

# ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПО ОБРАБОТКЕ ГЕОМЕТРИЙ И ПОСТРОЕНИЮ СЕТОЧНЫХ МОДЕЛЕЙ В ЛОГОС.ПРЕПОСТ

*В. Ф. Фархутдинов, В. И. Тарасов, А. Н. Соловьев, О. Н. Борисенко, В. В. Лазарев, Д. В. Логинов, Н. С. Аверина, А. В. Марунин, А. И. Гриднев, М. Г. Шабунина, М. Г. Кузнецов, М. В. Черенкова, Е. А. Фролова, А. Н. Лукичев, Д. Н. Смолкина, А. Г. Купалова, М. В. Кузьменко, Н. А. Ховрин*

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

## Введение

В современной промышленности все большую роль играют компьютерное моделирование и инженерный анализ. Их использование позволяет во много раз сократить затраты времени и средств на разработку, создание и модернизацию различных технических устройств, от простейших конструкций до самолетов и атомных электростанций.

Опыт разработки новой техники зарубежными фирмами и тенденции развития конструкции и методов исследований показывают, что ведущую роль в обеспечении конкурентных преимуществ играют технологии компьютерного моделирования отдельных свойств и систем и виртуального проектирования объекта целиком. Это направление занимает все большее место в процессе проектирования, обеспечивая поиск оптимальных конструкторских решений и сокращение сроков разработки и снижения затрат на испытания.

Для этого в мире активно используются коммерческие комплексы программ, которые находят все большее применение и на предприятиях российской промышленности и все шире используются при проектировании новых изделий.

Можно констатировать ряд неблагоприятных тенденций:

- Возрастающая зависимость российских разработчиков техники от западных коммерческих программных средств.
- Недостаточное развитие национальных компьютерных технологий проектирования, что ведет к отставанию отечественной расчетно-экспериментальной базы от мирового уровня, необходимой для создания конкурентоспособных образцов техники, в т. ч. и для МО РФ.
- Недостаточное обеспечение предприятий разработчиков техники вычислительными ресурсами нового поколения, включая суперЭВМ.
- Уязвимость вычислительных комплексов с точки зрения информационной безопасности, что приводит к угрозе национальной безопасности и целостности России.
- Увеличенные сроки разработки и вывода продукта на рынок, что приводит к отставанию российской промышленности и потерям позиций в мире.

В настоящее время в ИТМФ ведутся работы по созданию и внедрению отечественного базового про-

граммного обеспечения для комплексного имитационного моделирования на суперЭВМ с массовым параллелизмом, предназначенного для использования на предприятиях высокотехнологичных отраслей промышленности. Основанием работ является решение Комиссии при Президенте Российской Федерации от 22 июля 2009 года по модернизации и технологическому развитию экономики России, внедрению технологии виртуального проектирования и компьютерного моделирования перспективных изделий различных отраслей промышленности с использованием суперЭВМ. В рамках работ по этому направлению в ИТМФ ведется разработка ПреПостПроцессора «ЛОГОС.ПреПост» [1] базового программного обеспечения. Заказчиками данной работы, помимо разработчиков методик ЛОГОС, ЛЭГАК-ДК, ДАНКО, НИМФА, являются некоторые крупные предприятия страны, такие как ОАО «ОКБ Сухого», ОАО «КАМАЗ».

Целью работы является разработка системы для задания начальных данных и генерации сеток в задачах инженерного анализа, а также предоставление графических интерфейсов для подготовки и выполнения инженерного анализа с использованием отечественных счетных кодов. ЛОГОС.ПреПост будет представлять собой пакет кроссплатформенных программных модулей, дающих пользователю удобный интерфейс для создания расчетной модели, подготовки и запуска выбранного решателя, визуализации и постобработки полученных результатов.

Система должна позволить осуществлять поиск оптимальных конструкторских решений, сократить сроки разработки объектов, снизить затраты на разработку изделий и их испытания, повысить надежность изделий. Разрабатываемый пакет программ должен заменить используемые зарубежные аналоги в плане подготовки задач инженерного анализа и дать возможность использовать современные суперЭВМ для полномасштабного имитационного моделирования инженерных задач с большим числом элементов сетки.

