетных моделей высокого качества. Все предложенные возможности разработаны и внедрены в ПП "Логос" с учетом полученных от инженеров запросов, возникших при решении промышленно-ориентированных задач.

Построение сетки в соответствии с инженерными требованиями

Начальными данными для построения поверхностной сетки, как правило, являются геометрические модели, описанные одним из двух способов. Первый способ — с помощью набора параметрических граней, ограниченных параметрическими кривыми (рис. 1, а). Второй способ описания модели — с помощью поверхностной треугольной сетки (состоящей из треугольных ячеек, или *треугольников*). К примеру, такие сетки могут быть получены с помощью тесселяции САД-модели (рис. 1, б).

Генерация поверхностных сеток в ПП "Логос" производится по каждому из указанных представлений. Для загрузки модели в параметрическом представлении поддерживаются форматы *igs*, *step*, для сеточного представления — формат *stl*.

Перед непосредственным запуском построения сетки необходимо провести подготовку модели и настройку параметров. Для разных частей геометрической модели необходимо задание различных граничных условий, определяемых постановкой задачи, поэтому инженер начинает подготовку модели с разбиения ее на *границы* (рис. 2). Ввиду различных масштабов и степени искривленности граничных поверхностей построение сетки для них требует разной

детализации, вследствие чего для каждой из границ целесообразно задавать свои размеры ячеек. Параметры размеров (*целевой размер ячейки* и *минимальный размер ячейки*) могут быть заданы глобально для всей модели, а также отдельно для любой из выделенных границ. Возможность настройки параметров с помощью пользовательского интерфейса существенно повышает эффективность процесса: после визуальной оценки полученной сетки можно изменить параметры и запустить построение заново без редактирования сетки вручную.

Поскольку промышленные модели имеют нетривиальное описание поверхности, важно иметь возможность сохранения их характерных особенностей. Наиболее интересующие инженера особенности могут быть выделены им с помощью характерных кривых с использованием интерактивных средств. При этом могут быть заданы предпочтительные для данных кривых размеры, которые будут учтены при построении сетки. Для автоматического определения характерных кривых непосредственно в генераторе поверхностных сеток предложен и внедрен алгоритм [16], который выделяет ребра по нескольким критериям, таким как острый угол между нормальными смежных ячеек, ребра между выделенными границами и др. Этот алгоритм также выполняет *дозамыкание* характерных кривых и *отсеивание* лишних характерных ребер. На рис. 3 светло-зеленым цветом обозначены характерные кривые, выделенные автоматически.

После задания необходимых параметров выполняется запуск генерации поверхностной сетки. Построение поверхностной сетки в ПП "Логос" для обоих представлений исходной модели осуществляется подобным образом. Для модели в сеточном представ-

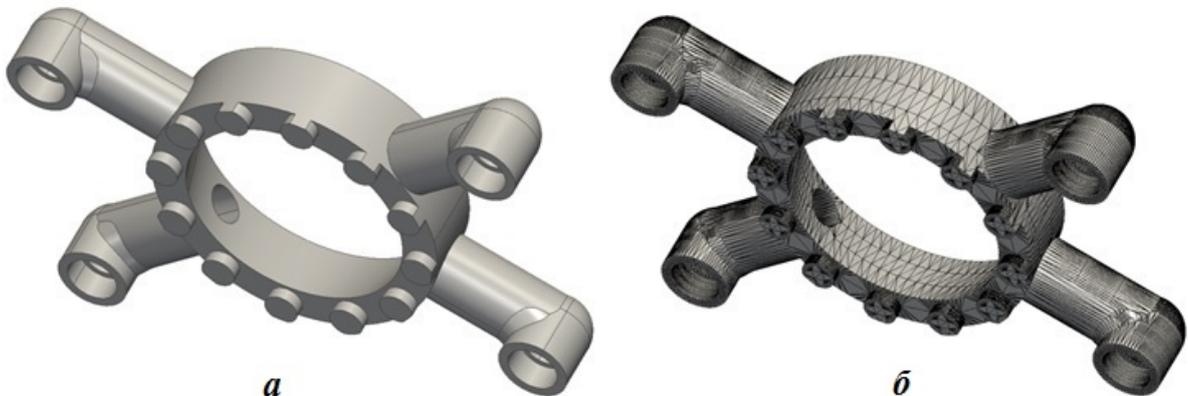


Рис. 1. Модель [15]: а — в параметрическом представлении; б — описанная набором треугольников

