

УДК 004.4
DOI 10.53403/9785951505071_2022_375

ПРЕПРОЦЕССОР ПАКЕТА ПРОГРАММ ЛОГОС. ПОДГОТОВКА НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛИД ЭЛЕМЕНТОВ

А. Л. Потехин, А. Н. Соловьев

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

В работе отражены основные возможности по подготовке в препостпроцессоре ЛОГОС[1] начальных данных для проведения инженерного анализа задач прочности. Описаны средства по обработке геометрической модели (такие как импорт из САПР, редактирование геометрических моделей, включая операции упрощения), применение различных средств сеткогенерации, как на геометрических гранях, так и в объемных телах. Рассказывается о средствах прямой генерации сеток для случаев, в которых исходные геометрические модели используются в виде вспомогательных элементов, а пользователь осуществляет генерацию и редактирование расчетных сеток прямыми методами.

Ключевые слова: ЛОГОС, ЛОГОС-Препост, препроцессор, препостпроцессор, математическая модель, сеткогенерация, генерация сеток, расчетная сетка.

Введение

В мире не существует полностью автоматических средств подготовки начальных данных для моделирования задач прочности с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Как следствие, для подготовки математических моделей используется развитое профильное программное обеспечение (ABAQUS [2], ANSYS [3], HyperMesh [4] и др.), которое может содержать себе сотни и даже тысячи различных операций.

При подготовке дискретных моделей (расчетных сеток) в инженерных пакетах преобладает использование двух разных подходов:

- подготовка сеток для «оценочных» расчетов с использованием автоматических алгоритмов, таких как генерация сеток из тетраэдров;
- существенное редактирование геометрических моделей и применение различных стилей генерации сеток в разных фрагментах для получения высококачественных моделей для получения результатов моделирования с высокой точностью.

Как правило, оба метода используются в различных пропорциях, в зависимости от класса задачи, сложности геометрии и опыта конкретного инженера.

Трудозатраты на подготовку одной математической модели для сложных исходных конструктивных сборок вполне могут составлять единицы человеко-лет. А для особо сложного конструктива с учетом высоких требований, предъявляемых к расчетным сеткам – десятки человеко-лет. При этом непосредственно время математического расчета, как правило, составляет незначительную долю времени относительно общего времени, затрачиваемого на подготовку математической модели, проведение и анализ результатов расчетов. Наибольшее время, как правило, занимает этап подготовки расчетных сеток, который может занимать до 80 % от общего времени расчета.

Поэтому, на рынке инженерных программных продуктов выигрывают те продукты, которые предоставляют максимум автоматизации всего процесса подготовки и проведения расчета.

При подготовке математических моделей для решения задач прочности можно выделить следующие ключевые этапы (рис. 1):

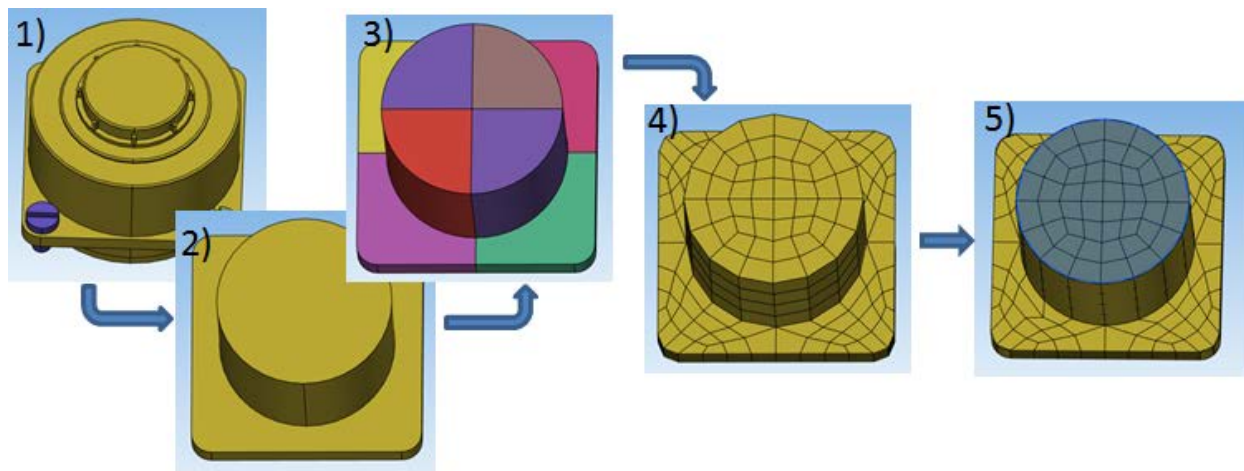


Рис. 1. Ключевые этапы подготовки математических моделей

1) первичная обработка геометрических моделей:

- трансляция геометрических моделей из файлов обменного (нативных или нейтральных текстовых) формата;
- проверка корректности загруженных геометрических элементов;
- анализ качества геометрических моделей с точки зрения наличия проблем, которые будут препятствовать построению качественных расчетных сеток;
- исправление/устранение проблем геометрических моделей.