## Интерфейс пользователя

Графический пользовательский интерфейс разрабатываемого программного обеспечения должен

соответствовать интерфейсам современного программного обеспечения, существующего для решения задач имитационного моделирования. Пример интерфейса ЛОГОС.ПреПост приведен на рис. 1.

## Работа с геометрией

Неотъемлемой частью САЕ является геометрическое ядро. Геометрическое (математическое) ядро – это набор функций, выполнение которых обеспечивает импорт, экспорт и построение трехмерных моделей. Ядро создается для использования в прикладных программах. Доступ к функциям ядра конечному пользователю открывается через графический пользовательский интерфейс. Кроме того, ядро иногда называют движком системы геометрического моделирования. Подобно тому, как двигатель автомобиля определяет «потолок» его скорости, математическое ядро определяет предел функциональных возможностей использующей его САЕ, в части работы с геометрией.

В ЛОГОС.ПреПост используется геометрическое ядро 3DTV [2]. Кроме привычных функциональных

возможностей по работе с геометрией, данное математическое ядро предоставляет функционал, обеспечивающий полную диагностику CAD моделей и включающий весь необходимый набор инструментов для быстрого и эффективного исправления 3D моделей. Средства проверки могут быть нацелены как на получение валидной модели в CAD системах (при трансляции данных), так и на приведение CAD модели в соответствие с существующими международными стандартами, такими как VDA 4955, JAMA и AIAG D-15, или задаваемыми пользователями критериям.

Геометрическое ядро 3DTV разработано для обеспечения эффективного взаимодействия между различными CAD системами, решает вопросы трансляции данных, хранящихся в различных CAD форматах (табл. 1), и позволяет проводить диагностику и исправление 3D моделей. Процесс диагностики и исправления высокоавтоматизирован и может быть применен как к отдельным телам, так и к сборкам различной степени сложности. Исправление всегда осуществляется в рамках точности модели, что обеспечивает исходную целостность представления и исключает какие-либо деформации.

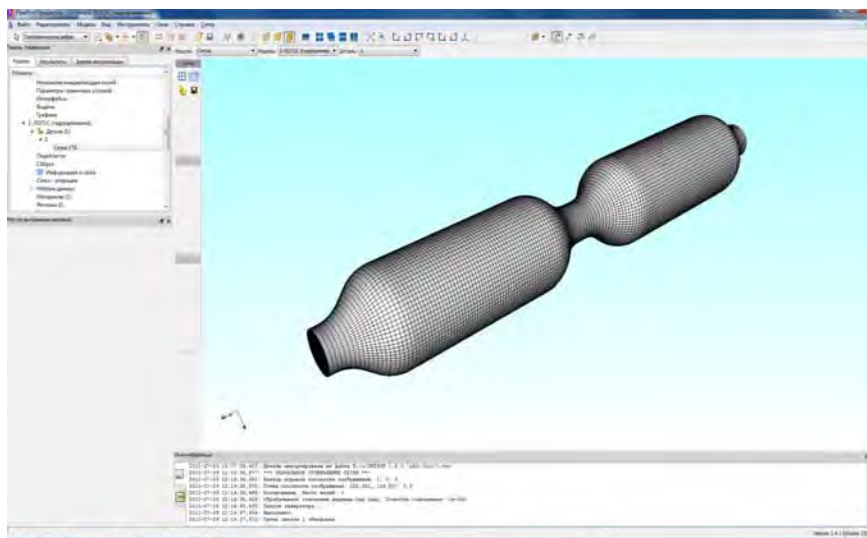


Рис. 1. Интерфейс пользователя

## Импорт/Экспорт данных

<p>Чтение:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>CATIA V4 (.model, .exp / 4.1.9 to 4.2.4)</li> <li>CATIA V5 (.CATPart, CATProduct / up to R19)</li> <li>CATIA V5 PMI</li> <li>Unigraphics (.prt / 11 to 18, NX to NX6)</li> <li>Unigraphics PMI</li> <li>Pro/E (16 to Wildfire 4)</li> <li>Pro/E PMI</li> <li>Inventor (Parts - 6 to 12, Assemblies - 11 to 20)</li> <li>Parasolid (12 to 20)</li> <li>ACIS (up to 20)</li> <li>STEP</li> <li>IGES (5.x - 6.x)</li> <li>VDA-FS</li> <li>VRML</li> <li>STL</li> <li>AutoForm (.af, .afm)</li> <li>Mesh</li> <li>3DTransVidia XML</li> </ul>	<p>Запись:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>CATIA V4 (.model, .exp / 4.1.9 to 4.2.4)</li> <li>CATIA V5 (.CATPart, CATProduct / up to R19)</li> <li>Parasolid (12 to 20)</li> <li>ACIS (18 to 20)</li> <li>STEP</li> <li>IGES (5.x - 6.x)</li> <li>VDA-FS</li> <li>VRML</li> <li>STL</li> <li>AutoForm (.af, .afm)</li> <li>Mesh</li> <li>3DTransVidia XML</li> </ul>
---	--

