

СРЕДСТВА ГЕНЕРАЦИИ СЕТОК ПРЯМЫМИ МЕТОДАМИ В ПРЕПРОЦЕССОРЕ ЛОГОС-ПРЕПОСТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ

Пятериков Константин Алексеевич (КАРyaterikov@vniief.ru), Беспалов Андрей Петрович, Коврижных Игорь Константинович, Соловьёв Александр Николаевич, Тихонов Александр Викторович, Царёва Татьяна Владимировна

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

В настоящий момент в мире не существует полностью автоматизированных средств подготовки сеточных моделей для дальнейшего моделирования задач прочностного анализа. Применение алгоритмов с высокой степенью автоматизации, например, генераторов сеток из тетраэдров, как правило, приводит к построению сеточных моделей с большим числом элементов, а значит с существенными временами моделирования. Кроме того, расчетные схемы, применяемые в программах для моделирования прочностных процессов, в среднем, показывают на сетках из тетраэдров менее качественные результаты, нежели на сетках, состоящих, например, только из шестигранных ячеек. Поэтому практически все развитые коммерческие программные продукты, предназначенные для компьютерного моделирования прочности, предлагают пользователям богатый инструментарий по обработке исходных геометрических моделей, в частности для их упрощения и разрезания на более простые объекты и различные алгоритмы генерации сеток, в том числе и ручные.

По аналогии с лучшими мировыми практиками [1], [2] в препроцессоре пакета программ ЛОГОС [3] реализуется гибридный метод построения сеточных моделей для моделирования задач прочности. Он основан на возможности применения двух стратегий. Первая предполагает методичное разрезание геометрических тел и поверхностей на более простые объекты и применения различных генераторов сеток в полуавтоматическом режиме. Вторая позволяет подготавливать части сеточных моделей с помощью, так называемых, прямых методов генерации, когда геометрия используется лишь в качестве вспомогательной информации. Такие алгоритмы с меньшими трудозатратами позволяют полностью или частично игнорировать некоторые особенности геометрических моделей, не существенные для данного случая моделирования.

Средства генерации согласованных неструктурированных сеток гибридным методом в ЛОГОС-ПРЕПОСТ делятся на две большие группы: графический пользовательский интерфейс (ГПИ) и генерация сеток. ГПИ содержит средства графического пользовательского интерфейса, обеспечивающие возможностями просмотра расчетной модели в соответствии с различными аспектами, задаваемыми пользователями. Группа возможностей генерации сеток содержит функциональные возможности по ручному и автоматическому созданию ячеек расчетной сетки.

Ключевые слова: препроцессинг, генерация сеток, подготовка начальных данных ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ, ЛОГОС-ПРЕПОСТ.

DIRECT MESH GENERATION TOOLS IN LOGOS-PREPOST PREPROCESSOR FOR SOLVING STRENGTH PROBLEMS

Pyaterikov Konstantin Alekseevich (КАРyaterikov@vniief.ru), Bepalov Andrey Petrovich, Kovrizhnykh Igor Konstantinovich, Solovyev Aleksandr Nikolaevich, Tikhonov Aleksandr Viktorovich, Tsareva Tatiana Vladimirovna

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

In the world, there are currently no fully automated tools for preparing mesh models for further strength simulations. The use of algorithms with a high degree of automation, for example, tetrahedron mesh generators, leads to the construction of mesh models with a large number of elements and signifi-

cant time consumption for simulation. Besides, the computational schemes used in the strength simulation programs demonstrate, on average, lower-quality results on tetrahedron meshes in comparison with meshes consisting of hexahedral cells only. Almost all developed commercial CAE systems for strength simulations offer a rich user toolkit for processing initial geometric models, in particular, for simplifying and cutting them into simpler objects and various mesh generating algorithms, including the manual ones.

By analogy with the world's best practices, the LOGOS preprocessor implements a hybrid method for constructing mesh models for modeling strength problems. This method is based on the possibility of using two strategies. The first involves the systematic cutting of geometric bodies and surfaces into simpler objects and the use of various mesh generators in semi-automatic mode. The second one allows preparing parts of mesh models using the so-called direct generation methods, when the geometry is used only as auxiliary information. Such less expensive algorithms make it possible to completely, or partially ignore some features of geometric models that are not essential for such modeling.