2) идеализация/упрощение геометрических моделей, в частности, удаление характерных особенностей, снижение числа тел/граней/ребер, снижение размерности геометрических элементов;

3) редактирование геометрических моделей (в частности, подготовка моделей к сеткогенерации);

4) генерация расчетных сеток автоматическими и «прямыми» методами, операции редактирования расчетных сеток;

5) задание граничных и начальных условий, параметров моделирования и расчета.

При разработке препостпроцессора пакета программ ЛОГОС (далее ЛОГОС-ПП) реализовывались средства генерации сеток для обоих рассмотренных выше подходов. Очевидно, что для получения наиболее корректных и точных результатов инженерного анализа необходимым условием является обеспечение высокого качества сеточных моделей, и в данной работе акцент сделан именно на этом направлении.

В данной работе пойдет речь об этапах редактирования геометрических моделей и подготовки расчетных сеток, являющихся составной частью сквозной технологии проведения инженерных расчетов задач прочности на основе объемных элементов с использованием МКЭ.

Подготовка начальных данных в ЛОГОС-ПП

Редактирование геометрических моделей

Реализованные в ЛОГОС-ПП функциональные возможности по сфере применения условно можно разделить на следующие направления:

- анализ качества геометрических моделей, устранение проблем геометрических моделей;

- упрощение геометрических моделей;
- редактирование геометрических моделей (подготовка к сеткогенерации);
- генерация расчетных сеток автоматическими и «прямыми» методами;
- операции с ячейками/узлами расчетных сеток.

Как правило, в начале работы инженер загружает геометрическую модель из файла обменного формата, сохраненного из внешнего САПР. ЛОГОС-ПП использует математические алгоритмы 3D-моделирования, реализованные в программной библиотеке геометрического ядра C3D [5], разрабатываемой компанией C3DЛабз. На этапе после загрузки геометрических моделей возможны различные коллизии, связанные, как с ошибками проектирования в САПР, так и с разным представлением одного конструктива в различных геометрических ядрах.

С целью недопущения подобных ошибок на более поздние этапы формирования математической модели в ЛОГОС-ПП реализованы средства анализа качества моделей для проверки наличия потенциальных проблем и пригодности моделей к генерации сеток. После активации пользователем диалога анализа качества он выбирает интересующие его критерии из перечня, при необходимости изменяет параметры критериев, заданные по умолчанию и запускает анализ, после чего проводит визуальную обработку результатов анализа. На рис. 2 представлен вид диалога задания параметров анализа качества, и вид тела с подсвеченными проблемными гранями, у которых наблюдается самопересечение, так называемые X-грани.

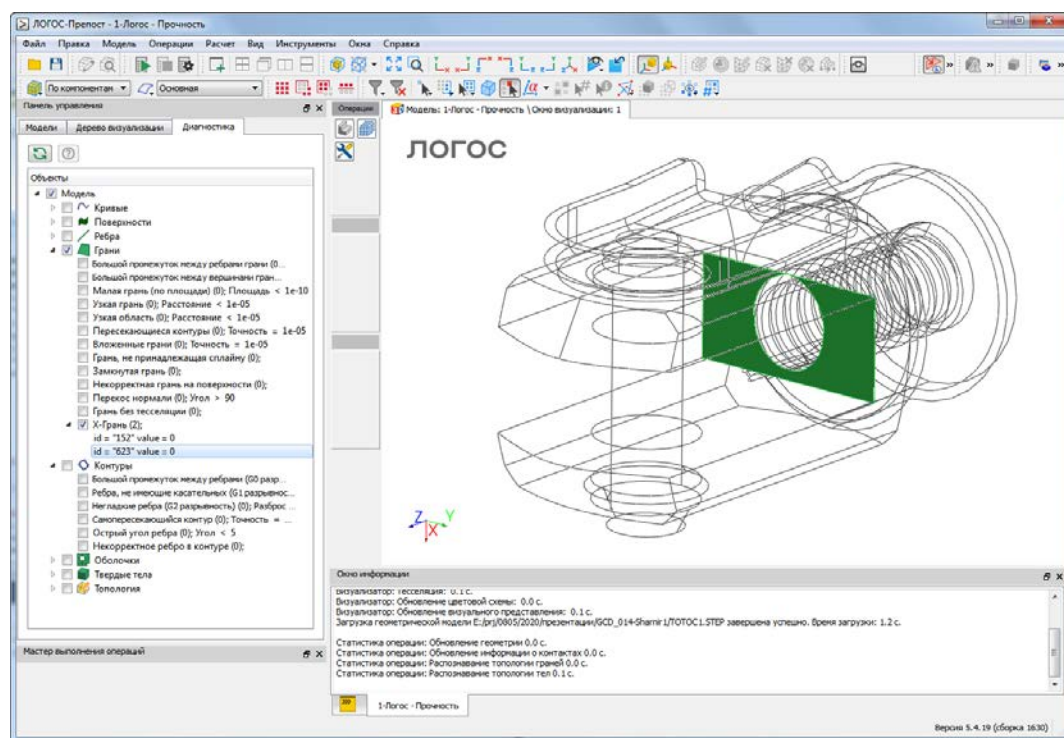


Рис. 2. Результаты анализа качества геометрической модели «Соединение с хомутом», загруженной с сайта GrabCAD [6]