## Автоматическая диагностика и исправление

Автоматическая диагностика и исправление модели включают в себя проверку и разрешение более 70-ти наиболее типичных геометрических и топологических проблем. Исправление всегда осуществля-

ется в рамках точности модели, что обеспечивает исходную целостность представления и исключает какие-либо деформации.

Примеры проблем, решаемых в автоматическом режиме, приведены на рис. 2.

### Геометрические:

- вырожденные кривые и поверхности;
- некорректная область определения кривых и поверхностей;
- некорректная параметризация кривых и поверхностей;
- наличие самопересечений в кривых и поверхностях;
- некорректный вектор узлов в NURBS кривых и поверхностях;
- некорректный вектор CPs в NURBS кривых и поверхностях;
- некорректное задание образующих кривых;
- наличие зазоров в композитных объектах

### Топологические:

- отсутствие описания контура грани в модельном или параметрическом пространстве;
- некорректная ориентация контура грани;
- наличие зазоров в контуре грани;
- наличие самопересечений в контуре грани;
- некорректная ориентация грани в рамках оболочки/тела;
- наличие зазоров между гранями в рамках оболочки/тела;
- наличие перекрытий между гранями в рамках оболочки/тела

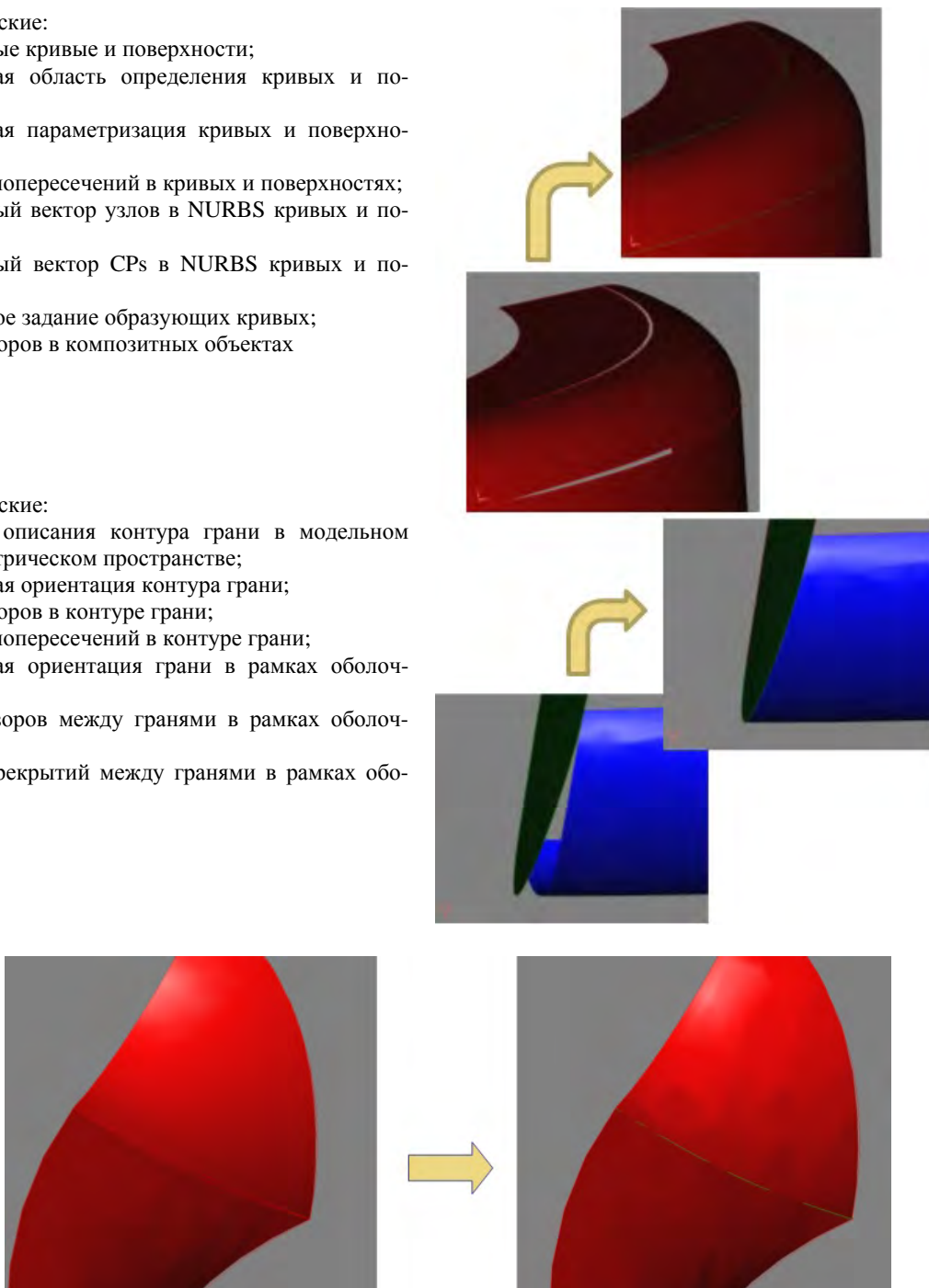


Рис. 2. Исправление перекрытий

## Редактирование геометрии в ЛОГОС.ПреПост

На текущий момент функционал по редактированию геометрии в ЛОГОС.ПреПост включает в себя несколько операций (рис. 3, 4):

- Разбиение геометрической кривой.