The tools for generating consistent unstructured meshes by the hybrid method in the LOGOS preprocessor are divided into two large groups: GUI and Mesh Generation. The GUI tools allow the user to view the computational model in accordance with user-defined settings. The mesh generation tools provide functionality for manual and automatic creation of computational mesh cells.

Key words: preprocessing, mesh generation, preparing initial data LOGOS-STRENGTH, LOGOS-PREPOST.

Автоматические методы генерации сеток

В ЛОГОС-ПРЕПОСТ реализовано несколько автоматических алгоритмов генерации ячеек по исходным геометрическим элементам: ребрам, граням и телам. Пользователю достаточно задать относительно небольшое количество параметров генерации и область, занимаемая геометрическими элементами, будет покрыта ячейками соответствующей размерности, а именно будут сгенерированы 1D-элементы для ребер, 2D-элементы для граней и 3D-элементы для тел. Примеры генерации сеток автоматическими методами приведены на рис. 1.

логос

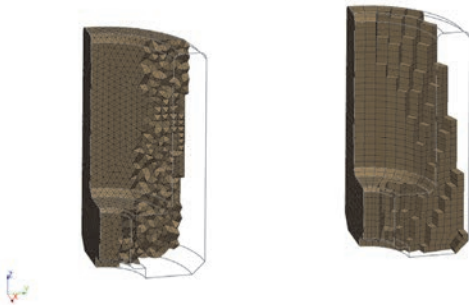


Рис. 1. Пример сеток, построенных с использованием генератора тетраэдрных сеток и методом протягивания

Наилучшее качество сетки для решения задач прочности дает блочный генератор [4], но для его использования требуется предварительная подготовка геометрической модели, а именно разбиение тел на топологические шестигранники, что не всегда возможно. Генератор тетраэдрных сеток является универсальным, но на практике использование тетраэдрных сеток сводится к минимуму в связи с необходимостью значительно увеличивать количество сеточных элементов (для сохранения точности решения задачи), в сравнение с шестигранными генераторами, что влечет увеличение времени и, как след-

ствие, стоимость расчетов. Во многих случаях компромиссом является построение сетки методом протягивания поверхностной сетки по заранее подготовленным геометрическим объемам – топологическим многоугольным призмам.

Прямые методы генерации сеток

В случаях, когда требуется сгенерировать сетку, с частичным учетом геометрии или в случаях отсутствия геометрической модели, используются операции прямой генерации сеток. Для формирования требований к средствам прямого редактирования сеток нами были проанализированы функциональные возможности ряда инженерных пакетов и выявлены наиболее часто используемые операции прямого редактирования и общие требования к ГПИ. Также коллеги инженеры сформировали собственные требования к возможностям прямой генерации сеток в препроцессоре модуля ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ. Собранные данные были систематизированы и выделен набор «общих» требований как к функциональным возможностям, так и к ГПИ. Кроме непосредственно генерации, необходима возможность контролировать корректность сетки: искать/удалять дубликаты узлов и ячеек, висящие узлы/ячейки, пересечения ячеек (collisions), вырожденные ячейки, анализировать качество по различным критериям.

Реализованные в ходе работы операции прямого редактирования сеточной модели были разбиты на 4 группы: общие операции (позволяющие генерировать/редактировать сеточные элементы всех размерностей), операции с 3D-ячейками, операции с 2D-ячейками, операции с узлами. Ниже приведен список всех реализованных в препроцессоре ЛОГОС-ПРЕПОСТ операций прямой генерации сетки для решения задач прочностного анализа.

• Общие операции:

- Построение ячейки по узлам
- Экструзия

- Трансформации
- Топологическая изоляция
- Преобразование ячеек
- Отвязка сетки от геометрии
- Удаление
- **Операции с 3D-ячейками:**
- Дробление
- Объединение
- Разбиение по шаблонам
- **Операции с 2D-ячейками:**
- Извлечение поверхностной сетки
- Разрезание
- Офсет
- Смена направления/согласование нормалей
- Согласование обходов
- Дробление
- Объединение
- Разбиение по шаблонам
- **Операции с узлами:**
- Создание
- Перемещение/проецирование
- Объединение
- Выравнивание
- Ассоциация/удаление ассоциаций
- Переиндексация