Далее требуется оценить необходимый уровень детализации геометрической модели. Дело в том, что, как правило, конструкторская сборка содержит модель реального изделия с излишним с точки зрения компьютерного моделирования уровнем детализации. Различные мелкие конструктивные элементы вроде пазов, мелких отверстий, резьбы и т. д. могут не влиять на итог моделирования, но существенно осложнить этап подготовки сеточной модели и увеличить время моделирования в целом. Для упрощения геометрических моделей в рамках ЛОГОС-ПП реализованы следующие возможности: удаление отверстий, фасок, углублений, пазов; объединение ребер/граней, удаление характерных особенностей малого размера; построение срединных поверхностей. На рис. 3 приведен пример работы операции удаления характерных особенностей, а именно фаски и скругления.

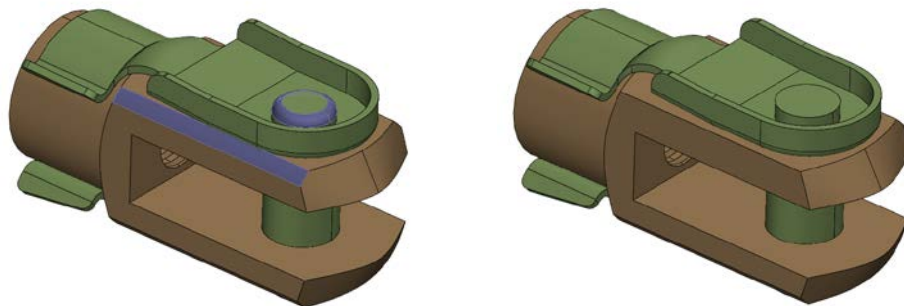


Рис. 3. Выбранные для удаления фаски и скругление (слева) и результат работы операции (справа)

Вместе с тем в ЛОГОС-ПП реализованы средства по явной замене части геометрических элементов на их более простые по форме аналоги: удаление тел и поверхностей, создание геометрических тел/граней/ребер. На рис. 4 приведена исходная конструкторская модель и модель с упрощенными телами подборки «Шасси».

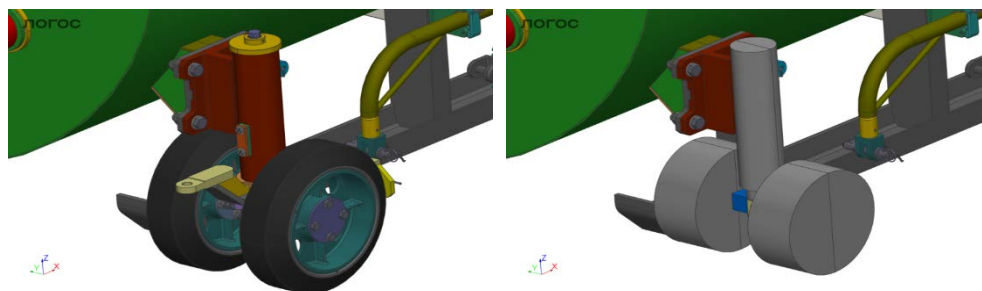


Рис. 4. Исходная конструкторская модель (слева) и упрощение ее подборки «Шасси» (справа)

Для редактирования геометрических элементов в ЛОГОС-ПП реализовано более пятидесяти операций создания/редактирование тел/граней/ребер.

При решении повседневных инженерных задач их геометрические модели содержат элементы сложной формы. Генерация сеток автоматическими методами в таких объектах, как правило, не дает приемлемого качества расчетных сеток. Для повышения качества сеток используется разбиение тел сложной формы на набор тел простой формы с последующим построением сеток с использованием метода отображения или протягивания. На рис. 5 приведен пример отделения от тела сложной формы частей с обеспечением возможности дальнейшего построения в части новых тел сетки с использованием метода протягивания.

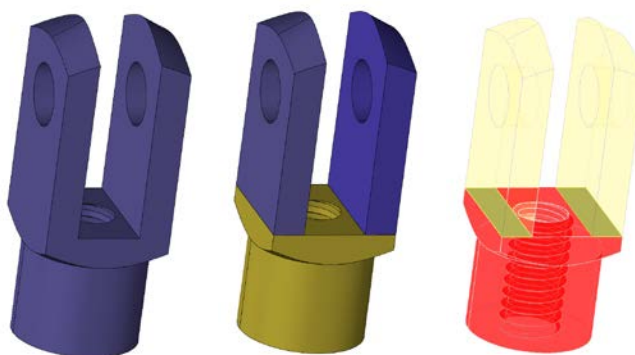


Рис. 5. Слева показано исходное тело; в центре три тела, полученные после отделения проушин заданной плоскостью, справа – желтым отображены тела, для которых возможно построение сетки методом протягивания