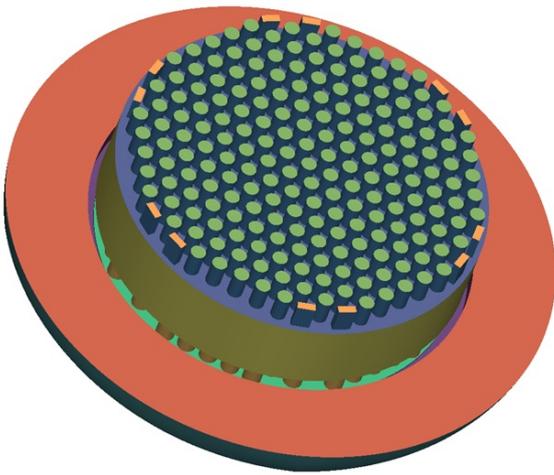


Рис. 2. Разделение части геометрической модели [15] на границы

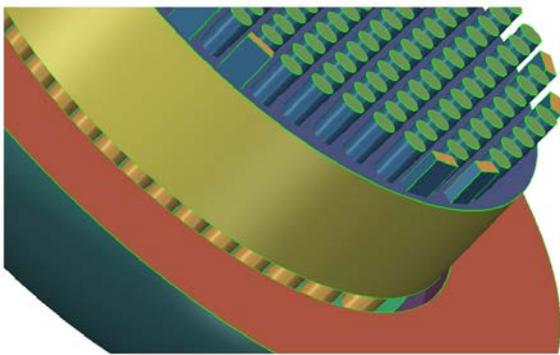


Рис. 3. Характерные кривые геометрической модели [15]

лении предварительно проводится разделение границ на фрагменты, которые однозначно отображаются на плоскость. Далее независимо от представления выполняются два этапа:

- 1) дискретизируются контуры криволинейных граней (для моделей в параметрическом представлении) или кривые, разделяющие фрагменты границ (для моделей, описанных сеткой);
- 2) методом подвижного фронта с использованием библиотеки CM2MeshTools [17] на плоскости строится сетка для каждой из граней (или фрагмента границы), начиная от дискретизированных кривых.

После этого сетки для всех граней (фрагментов границ) с помощью заданной функции отображения переносятся в исходное трехмерное пространство и объединяются в единую сетку.

Для моделей с высокой детализацией, описанных с помощью поверхностной треугольной сетки, предлагается производить перестроение сетки в трехмерном пространстве. Разработанный в ПП "Логос" в части генератора сеток подход [18], основанный на алгоритме упрощения сетки до заданных размеров элементов, значительно ускоряет подготовку результирующей сетки в целом. Предложенные в подходе критерии позволяют учитывать кривизну исходной поверхности и получать ячейки высокого качества.

Построенная поверхностная сетка должна удовлетворять размерам, установленным инженером через пользовательский интерфейс. При построении поверхностных сеток в ПП "Логос" учитываются заданные размеры ячеек на каждой из границ, а также кривизна исходной поверхности [19] с учетом параметра *количество точек на окружности*, характеризующего допустимую аппроксимацию окружности правильным многоугольником (рис. 4). Такой учет позволяет достаточно точно описать исходную поверхность, включая наиболее искривленные участки.

Определенные области геометрической модели, представляющие наибольший интерес для инженера, могут быть выделены с помощью объемных тел типа конуса, сферы, цилиндра и др. или замкнутой поверхностной сетки для более детального задания размеров ячеек. Разработанные алгоритмы построения учитывают заданные значения размеров в комбинации с размерами, заданными на границах. На рис. 5, а представлен фрагмент модели, часть которого выделена сферой для построения сетки с более мелким размером ячеек, чем заданный для границ. На рис. 5, б показана построенная поверхностная сетка для этого фрагмента, где заметны ячейки малого размера в выделенной сферой области.