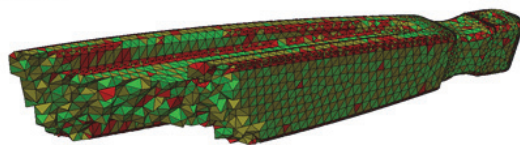
Необходимо отметить, что большинство приведенных операций являются обобщенными сущностями, содержащими в себе наборы операций, включающие в себя несколько вариантов операции. Так, например, операция «Экструзия» содержит в себе 4 отдельных алгоритма экструзии всех типов ячеек (за исключением 3D) вдоль заданного вектора, вдоль заданной цепочки ребер, вдоль заданной цепочки узлов, вращение вокруг заданной оси, а операции трансформации позволяют переносить, вращать, зеркально отражать и масштабировать сеточные элементы. Таким образом, в препроцессоре ЛОГОС-ПРЕПОСТ насчитывается более 100 реализованных алгоритмов прямого редактирования сеточной модели, что составляет порядка 80 % возможностей, реализованных в КПО [1][2]. Это позволяет сделать вывод, что средствами препроцессора ЛОГОС-ПРЕПОСТ можно генерировать сетку для большинства типов задач прочностного анализа.

Контроль корректности построенной сетки

В препроцессоре ЛОГОС-ПРЕПОСТ также реализована возможность анализа качества построенной сетки. В процедуре анализа качества реализовано 13 критериев: форма, минимальный угол, максимальный угол, минимальное ребро, максимальное ребро, протяжение, площадь/объем, соотношение сторон, неплоские грани, перекося, якобиан, конусность, ортогональность. Для каждого из критериев задаются пороговые значения, в соответствии с которыми, после вычисления значения критерия, раскрашиваются ячейки. Данная процедура позволяет контролировать корректность построенной сетки в процессе ее генерации. На рис. 2 приведена сеточная

модель с ячейками раскрашенными в цвета в соответствии с приведенной ниже таблицей критериев.

ЛОГОС



Анализ качества сетки

Критерий	Название	Количество ячеек		
Форма		22	13954	21461
Минимальный угол		1709	11201	22527
Максимальный угол		43	738	34656
Протяжение		69	1847	33521
Соотношение сторон		391	1527	33519
Неплоские грани		0	0	35437
Перекося		8613	16453	10371
Якобиан		0	109	35328
Конусность		0	0	0
Ортогональность		31	2840	32566

Отображение

- Плохие
- Приемлемые
- Хорошие
- Неопределенные

Значение критериев для выбранного элемента

Рис. 2. Процедура анализ качества сетки

Для оперативного исправления некачественной сетки и обнаружения ошибок генерации в препроцессоре реализованы следующие операции:

- поиск эквивалентных элементов,
- поиск изолированных элементов,
- поиск вырожденных ячеек,
- оптимизация положения узлов,
- ручное перемещение узлов,
- смена диагонали пары треугольных ячеек.

Макроязык

Одной из ключевых особенностей современных коммерческих САЕ-пакетов является поддержка макроязыка (наборов макрокоманд) для обработки и подготовки расчетных сеток. Реализация такой поддержки различна в разных коммерческих пакетах. В препроцессоре ЛОГОС-ПРЕПОСТ макрокоманда, описанная в сценарии на языке Python [5], вызывается с помощью утилиты SWIG [6].

Операциям прямого редактирования сетки, выполняемым через ГПИ, соответствует макрокоманда, которой в качестве аргументов передается информация об объектах, участвующих в операции, и другие необходимые параметры. В качестве аргументов в макрокоманды передаются не сами объекты, а их идентификаторы. Это позволяет контролировать время жизни объектов модели данных и избегать

аварийных остановок ЛОГОС-ПРЕПОСТ при попытках доступа к уже несуществующим объектам.

Место подсистемы макроязыка схематично изображено на рис. 3.



Рис. 3. Место подсистемы макроязыка, реализующего средства макроязыка в компоненте ЛОГОС-ПРЕПОСТ

Использование макрокоманд позволяет создавать необходимые инженеру сценарии автоматического задания параметров и выполнения цепочек операций без использования их ГПИ.