Средства пользовательского интерфейса

Кроме широкого перечня функциональных возможностей по редактированию геометрических элементов и генерации расчетных сеток в ЛОГОС-ПП (да и в других препроцессорах тоже) ключевыми являются возможности, обеспечивающие удобство работы пользователя. К таким возможностям относятся следующие средства:

- навигации и просмотра модели;
- выборочного отображения элементов модели;
- схемы визуализации и раскраски элементов модели;
- задания параметров интерактивного отбора элементов модели;
- работы с стандартными и пользовательскими видами
- набор типовых оконных элементов (виджетов) при формировании диалоговых окон задания параметров операций
- набор типовых элементов области визуализации (манипуляторов) для интерактивного задания параметров операций

1) Навигаторы: компоненты, сборка, группы

Навигаторы: компоненты, сборка, группы являются диалоговыми окнами, предоставляющими различные возможности группировки элементов геометрии для возможности выполнения массовых операций с объектами – скрытие/показ в области визуализации, задание цвета и т. п. (рис. 6).

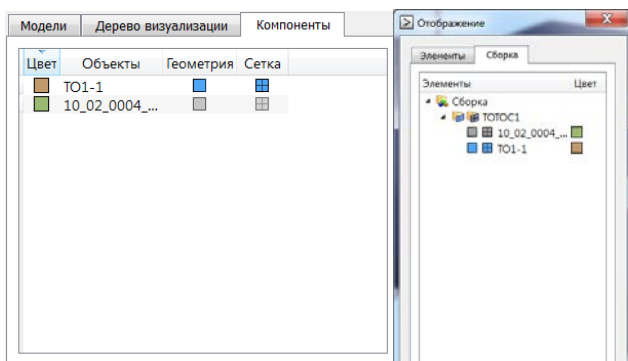


Рис. 6. Примеры навигаторов ЛОГОС-ПП

2) Выборочное отображение

Возможность выборочного отображения реализована в виде диалогового окна, предоставляющего возможности по управлению видимостью объектов по их типу, например, можно отобразить только элементы сетки – шестигранники и т. п. (рис. 7).

3) Схемы «раскраски» геометрических элементов

Схемы «раскраски» геометрических элементов позволяют различным образом представить геометрию/сетку в области визуализации, на рис. 8 показан выпадающий список с различными режимами раскраски геометрических элементов. Например, в режиме раскраски «Геометрические контакты» геометрическая модель отображается полупрозрачной, а контактные грани тел раскрашены желтым цветом, данная схема используется для наглядного представления контактных областей тел (второе тело справа на рис. 8).

4) Схемы отображения

Схемы отображения позволяют визуализировать геометрию/сетку различными способами – каркасом из ребер, заливкой, заливкой и реберным каркасом. Панель управления, предоставляющая возможность выбора между несколькими схемами отображения, представлена на рис. 9.

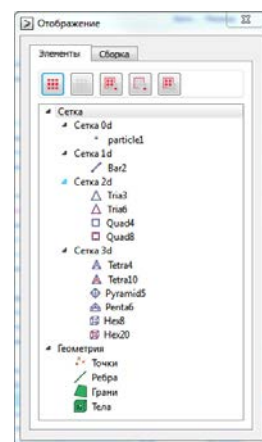


Рис. 7. Диалог управления типами отображаемых элементов

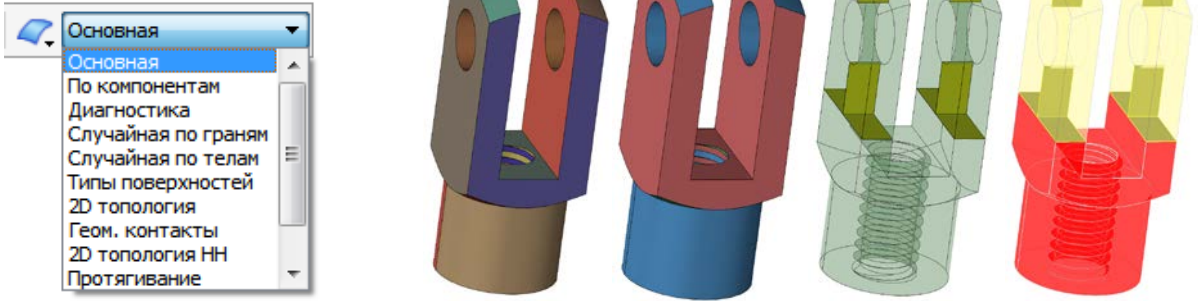


Рис. 8. Различные схемы раскраски геометрических элементов

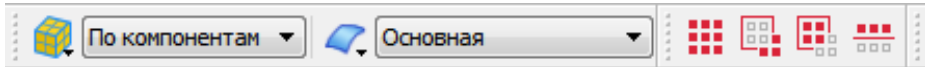


Рис. 9. Панель управления схемами отображения

5) Области выделения и режимы отбора элементов

Области выделения и режимы отбора элементов позволяют выбрать тип отбираемых объектов в области визуализации, а также способ их отбора (точка, прямоугольник, круг, многогранник). Данные возможности позволяют эффективно отбирать объекты, как сеточные, так и геометрические, в области визуализации в интерактивном режиме. Элементы управления для отбора представлены на рис. 10.