Выполнение условий построения объемной сетки

Помимо соответствия размерам, существует ряд требований к поверхностной сетке для построения на ее основе объемной сетки: поверхностная сетка не должна иметь пересечений и наложений, открытых ребер, а также вырожденных треугольников. Некоторые виды ошибок в поверхностной сетке могут сохраняться по-

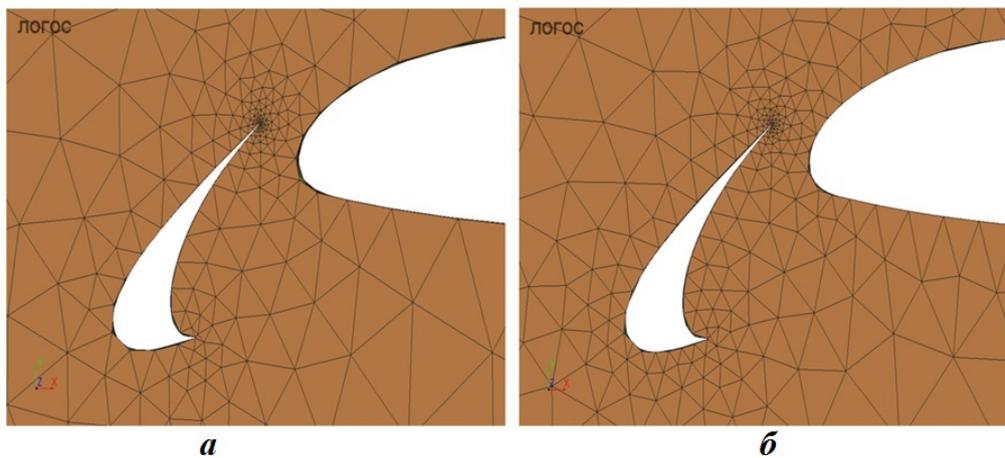


Рис. 4. Фрагмент сетки, построенной со значением параметра *количество точек на окружности*, равным 18 (а) и 36 (б)

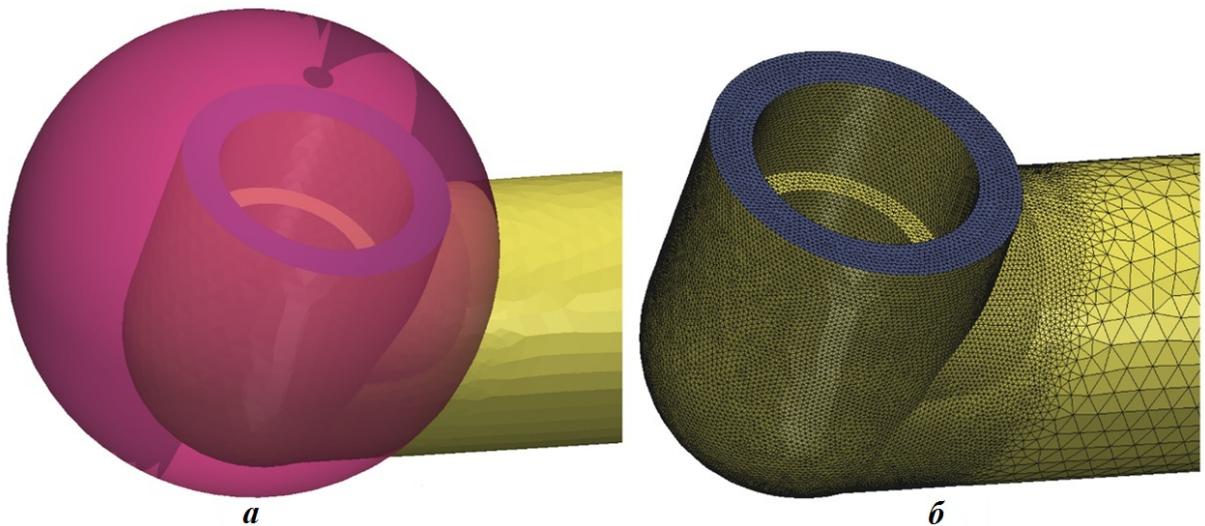


Рис. 5. Фрагмент модели [15] с выделением области сферой (а) и построенная для этого фрагмента сетка (б)

сле перестроения из-за наличия ошибок в исходной геометрической модели (зазоры, пересечения, перекрытия и др.), появляющихся в ходе конвертации между разными форматами либо в результате некорректного проектирования или выгрузки данных из САД-пакета в стороннем программном обеспечении. Также ошибки в построенной сетке, например пересечения или наложения, могут быть следствием задания некорректных размеров, при которых невозможно аппроксимировать модель с высокой точностью; в таком случае нужно руководствоваться визуальной оценкой результата и перестроить сетку, задав другие размеры ячеек. Нежелательными являются и треугольные ячейки низкого качества,

так как они могут стать причиной низкого качества объемных ячеек.