В качестве примера рассмотрим автоматизацию алгоритма построения сетки с помощью макрокоманд на языке Python.

```

1 import math
2 model = mdb.GetModel( 1 )
3
4 dF = 2.0 * 3.14 / 100.0
5
6
7 R = 1
8 x0 = 0
9 y0 = 0
10 z0 = 0
11
12 comp = GetComponent( model, n )
13
14 points = []
15 for i in range( 0, 100 ):
16     tmpPoints = [x0 + R * math.cos( dF * i ), y0 + R * math.sin( dF * i ), z0 + i / 100.0]
17     points.append( tmpPoints )
18
19 edges = []
20 edges.append( CreateSplineEdge( model, points, comp ) )
21
22 nodes = []
23
24 nodes.append( CreateNode( model, [x0 + R * 0.01, y0, z0] ) )
25 nodes.append( CreateNode( model, [x0 + R, y0, z0] ) )
26 nodes.append( CreateNode( model, [x0 + R, y0, z0 + 0.01] ) )
27 nodes.append( CreateNode( model, [x0 + R * 0.01, y0, z0 + 0.01] ) )
28
29 cells = []
30 cells.append( CreateCell( model, nodes, 9, comp ) )
31
32 set = CreateCellSet( model )
33 AddCellsToSet( model, set, cells )
34
35 ExtrudeCellsByPath( model, set, comp, [x0 + R, y0, z0], edges, 1000, True)

```

Рис. 4. Сценарий генерации сетки на языке Python

В сценарии, представленном на рис. 4, приведен пример следующего алгоритма:

- построение направляющего ребра по координатам, задаваемым системой уравнений спирали;
- создание набора узлов по координатам;
- создание ячейки по набору узлов;
- экструзия ячейки вдоль направляющего ребра на заданное количество слоев.

Результат работы сценария приведен на рис. 5.

Для сравнения: время исполнения данного сценария занимает не более 2 секунд, тогда как выполнение данного сценария инженером с использованием ГПИ операций потребует не менее 15 минут.

ЛОГОС

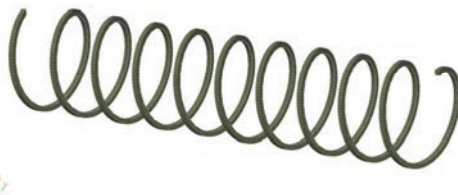


Рис. 5. Результат работы сценария на макроязыке

Реализация средств прямой генерации сетки в препроцессоре ЛОГОС-ПРЕПОСТ

Работа над препроцессором модуля ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ началась в 2016 г. К этому времени ЛОГОС-ПРЕПОСТ уже был достаточно развитой, сформировавшейся системой. Поэтому разработчикам пришлось встраиваться в существующую архитектуру проекта. Препроцессор модуля ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ по сути является плагином для подготовки к решению задач статической и динамической прочности, разрушения и деформации и др. Для реализации возможности генерации/редактирования сеток прямыми методами были внесены изменения в следующие подсистемы:

- подсистема ввода-вывода для реализации возможности экспорта/импорта сетки;
- подсистема модель данных: хранение элементов по компонентам, ассоциация геометрия/сетка;
- подсистема модель моделерных операций (реализация алгоритмов сеткогенерации);
- визуализация и интерактивный отбор;
- ГПИ.

В препроцессоре модуля ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ реализованная собственная модель данных. В ходе работы инженер может структурировать модель по компонентам, хранящим в себе как геометрические, так и сеточные элементы. Компоненты, в свою очередь можно объединять в сборки.

Алгоритмы, изменяющие модель данных, представляют собой структуру, называемую процедурой. В процедуру входят «Диалог», «Операция» (непосредственно сам алгоритм), «Вспомогательные библиотеки» с базовыми операциями, и системные библиотеки. Реализация операций генерации и редактирования сеток находится на моделерном уровне.

Все операции реализованы в единой архитектуре. Рассмотрим ее на примере «Экструзии ячеек». На уровне диалога (рис. 6), расположенного в программной библиотеке uppHybridModuleProcedures MeshEdit.lib пользователь задает входные параметры: ячейки и направление/путь экструзии.

В зависимости от типа переданных параметров вызывается один из перегруженных методов hybrid::ops::Extrusion() (рис. 7); (из библиотеки моделерных операций hgOps.lib), в котором реализован алгоритм генерации сетки экструзией с использованием программных библиотек базовых алгоритмов

получения/редактирования/сохранения/изменений сетки, вспомогательных функций из библиотеки hgMeshUtils и системных функций и контейнеров.