- Создание кривой на поверхности.
- Разрезание поверхности по геометрической кривой.
- Удаление поверхности.
- Создание поверхности.
- Разрезание фасеточной геометрии.

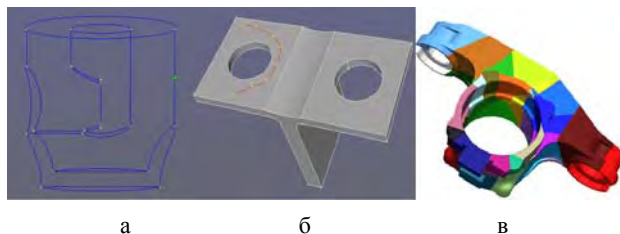


Рис. 3. Редактирование геометрии: а – разбиение кривой; б – создание кривой на поверхности; в – разрезание фасеточной геометрии

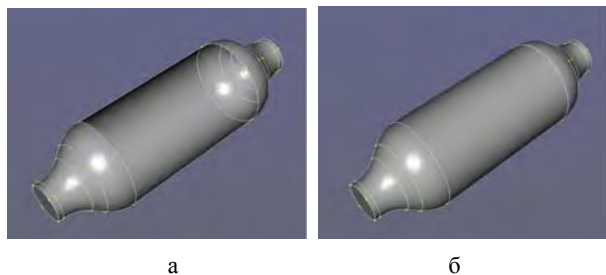


Рис. 4. Создание поверхности: а – исходная; б – создана поверхность

## Генерация сеточных моделей

Автоматическое построение расчетных сеток в произвольных двумерных и трехмерных областях является сложной математической проблемой. Для многих задач математического моделирования физических процессов требуются сетки с определенными свойствами и ограничениями, что приводит к необходимости использовать огромный набор различных подходов и методов построения сеток. Например, при построении сеток могут использоваться критерий Делоне, диаграмма Вороного, трансформация элементов, фронтальные методы, операции над двумерными шаблонами и др.

В ЛОГОС.ПреПост может проводиться построение как поверхностных (рис. 5), плоских, так и объемных сеток. Генераторы могут использовать различные метрические особенности: изотропность, анизотропность, сгущения. Сетки могут состоять из элементов различных типов. В 2D можно проводить построение триангуляционных, преимущественно

четырехугольных сеток, в 3D – тетраэдрных, преимущественно шестигранных сеток (состоящих из тетраэдров, шестигранников, призм, пирамид).