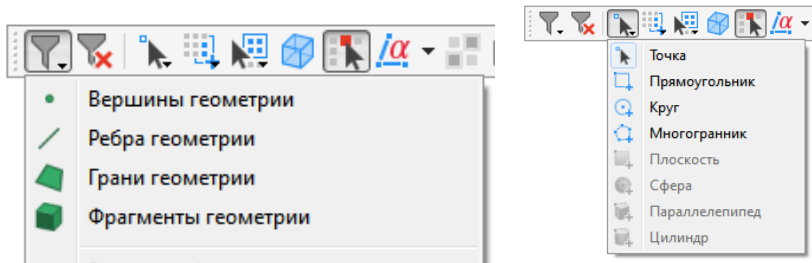


Рис. 10. Элементы управления для отбора элементов

6) Стандартные и пользовательские виды

Стандартные и пользовательские виды позволяют расположить модель одним из стандартных способов, а также запомнить/восстановить пользовательский вид. Управление видом показано на рис. 11.

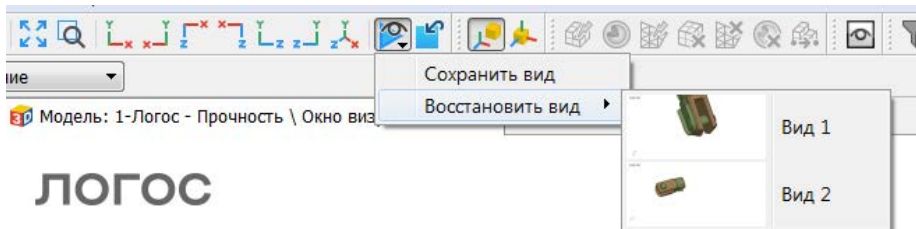


Рис 11. Элементы управления для отбора элементов

7) Типовые элементы диалогов задания параметров операций

Типовые элементы диалогов задания параметров операций реализованы в виде однотипных виджетов (отбор сеточных/геометрических объектов, задание параметров точек, векторов и т. п.),

располагаемых в схлопываемых блоках на диалоговом окне. Однотипные виджеты позволяют унифицировать интерфейс пользователя во всех операциях. На рис. 12 представлен интерфейс операции для разрезания тел плоскостью, содержащий виджеты для выбора тел, направления и точек.

8) Типовые манипуляторы в области отображения модели

Манипуляторы в области визуализации обеспечивают возможность как интерактивного задания параметров операций, а также позволяют облегчить пользователю визуальную интерпретацию заданных параметров. Например, на рис. 13 отображен манипулятор, позволяющий пользователю задавать параметры положения плоскости в 3D-пространстве.

Сеткогенерация по геометрическим объектам

При построении сетки по геометрическому объекту перед инженером стоит задача получить сетку максимального качества, согласованную по узлам и хорошо аппроксимирующую исходную геометрическую модель. Для решения этой задачи в ЛОГОС-ПП имеются различные виды генераторов, а также механизмы определения наиболее подходящего метода, с предустановленными параметрами, поддержкой возможности согласования сеток с сетками соседних тел/граней и т. д.

При построении поддерживаются методы генерации на гранях треугольных, преимущественно-четырёхугольных, полностью четырёхугольных, а также блочно-регулярных и специальных сеток.

При построении объёмных сеток в телах поддерживаются методы генерации тетраэдральных, преимущественно-шестигранных, сеток протягиванием и специальных сеток.

Генерация поверхностных сеток на гранях

При построении сеток непосредственно на геометрических гранях пользователь может выбрать режим сеткогенерации вручную, либо использовать режим автоматического выбора. На рис. 14 показано применение различных режимов к одной и той же геометрической грани. Работа части из этих режимов опирается на математические алгоритмы, реализованные в программной библиотеке CM2 MeshTools [7].

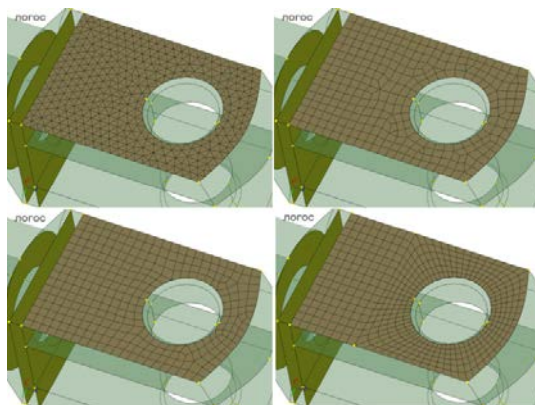


Рис. 14. Пример построения треугольной, преимущественно-четырёхугольной, полностью четырёхугольной и блочно-регулярной сеток