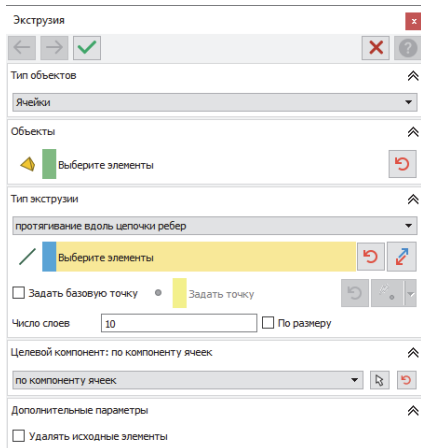


Рис. 6. Диалог процедуры «Экструзия»

```

HGOPS_API void Extrusion(
    ...data_model::Model& model,
    ...data_model::SetIds& cellsSet,
    ...data_model::Component* component,
    ...ExtrusionType extrusionType,
    ...types::Vec3d direction,
    ...types::Vec3d basePoint,
    ...double extent,
    ...size_t numberOfLayers,
    ...bool deleteOriginalCells,
    ...hybrid::ops::OpContext& context
);

HGOPS_API void Extrusion(
    ...data_model::Model& model,
    ...data_model::SetIds& nodesSet,
    ...ExtrusionType extrusionType,
    ...bool chain,
    ...types::Vec3d basePoint,
    ...types::Vec3d direction,
    ...double extent,
    ...size_t numberOfLayers,
    ...hybrid::ops::OpContext& context
);

HGOPS_API void Extrusion(
    ...data_model::Model& model,
    ...data_model::SetIds& cellsSet,
    ...data_model::Component* component,
    ...std::deque<#bEdge*> edges,
    ...types::Vec3d basePoint,
    ...size_t numberOfLayers,
    ...bool deleteOriginalCells,
    ...hybrid::ops::OpContext& context
);

HGOPS_API void Extrusion(
    ...data_model::Model& model,
    ...data_model::SetIds& nodesSet,
    ...data_model::Component* component,
    ...std::vector<#bCartPoint3D> pathPoints,
    ...types::Vec3d basePoint,
    ...bool deleteOriginalCells,
    ...hybrid::ops::OpContext& context
);

HGOPS_API void Extrusion(
    ...data_model::Model& model,
    ...data_model::SetIds& nodesSet,
    ...data_model::Component* component,
    ...bool chain,
    ...std::vector<#bCartPoint3D> pathPoints,
    ...types::Vec3d basePoint,
    ...hybrid::ops::OpContext& context
);
    
```

Рис. 7. Листинг файла extrusion.h с объявлением операций экструзии

Выполнение процедуры начинается с задания пользователем набора необходимых параметров алгоритма через ГПИ. Была проведена исследовательская работа по анализу текущих тенденций к формированию ГПИ в коммерческих пакетах инженерного анализа. В результате были сформированы требования к ГПИ: единый стиль модуля, ускорение освоения инструментов пользователем, упрощение/ускорение разработки ГПИ разработчиками приложения, эргономичность приложения для конечного пользователя. В препроцессоре ЛОГОС-ПРЕПОСТ это достигается за счет следования требованиям к общему стилю диалога (отступы, цветовая схема, стиль иконок), использованием стандартных виджетов (выпадающие списки, виджеты задания плоскости, точки, вектора и др.), разбиением параметров процедуры на блоки (использование схлапываемых блоков).

На рис. 8 представлен диалог процедуры «Проецирование узлов сетки», реализованные с помощью типовых виджетов задания параметров.

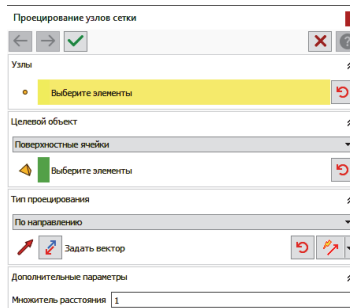


Рис. 8. Диалог операции проецирования узлов сетки

Выбор элементов сетки или геометрии, которые будут переданы в алгоритм операции можно осуществлять двумя способами: вводом идентификаторов необходимых элементов вручную, или, что значительно упрощает процесс если необходимо выбрать большое количество объектов, отбор элементов в контекстном режиме (интерактивный отбор). Для реализации этих возможностей была доработана подсистема визуализации и интерактивного отбора. На рис. 9 представлен виджет интерактивного отбора ячеек. Также были реализованы возможности отбора элементов различными областями (прямоугольник, круг, полигон, сфера, цилиндр, параллелепипед, плоскость), отбор соседних элементов, сеточных элементов, принадлежащих одной грани, компоненту и другие возможности. В задачах сеткогенерации также предъявляются требования к возможности выборочного отображения, как конкретных элементов, так и элементов по критериям (тип, принадлежность к компоненту).