Исходя из описанных выше ограничений со стороны генератора объемной модели целесообразно после построения поверхностной сетки (со своим подходом для каждого из исходных представлений геометрической модели) проводить ее оптимизацию. При оптимизации сетки выполняются следующие операции:

- перестроение областей из треугольников, не удовлетворяющих определенным критериям, таким как качество (рис. 6) и размер элементов, кривизна поверхности и др. [20];
- исправление ошибок: открытые ребра, пересечения, наложения, вырожденные элементы и др.

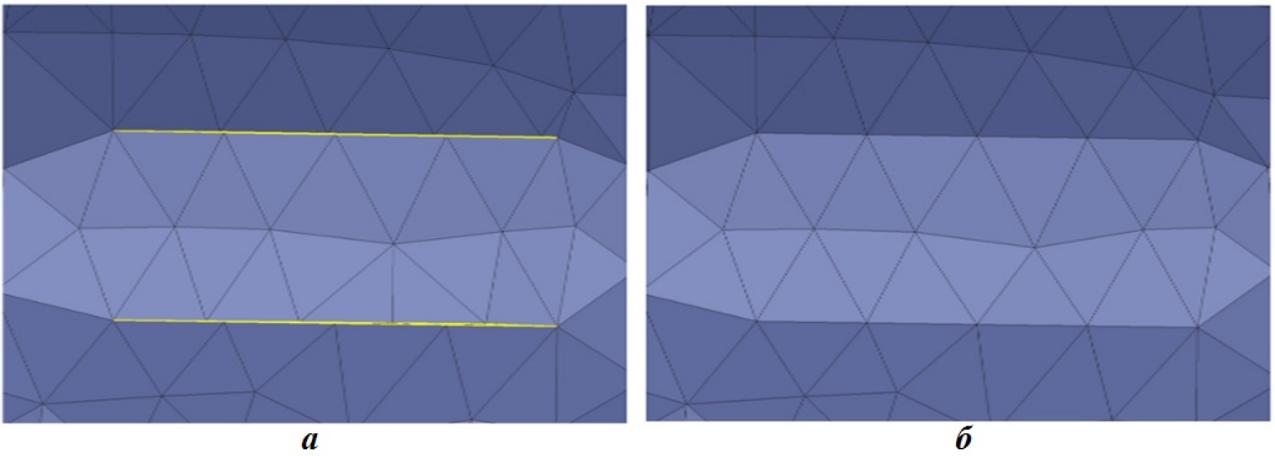


Рис. 6. Фрагмент модели с треугольниками низкого качества до (а) и после локального перестроения содержащей их области (б)

Для исправления пересечений и наложений предложен и внедрен алгоритм [21]. Возможностью исправления пересечений можно воспользоваться перед построением сетки, если исходная геометрическая модель имеет сеточное представление, в ходе построения сетки с помощью установки для этого соответствующей настройки, а также после построения сетки в интерактивном режиме. На рис. 7, а показан фрагмент сетки с пересекающимися треугольниками, выделенными красным цветом в ходе диагностики, на рис. 7, б — тот же фрагмент после исправления пересечений. Хотя на этих рисунках сложно визуально обнаружить изменение ввиду минимально допустимого редактирования сетки, отсутствие красного цвета свидетельствует о том, что пересечений в треугольниках не обнаружено.

Качество объемных ячеек зависит не только от качества элементов на поверхности. Объемные ячейки низкого качества могут порождаться из-за большой разницы в размерах ячеек на близких поверхностях (расстояние между которыми мало относительно минимального размера). Поэтому в процессе генерации расчетной модели предлагается использовать учет близости поверхностей при подготовке поверхностной сетки. Предложенный в рамках проведенных работ инструмент [22] выполняет поиск близких поверхностей в сетке и адаптивное измельчение ячеек в найденных областях, чтобы гарантировать заполнение объема между такими поверхностями ячейками высокого качества. На рис. 8 показан фрагмент в разрезе объемной многогранной