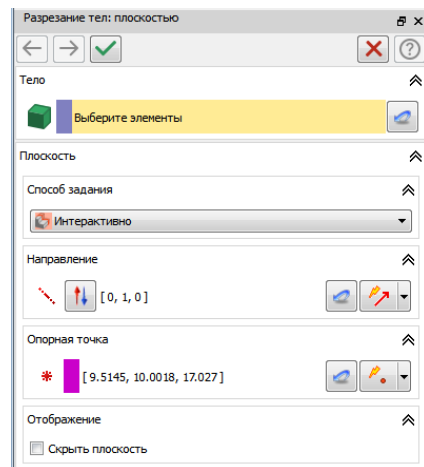


Рис. 12. Интерфейс операции для разрезания тел плоскостью

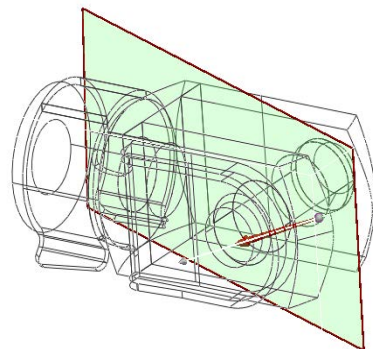


Рис. 13. Отображение манипулятора для задания положения плоскости

Сеткогенерация блочно-регулярных сеток на гранях

При генерации сеток с использованием блочно-регулярного метода первым этапом выполняется анализ формы граней на предмет из соответствия одному из нескольких predetermined шаблонов. Если это соответствие обнаружено, значит, блочно-регулярная сетка может быть построена.

При анализе формы геометрических граней важно не количество геометрических вершин, а углы между касательными геометрических смежных ребер. На рис. 15 приведен перечень шаблонов, поддержка которых реализована в ЛОГОС-ПП, тем самым позволяя строить для подобных граней блочно-регулярные сетки.

Далее задаются разбиения на геометрических ребрах, учитывающие глобальные параметры и ограничения при генерации сеток данным методом. Опционально пользователь может изменить разбиения на отдельных геометрических ребрах, после чего определяется наиболее подходящий шаблон «разбиения» граней на регулярные согласованные блоки и в каждом блоке выполняется построение сетки с использованием блочного генератора [8]. На рис. 16 показаны примеры разбиения на примитивные блоки исходных граней, относящихся к различным шаблонам формы и результирующие сетки, сгенерированные для этих граней.

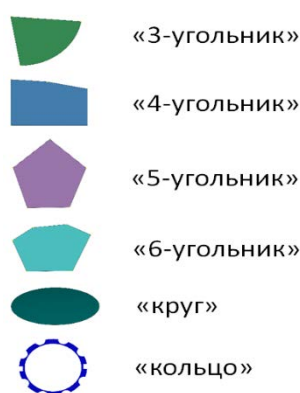


Рис. 15. Перечень шаблонов форм граней для генерации блочно-регулярных сеток

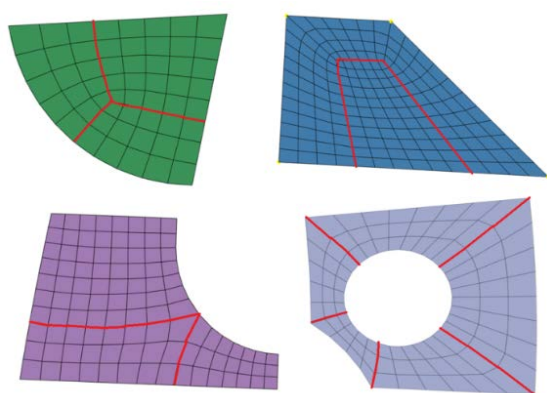


Рис. 16. Примеры построения блочно-регулярных сеток. Границы блоков показаны красным цветом

Генерация переходных слоев в поверхностных сетках

На практике среди множества типов геометрических граней часто встречаются кольца или их части. Исходя из стремления построить на таких гранях сетку из четырехугольных ячеек наиболее естественным видится применение простого генератора регулярных сеток (рис. 17).

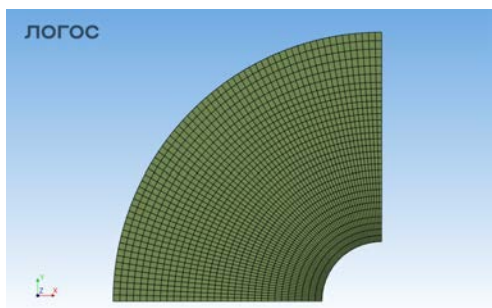


Рис. 17. Применение простого регулярного генератора

Итоговый размер сеточных элементов вблизи центра кольца значительно меньше размера на его большем радиусе, что приводит к общему увеличению числа элементов и, в итоге, к существенному увеличению времени моделирования. Для устранения данных недостатков используются специализированные алгоритмы формирования переходных слоев, направленные на сохранение размера сеточного элемента вдоль радиальной составляющей колец, как показано на рис. 18. Для этого грань разрезается на несколько частей, каждая из которых также является кольцом.