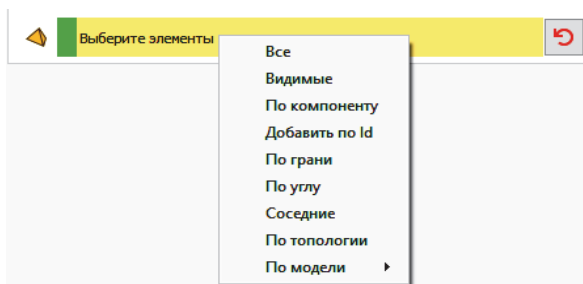


Рис. 9. Виджет интерактивного отбора элементов с открытым меню расширенных возможностей отбора

В ЛОГОС-ПРЕПОСТ также реализованы различные режимы раскраски и схемы отображения геометрии и сетки: по компонентам, по возможности протягивания, контакты, каркасное отображение и другие. Некоторые из них приведены на рис. 10.

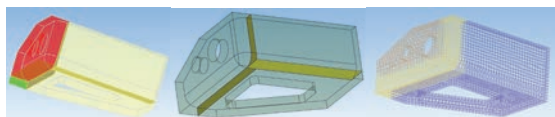


Рис. 10. Схемы отображения: по возможности генерации сетки протягиванием, геометрические контакты, каркасный режим с ребрами

Направления развития

Основной вектор развития препроцессора модуля ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ определяют его непосредственные пользователи. Тем не менее есть уже сформировавшиеся направления, которые будут развиваться в дальнейшем.

Планируется как реализация новых возможностей прямой генерации и редактирования сеточной модели, так и улучшение (оптимизация), повышение стабильности и доработка уже существующих возможностей. Также планируется развитие средств макроязыка, интерактивного отбора, повышение эргономики интерфейса.

Одной из самых актуальных задач является необходимость предоставить пользователю возможность отмены изменений прямых операций редактирования сетки.

Заключение

В препроцессоре пакета программ ЛОГОС реализуется гибридный метод построения сеточных моделей для моделирования задач прочности. Подход предполагает разбиение геометрических тел и поверхностей на блоки определенных топологических форм, построение на них сеток автоматическими и ручными методами, использование дополнительных средств работы с сеточными фрагментами. Подобную технику предлагают к использованию и лучшие образцы зарубежного коммерческого программного обеспечения.

В рамках данной работы подробно описаны возможности прямой генерации сеток средствами ЛОГОС-ПРЕПОСТ для моделирования задач прочностного анализа. Описаны требования к ГПИ

и средствам генерации сеток ручными методами. Также приведены примеры использования разработанных средств как через ГПИ, так и с помощью макрокоманд.

Базовые средства уже доступны для использования, новые и расширенные возможности средств генерации сеток прямыми методами будут доступны в следующей версии дистрибутива пакета программ ЛОГОС.

Список литературы

1. ANSYS Workbench: Engineering Solutions is a modeling and visualization environment [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://ansys.com/Products/Platform>.

2. Altair Hyper Mesh: Engineering Solutions is a modeling and visualization environment [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://www.altairengineering.ru/hyperMesh>.

3. ЛОГОС-ПРЕПОСТ [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://logos.vniief.ru/products/prepost>.

4. Лазарев В. В. Распараллеливание и оптимизация построения блочных расчетных сеток в препроцессоре пакета программ ЛОГОС Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов 2018. Вып. 1. С. 54–63. – Режим доступа http://vant.vniief.ru/ref_vant_search.php?ID_journal=118.

5. Python: About Python. [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://www.python.org/about>.

6. SWIG: Simplified Wrapper and Interface Generator. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://swig.org/exec.html>.