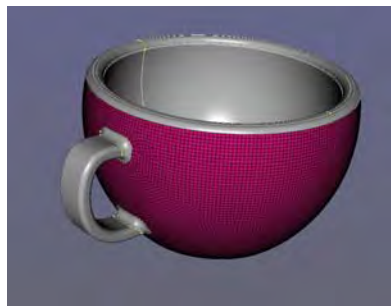


Рис. 5. Построение сетки на поверхности геометрии автоматическим генератором

## Генератор блочно-регулярных сеток

К достоинствам блочных сеток (рис. 6, 7) можно отнести высокое качество элементов, гладкость сеточных кривых. Метод легко распараллеливается. Главный недостаток – трудоемкость выделения блоков (построения блочной топологии), которое увеличивается по ходу усложнения геометрии, а иногда и вовсе неприменимо к некоторым из них. Успешность применения этого метода в большей степени зависит от профессионализма пользователя и умения его видеть блочную структуру в нетривиальных геометриях. В отличие от автоматических методов построения сеток, метод блочных сеток требует активного взаимодействия с пользователем. Поэтому для облегчения трудоемкого процесса выделения блоков необходим анализ действий и их оптимизация с использованием мыши, клавиатуры и графического интерфейса.

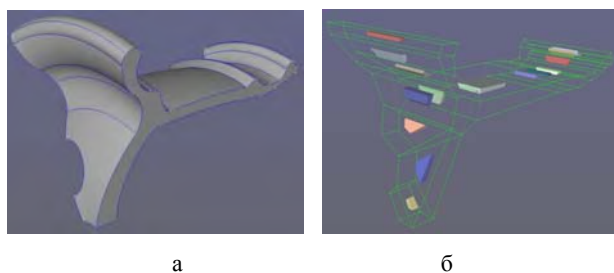


Рис. 6. Пример построения блочной сетки: а – исходная геометрия; б – блочная топология

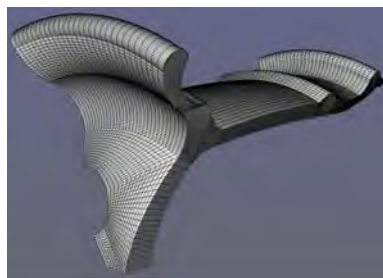


Рис. 7. Результат работы блочного генератора



## Генератор методом отсечения

В рамках ЛОГОС.ПреПост развивается метод автоматической генерации неструктурированных сеток с многогранными элементами, базирующимися на адаптивном декартовом шаблоне (рис. 8). В первую очередь данный генератор ориентирован на построение сеток для решения задач аэродинамики.

Генератор методом отсечения включает в себя следующие модули: построение регулярного шаблона с адаптивностью, преобразование регулярного шаблона в нерегулярную сетку, построение неструктурированной многогранной сетки методом отсечения, восстановление призматического слоя.

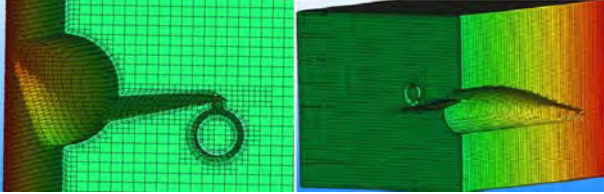


Рис. 8. Результат работы генератора методом отсечения

## Сглаживание и анализ качества сеточной модели

Неотъемлемой частью работ по разработке генераторов сеток является разработка модулей автоматической корректировки и оценки качества сеток.

Достаточно часто элементы, построенные автоматическим генератором сетки, имеют неправильную форму – с острыми углами и сильно отличающимися сторонами. В этом случае может применяться сглаживание сетки. В ЛОГОС.ПреПост реализован метод сглаживания Лапласа (рис. 9), согласно которому узлы перемещаются таким образом, что каждый внутренний узел оказывается в центре тяжести тела, образованного связанными с ним соседями. Перемещение обычно осуществляется итерационным путем. Однако в некоторых случаях метод Лапласа не работает или работает недостаточно хорошо, поэтому применяют оптимизированные методы сглаживания сеток. В данном случае проводится проверка метрик всех ячеек, включающих в себя узел, местоположение которого корректируется на предмет улучшения. По полученным данным принимается решение о возможности проведения сдвига узла.