Затем, начиная с периферии кольца, начинается построение сетки с использованием регулярного генератора. При этом для получения максимально качественного переходного слоя рекомендуется использовать число ячеек на границах согласования кратным друг другу.

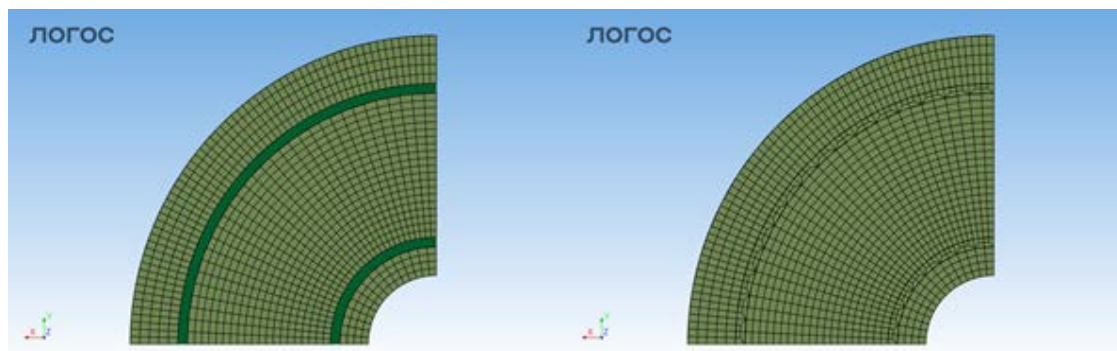


Рис. 18. Применение переходных слоев. Слева – исходные данные, справа – результат

Наконец, происходит согласование блоков посредством генерации на оставшихся гранях переходных слоев. Переходный слой состоит из последовательности повторяющихся блоков. На текущий момент используются два основных типа блоков «1 к 3» и двойной «1 к 2» (рис. 19).

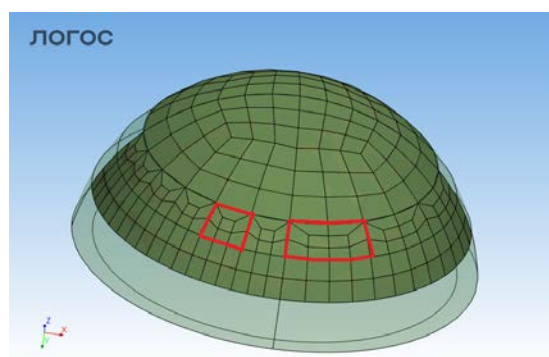


Рис. 19. Поддерживаемые шаблоны для переходных слоев

Генерация объемных сеток в телах методом протягивания

Построение объемных сеток протягиванием значительно упрощает и ускоряет процесс построения расчетных сеток. Данный метод позволяет строить 3D-сетки в телах, являющихся «топологическими призмами» с четырехугольными боковыми гранями. Инженер задает «стартовые» грани, на которых построена поверхностная сетка (рис. 20). Сетка строится протягиванием от набора «стартовых» граней к «финишной» (рис. 21). Также реализован алгоритм автоматического определения стартовых граней.

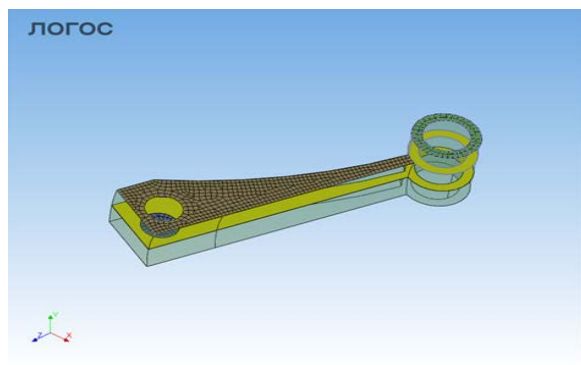


Рис. 20. Исходные данные для построения сеток протягиванием. Количество слоев протягивания может быть задано вручную

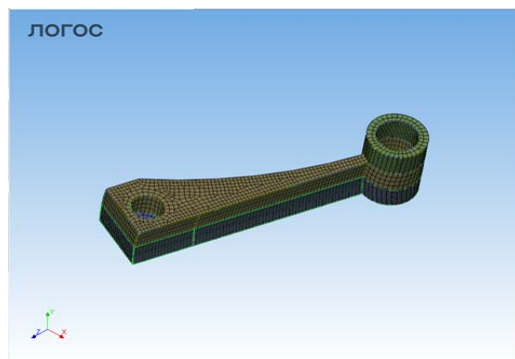


Рис. 21. Результат построения сеток протягиванием

Допускается наличие регулярной сетки на «боковых» гранях. В этом случае строится 3D-сетка, согласованная с сетками с «боковых» граней. Также учитываются сетки с соседних тел, если грани выбранного и соседнего тел являются контактными.