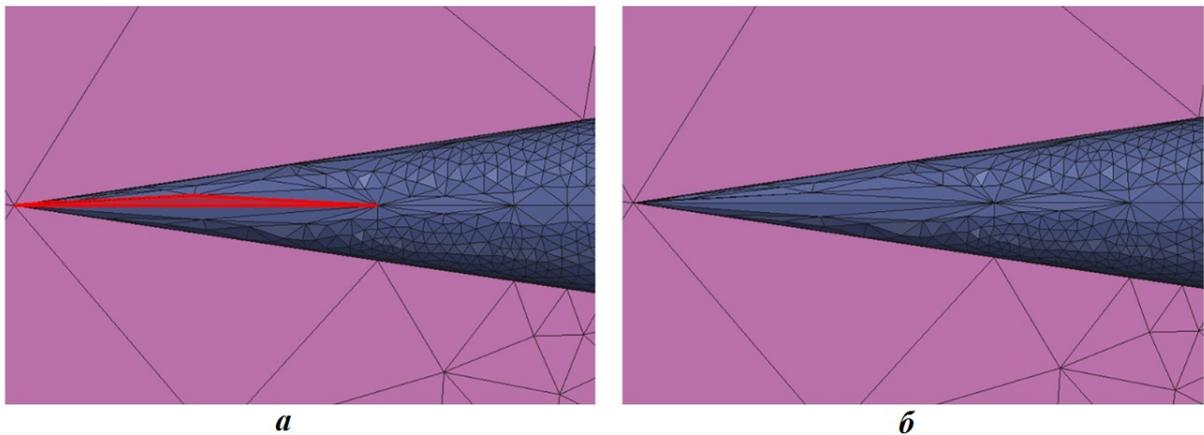


Рис. 7. Фрагмент модели: а — с пересечением; б — после исправления пересечений

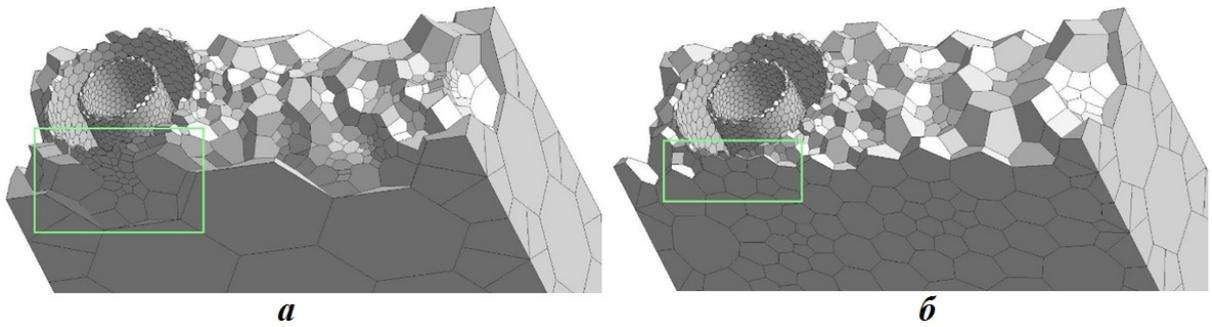


Рис. 8. Фрагмент объемной сетки, построенной без учета (а) и с учетом (б) близости поверхностей

сетки, построенной без учета и с учетом близости поверхностей. В области, отмеченной зеленой рамкой, на рис. 8, а из-за большого различия в площадях смежных граней обнаруживаются ячейки низкого качества; на рис. 8, б ввиду плавности перехода в размерах ячеек низкого качества не обнаружено.

Результаты

Для демонстрации результатов построения сеток по различным исходным представлениям были выбраны две модели (см. рис. 1) и заданы одинаковые настройки параметров. Для построения сеток использовался компьютер с характеристиками Intel Core i7-9700 CPU 3,00 GHz 64GB RAM.

На рис. 9, а показан пример поверхностной сетки, построенной по модели в параметрическом представлении, состоящей из 98 граней, 257 ребер и 174 вершин. Построенная сетка состоит

из 640 тыс. треугольников и 320 тыс. узлов. Среднее качество ячеек сетки 0,98, при этом диагностика поверхностной сетки не выявила ошибок. Время построения составило около 3 мин.

На рис. 9, б показан пример поверхностной сетки, построенной по модели в сеточном представлении, состоящей из 105 тыс. треугольников и 52 тыс. узлов. Построенная сетка состоит из 620 тыс. треугольников и 310 тыс. узлов. Среднее качество ячеек сетки 0,99, ошибок в сетке не обнаружено. Время построения составило около 3,1 мин.

По приведенным результатам можно сделать вывод, что качественная и количественная картины распределения ячеек, а также время построения сеток имеют хорошее согласие. Разница в количестве треугольников обоснована различием исходных представлений и точностью извлечения тесселяции, с которой было получено сеточное представление по параметрическому.