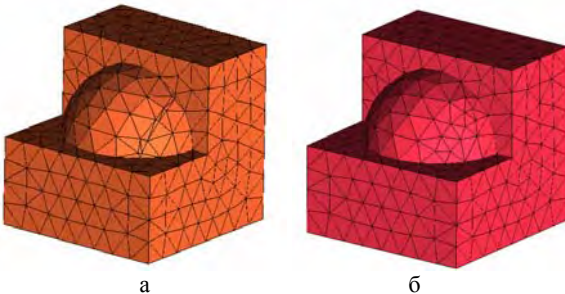


Рис. 9. Сглаживание сеток: а – исходная сетка; б – сглаженная сетка

Автоматическая оценка качества нерегулярных сеток является важным этапом обработки данных. В ЛОГОС.ПреПост реализованы следующие критерии анализа качества:

- Форма.
- Минимальный и максимальный угол между гранями, ребрами.
- Отношение сторон.
- Объем, площадь.
- Неплоские грани, асимметрия.

По итогам проведения анализа качества сеток расчетчик может выявить дефекты сетки, которые визуально незаметны, и принять решение, возможно ли проводить расчет на данной сетке, предварительно отсекая заведомо непригодные для моделирования сетки.

## Операции с сетками

Разработанный функционал построения и трансформации расчетных сеток обеспечивает довольно широкий набор операций:

- трансформацию исходной сетки на основании:
  - масштабирования;
  - зеркального отображения;
  - передвижения вдоль вектора;
  - поворота вокруг вектора на заданный угол;
  - комбинации масштабирования, передвижения вдоль вектора, поворота вокруг вектора на заданный угол;
- создание нескольких копий исходной сетки, к которым пошагово применяется одна из описанных выше трансформаций;
- объединение этих копий в одну расчетную сетку с объединением совпадающих узлов;
- построение объемной расчетной сетки методом экструзии 2D сетки с помощью комбинации линейных преобразований;
- построение объемной расчетной сетки методом экструзии 2D сетки с помощью передвижения этой сетки вдоль произвольной кривой сдвигом либо заметанием;
- возможность проверки сеток на пересечение их ячеек.

На рис. 10 показана сеточная модель, полученная путем проведения операции зеркального отображения и поворота по углу со шшивкой сетки в единую расчетную область.

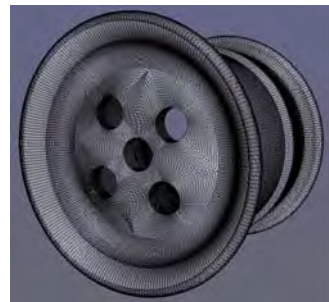


Рис. 10. Результат трансформации сетки

## Заключение

Российская промышленность играет важнейшую роль в обеспечении стабильности и экономического развития государства, прогресса в социальной сфере и укреплении политической и экономической независимости и обороноспособности страны. По статистике, на одного специалиста, работающего, например, в автомобильной промышленности, приходится 9–10 человек, обеспечивающих его материалами и комплектующими из смежных отраслей промышленности. Таким образом, необходимость развития национальной промышленности является стратегической задачей, а его уровень – критерием и мериллом развития и экономической мощи государства.

В ИТМФ ведутся работы по созданию и внедрению отечественного базового программного обеспечения для комплексного имитационного моделирования на суперЭВМ с массовым параллелизмом, предназначенного для использования на предприятиях высокотехнологичных отраслей промышленности.

В докладе описан разработанный и внедренный базовый функционал в части работы с геометрией и построения сеточных моделей в ЛОГОС.ПреПост. Дальнейшие работы будут направлены на расширение функционала по исправлению и редактированию

геометрии, усовершенствованию методов генерации и анализа качества сетки, распараллеливанию генераторов сеточных моделей.

Система эксплуатируется в режиме отчуждения от разработчиков. При этом необходимо отметить, что потенциальные пользователи Системой привыкли работать с импортными кодами, в которых внешний интерфейс отрабатывался в течение десятилетий. В связи с этим, при разработке интерфейсов в ЛОГОС.ПреПост использовались принципы, аналогичные принципам построения интерфейсов в коммерческих кодах.

## Литература

1. ПреПостПроцессор базового программного обеспечения имитационного моделирования: Доклад на совещании-семинаре предприятий Дирекции по ЯОК «Внедрение принципов виртуального моделирования испытаний и инженерных расчетов. Тенденции и направления развития на предприятиях отрасли», Саров, 2011.

2. 3DTransVidia. [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.capvidia.com/products/3dtransvidia>