Сеткогенерация тетраэдрных сеток в телах

Тетраэдрная объемная сетка может быть построена практически в произвольном геометрическом объеме, что сильно расширяет область применения данной процедуры.

Реализованная в ЛОГОС-ПП процедура генерации тетраэдрной сетки допускает наличие сеток на гранях выбранного геометрического тела, при этом строится объемная сетка, согласованная с поверхностной. Также учитываются сетки с соседних тел, если грани выбранного и соседнего тел являются контактными. В случае четырехугольных поверхностных элементов на грани – строится переходный слой пирамид.

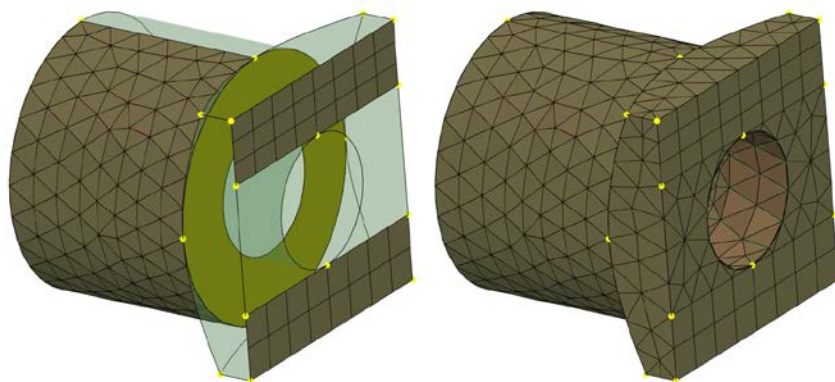


Рис. 22. Начальные данные для генерации тетраэдрных сеток. На трех гранях объема задана поверхностная сетка (слева). Итоговая сетка из тетраэдров и пирамид (справа)

«Прямая» генерация поверхностных сеток прямыми методами

На фрагментах сложной формы, где невозможно построить сетку протягиванием, упростить геометрическое тело или тело отсутствует, используются методы «прямой» генерации сеток. Такие как:

- извлечение поверхностной сетки (из набора объемных элементов);
- сетка по линейчатой поверхности;
- экструзия/протягивание;
- создание ячеек офсетом.

После сеткогенерации любого типа (по геометрическим объектам или «прямыми» методами) возможно редактирование сеточных элементов следующими алгоритмами:

- разбиение ячеек по шаблону;
- дробление слоя ячеек;
- объединение ячеек;
- редактирование/согласование направления нормалей;
- изменение направления «обхода» ячеек;
- создание/удаление узлов/ячеек;
- сшивка/расшивка узлов;
- поиск дубликатов/вырожденных ячеек;
- перемещение/проекция узлов;
- удаление сетки на геометрии.

Для контроля качества построенных сеток и ее оптимизации реализованы операции:

- анализ качества;
- сглаживание сеточных элементов.

Заключение

В ЛОГОС-ПП реализованы базовые средства генерации поверхностных и объемных сеток, как по элементам геометрических моделей, так и методами «прямой» сеткогенерации, что позволяет готовить сеточные модели для дальнейшего моделирования прочности в отчужденном режиме с использованием препостпроцессора ЛОГОС.

Литература

1. Пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования [Electronic resource]—Mode of access <http://logos.vniief.ru>;
2. Simulia ABAQUS [Electronic resource] – Mode of access <http://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/simulia/produkty/abaqus>;
3. ANSYS Workbench [Electronic resource] – Mode of access <http://ansys.com/Products/Platform>;
4. Altair HyperMesh [Electronic resource] – Mode of access <http://www.altairhyperworks/product/HyperMesh>;
5. Геометрическое ядро C3D [Electronic resource] – Mode of access <https://c3dlabs.com/ru/products/c3d-kernel/>;
6. GrabCAD Library. The largest online community of professional designers, engineers, manufacturers and student [Electronic resource]—Mode of access <https://grabCAD.com/clevis-joint/>;
7. CM2 MeshTools Suite [Electronic resource] – Mode of access <http://computing-objects.com/cm2-meshtools-suite/>
8. Лазарев В. В. Распараллеливание и оптимизация построения блочных сеток в препроцессоре ЛОГОС // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 1. С. 54–63.

PREPROCESSOR OF “LOGOS” SOFTWARE PACKAGE: INITIAL DATA PRE-PROCESSING FOR SIMULATION OF THE STRENGTH ANALYSIS PROBLEMS USING SOLID ELEMENTS

A. L. Potekhin, A. N. Solovev

Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov

The paper presents the LOGOS preprocessor [1] functionality to prepare data for the engineering strength analysis. The geometric model processing tools for data importing from CAD system, geometric model editing, including simplification operations, and the use of various tools for the mesh generation on geometric faces and three-dimensional bodies are described. Also, the paper describes tools for the direct generation of meshes in cases, when the original geometric models are used as auxiliary means and the user performs the generation and editing of a computational mesh with the direct methods.

Key words: LOGOS, Logos Prepost, preprocessor, postprocessor, a mathematical model, mesh generation, a computational mesh.