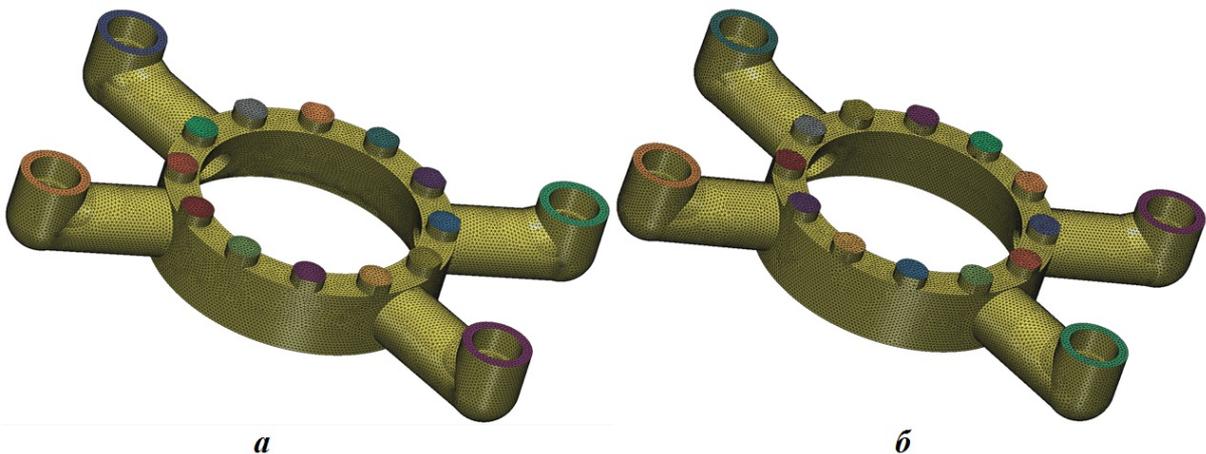


Рис. 9. Поверхностная сетка для модели [14], построенная: а — по параметрическому представлению; б — по сеточному представлению

Заключение

В статье приведен обзор реализованных возможностей генератора поверхностных треугольных сеток, используемых для подготовки качественных расчетных моделей при решении задач аэро- и гидродинамики в ПП "Логос". Предложенные инструменты позволяют проводить построение сеток для конструкций сложной конфигурации в разных областях промышленности.

Предложенные средства используются в автоматическом режиме и позволяют проводить построение сетки с необходимыми размерами ячеек, выполнять исправление ошибок сетки и учитывать особенности конструкций (например, выполнять адаптивное измельчение сетки по критерию близости поверхностей). Это сокращает трудозатраты инженера и существенно ускоряет подготовку задачи к расчету.

Применение сквозного построения поверхностной, а затем расчетной сеток позволяет использовать одну исходную геометрическую модель для подготовки различных вариантов дискретных моделей с минимальным участием пользователя в настройке параметров.

Список литературы

1. ANSYS. <http://www.ansys.com>.
2. STAR-CCM+ Siemens PLM Software. <https://mdx.plm.automation.siemence.com/star-ccm-plus>.
3. Comsol Multiphysics. <https://www.comsol.ru>.
4. HyperMesh. <https://www.altairhyperworks.com/hypermesh>.
5. Advanced Numerical Instruments 3D. <http://sourceforge.net/projects/ani3d>.
6. Netgen Mesh Generator. <http://sourceforge.net/projects/netgen-mesher>.
7. CGAL. <http://www.cgal.org/download.html>.
8. Козелков А. С., Лашкин С. В., Куркин А. А., Корнев А. В., Вялых А. М. Параллельная реализация метода SIMPLE на основе многосеточного метода // Сибирский журнал вычислительной математики. 2020. Т. 23, № 1. С. 1—22.
Kozelkov A. S., Lashkin S. V., Kurkin A. A., Kornev A. V., Vyalykh A. M. Parallelnaya realizatsiya metoda SIMPLE na osnove

mnogosetochного method // Sibirskiy zhurnal vychislitelnoy matematiki. 2020. Т. 23, № 1. С. 1—22.

9. ЛОГОС: Пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования. <http://www.logos.vniief.ru>. LOGOS: Paket program inzhenerenogo analiza i superkompyuternogo modelirovaniya. <http://www.logos.vniief.ru>.
10. Лукичев А. Н., Цалко Т. В., Панкратов Д. М., Логинов Д. В., Белова А. И., Москина Е. О. Особенности построения триангуляционных сеток на поверхностях в аналитическом и фасеточном представлении // 15-я науч.-тех. конф. "Молодежь в науке": сб. докл. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2017. С. 73—78.
Lukichyev A. N., Tsalko T. V., Pankratov D. M., Loginov D. V., Belova A. I., Moskina E. O. Osobennosti postroenoya triangulyatsionnykh setok na poverkhnostyakh v analiticheskom i fasetochnom predstavlenii // 15-ya nauch.-tekh. konf. "Molodyezh v nauke": sb. dokl. Sarov: RFYaTs-VNIEF, 2017. S. 73—78.
11. Борисенко О. Н., Лукичев А. Н., Евстифеева Е. О., Панкратов Д. М., Цалко Т. В., Гиниятуллина А. Г. Алгоритмы обработки особенностей геометрических моделей при построении поверхностных треугольных сеток в препроцессоре пакета программ "ЛОГОС" // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2020. Вып. 3. С. 40—52.
Borisenko O. N., Lukichyev A. N., Evstifeeva E. O., Pankratov D. M., Tsalko T. V., Giniyatullina A. G. Algoritmy obrabotki osobennostey geometricheskikh modeley pri postroenii poverkhnostnykh treugolnykh setok v preprotssessore paketa program "LOGOS" // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. 2020. Vyp. 3. S. 40—52.
12. Смолкина Д. Н., Борисенко О. Н., Черенкова М. В., Гиниятуллина А. Г., Кузьменко М. В., Чухманов Н. В., Потехина Е. В., Попова Н. В., Турусов М. Р. Автоматический генератор неструктурированных многогранных сеток в препроцессоре пакета программ Логос // Вопросы атомной науки

- и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 2. С. 25–39.
- Smolkina D. N., Borisenko O. N., Cherenkova M. V., Giniyatullina A. G., Kuzmenko M. V., Chukhmanov N. V., Potekhina E. V., Popova N. V., Turusov M. R.* Avtomaticheskii generator nestrukturirovannykh mnogogrannykh setok v preprocessore paketa program Logos // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. 2018. Vyp. 2. S. 25–39.
13. *Попова Н. В., Борисенко О. Н., Корнеева И. И., Чухманов Н. В., Потехина Е. В., Лазарев В. В., Гиниятуллина А. Г.* Автоматический генератор неструктурированных тетраэдральных сеток с призматическими слоями в препроцессоре пакета программ Логос // Там же. 2020. Вып. 1. С. 43–57.
Popova N. V., Borisenko O. N., Korneeva I. I., Chukhmanov N. V., Potekhina E. V., Lazarev V. V., Giniyatullina A. G. Avtomaticheskii generator nestrukturirovannykh tetraedralnykh setok s prizmaticheskimi sloyami v preprotsessore paketa program Logos // Tam zhe. 2020. Vyp. 1. S. 43–57.
 14. *Попова Н. В.* Автоматический генератор неструктурированных многогранных сеток на основе тетраэдральных сеток с призматическими слоями // Там же. 2021. Вып. 3. С. 70–83.
Popova N. V. Avtomaticheskii generator nestrukturirovannykh mnogogrannykh setok na osnove tetraedralnykh setok s prizmaticheskimi sloyami // Tam zhe. 2021. Vyp. 3. S. 70–83.
 15. *Гребенников А. Н., Деулин А. А., Маношина И. О., Денисова О. В., Циберева Ю. А., Кривонос А. С., Тарасова Н. В., Ялозо А. В., Салова И. Н., Быков М. А., Мохов В. А., Кудрявцев О. В., Шараров Р. А., Масленникова О. В., Мигров Ю. А., Румянцев С. Н., Большухин М. А., Свешников Д. Н., Богатырев Д. П., Орехова Е. Е., Гоголев Н. А., Иванов М. А.* Адаптация, верификация и использование пакета программ "Логос" для решения задач атомной энергетики // Сб. тр. 8-й межд. науч.-тех. конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". Подольск, 2013.
Grebennikov A. N., Deulin A. A., Manoshina I. O., Denisova O. V., Tsibereva Yu. A.,
 - Krivosnos A. S., Tarasova N. V., Yalozo A. V., Salova I. N., Bykov M. A., Mokhov V. A., Kudryavtsev O. V., Sharapov R. A., Maslennikova O. V., Migrov Yu. A., Rumyantsev S. N., Bolshikhin M. A., Sveshnikov D. N., Bogatyryev D. P., Orekhova E. E., Gogolev N. A., Ivanov M. A.* Adaptatsiya, verifikatsiya i ispolzovanie paketa program "Logos" dlya resheniya zadach atomnoy energetiki // Sb. tr. 8-y mezhd. nauch.-tekh. konf. "Obespechenie bezopasnosti AES s VVER ". Podolsk, 2013.
 16. *Цалко Т. В., Панкратов Д. М.* Восстановление геометрических особенностей фасеточной модели и разбиение на однозначно проецируемые области при построении поверхностной треугольной сетки в препроцессоре "Логос" // XVI науч.-тех. конф. "Молодежь в науке": сб. докл. Т. 1. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2018. С. 27–32.
Tsalko T. V., Pankratov D. M. Vosstanovlenie geometricheskikh osobennostey fasetochnoy modeli i razbienie na odnoznachno proetsiruemye oblasti pri postroenii treugolnoy setki v prepostprotsessore "Logos" // XVI nauch.-tekh. konf. "Molodyezh v nauke ": sb. dokl. T. 1. Sarov: RFYaTs-VNIIEF, 2018. S. 27–32.
 17. CM2 SurfMesh T3: Surface Triangle Mesh Generator for CAD Models. <https://www.computing-objects.com/cm2-surfmesh-t3/>
 18. *Евстифеева Е. О.* Алгоритм упрощения поверхностной треугольной сетки при подготовке задач аэрогидродинамики в пакете программ "Логос" // XIX науч.-тех. конф. "Молодежь в науке": сб. тез. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2021. С. 18–19.
Evtifeeva E. O. Algoritm uproshcheniya poverkhnostnoy treugolnoy setki pri podgotovke zadach aerogidrodinamiki v pakete program "Logos" // XIX nauch.-tekh. konf. "Molodyezh v nauke": sb. tez. Sarov: RFYaTs-VNIIEF, 2021. S. 18–19.
 19. *Белова А. И., Лукичев А. Н., Борисенко О. Н.* Вычисление кривизны дискретных поверхностей в генераторе поверхностных триангуляционных сеток Логос.Препост // 15-я науч.-тех. конф. "Молодежь в науке": сб. докл. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2017. С. 34–40.
Belova A. I., Lukichyev A. N., Borisen-

- ko O. N. Vychislenie krivizny diskretnykh poverkhnostey v generatore poverkhnosnykh triangulyatsionnykh setok Logos. Prepost // 15-ya nauch.-tekh. konf. "Molodyezh v nauke": sb. dokl. Sarov: RFYaTs-VNIIEF, 2017. S. 34–40.
20. Панкратов Д. М. Улучшение качества ячеек при построении поверхностных треугольных сеток в препостпроцессоре "Логос Аэрогидро" // XX науч.-тех. конф. "Молодежь в науке": сб. тез. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2022. С. 25.
Pankratov D. M. Uluchsheniye kachestva yachee pri postroenii poverkhnostnykh treugolnykh setok v prepostprotsessore "Logos Aerogidro" // XX nauch.-tekh. konf. "Molodyezh v nauke": sb. dokl. Sarov: RFYaTs-VNIIEF, 2022. S. 25.
21. Евстифеева Е. О., Панкратов Д. М., Цалко Т. В. Алгоритмы автоматического исправления пересечений, реализованные в генераторе поверхностных треугольных сеток в пакете программ "ЛОГОС" // "Суперкомпьютерное моделирование и искусственный интеллект". Межд. конф. "XXII Харитоновские математические науч. чтения, 24–27 мая 2021 года": сб. науч. тр. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2022. С. 170–180.
- Evstifeeva E. O., Pankratov D. M., Tsalko T. V. Algoritmy avtomaticheskogo ispravleniya peresecheniy, realizovannye v generatore poverkhnostnykh treugolnykh setok v pakete program "LOGOS" // "Superkompyuternoe modelirovaniye i iskusstvennyy intellekt". Mezhd. konf. "XXII Kharitonovskie matenaticheskie nauch. chteniya, 24–27 maya 2021 goda": sb. nauch. tr. Sarov: RFYaTs-VNIIEF, 2022. S. 170–180.*
22. Цалко Т. В., Панкратов Д. М. Разработка алгоритмов учета близких поверхностей при построении поверхностных треугольных сеток в препостпроцессоре пакета программ "Логос" // XIX науч.-тех. конф. "Молодежь в науке": сб. тез. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2021. С. 49.
Tsalko T. V., Pankratov D. M. Razrabotka algoritmov uchyeta blizkikh poverkhnostey pri postroenii poverkhnostnykh treugolnykh setok v prepostprotsessore paketa program "Logos" // XIX nuch.-tekh. konf. "Molodyezh v nauke": sb. tez. Sarov: RFYaTs-VNIIEF, 2021. S. 49.

Статья поступила в редакцию 26.05.23.
