

## СРЕДСТВА АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ПОДГОТОВКЕ РАСЧЕТНЫХ СЕТОК ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ В ЛОГОС-ПРЕПОСТ

*Губарев Сергей Юрьевич (SYuGubarev@vniief.ru), Логинов Дмитрий Викторович,  
Соловьёв Александр Николаевич, Кичемасов Нариман Хафизович, Самойловских Анна Юрьевна*

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

С широким использованием прикладных информационных технологий, развитием совместного, территориально распределенного создания наукоемких изделий машиностроения, их проектирование, производство и эксплуатация все более зависят от электронных данных характеризующих изделия, что обуславливает актуальность проблемы качества этих данных.

Качество данных электронной модели изделия – это степень соответствия совокупности ее свойств требованиям выполнения функции источника достоверной (легитимной) информации об изделии на всем протяжении жизненного цикла изделия при сохранении доступности информации для всех пользователей. Таким образом, речь идет о формировании актуальной электронной модели изделия, готовой к использованию в любой момент времени жизненного цикла изделия в соответствии с потребностями пользователей.

В мировой практике сформировалась отдельная ниша программных продуктов, нацеленных на решение проблем обмена геометрических данных между различными системами моделирования и качества электронных геометрических моделей.

В данной области программных продуктов существуют конкурирующие между собой аналоги программ CADfix, CADdoctor, CADbro, 3DTransVidia и т. д. Например, программный комплекс 3DTransVidia разработанный компанией «CAPVIDIA», понимает многие форматы (IGES, VDA-FS, VRML, STL, Parasolid, ACIS, Catia, Pro/E, UG и т. д.), умеет проводить диагностику на наличие ошибок и автоматическое их исправление в геометрии модели, предоставляет возможность интерактивного исправления геометрических несогласованностей. Например, имеется возможность сшивки поверхностных моделей в твердотельные и экспорта результатов во многие нативные форматы [1].

Целью данного доклада является создание дополнительных средств по анализу качества геометрических моделей в препроцессор ЛОГОС-ПРЕПОСТ для упрощения процесса получения/создания качественной геометрии.

При создании в препроцессор ЛОГОС-ПРЕПОСТ, геометрических моделей или ее импорта из других САПР-систем, происходит выделение ключевых нормативных документов и стандартов в области анализа качества геометрии, которыми руководствуются предприятия промышленности при разработке подобных систем. Вместе с тем, в процессе работы выделяются необходимый набор критериев, предъявляемых к геометрии для последующего построения расчетных сеток, используемых при анализе качества, а также рассматриваются этапы взаимодействия пользователя с интерфейсом программной библиотеки, предназначенной для анализа качества геометрических моделей. Данная библиотека была внедрена в пакет программного комплекса ЛОГОС-ПРЕПОСТ.

Ожидается, что реализованные в ЛОГОС-ПРЕПОСТ средства анализа качества позволят определять наличие потенциально проблемных мест в геометрии модели, которые могут препятствовать построению расчетных сеток высокого качества, что позволит сократить временные и экономические расходы пользователя для подготовки модели к последующим этапам работы с ней.

**Ключевые слова:** качество данных электронной модели, обмен геометрическими данными, анализ качества геометрической модели, нормативные документы и стандарты качества, причины потери качества, ядро СЗД.

# TOOLS FOR ANALYZING THE QUALITY OF GEOMETRIC MODELS USED IN THE PREPARATION OF COMPUTATIONAL MESHES FOR SOLVING ENGINEERING PROBLEMS OF STRENGTH IN LOGOS-PREPOST

*Gubarev Sergey Yuryevich (SYuGubarev@vniief.ru), Loginov Dmitry Victorovich, Soloviov Alexandr Nikolaevich, Kichemasov Nariman Khafizovich, Samoylovskih Anna Yuryevna*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

With the widespread use of applied information technologies, the development of joint, territorial distributed creation of science-intensive mechanical engineering products, their design, production and operation are increasingly dependent on electronic data characterizing products, which determines the urgency of the problem of the quality of these data.

The data quality of an electronic model of a product is the degree to which the totality of its properties meets the requirements of performing the function of a source of reliable (legitimate) information about a product throughout the entire life cycle of a product while maintaining the availability of information for all users. Thus, we are talking about the formation of an up-to-date electronic model of a product, ready for use at any time in the product life cycle in accordance with the needs of users.

In world practice, a separate niche of software products has been formed, aimed at solving the problems of the exchange of geometric data between various modeling systems and the quality of electronic geometric models.

In this area of software products, there are competing analogues of CADfix, CADdoctor, CADbro, 3DTransVidia, etc. For example, the 3DTransVidia software package developed by CAPVIDIA understands many formats (IGES, VDA-FS, VRML, STL, Parasolid, ACIS, Catia, Pro/E, UG, etc), is able to diagnose errors and automatically correct them in geometry model, provides the ability to interactively correct geometric inconsistencies. For example, it is possible to merge surface models into solids and export the results to many native formats [1].

The purpose of this report is to create additional tools for analyzing the quality of geometric models in the LOGOS-PREPOST preprocessor to simplify the process of obtaining/creating high-quality geometry.

When creating in the preprocessor LOGOS-PREPOST, geometric models or importing from other CAD systems, there is a selection of key regulatory documents and standards in the field of quality analysis geometry that guide industrial enterprises in the development of door-to-door systems. At the same time, in the process of work, the necessary set of criteria for geometry is identified for the subsequent construction of computational grids used in quality analysis, as well as the stages of user interaction with the interface of the software library designed to analyze the quality of geometric models are considered. This library was incorporated into the LOGOS-PREPOST software package.

It is expected that the quality analysis tools implemented in LOGOS-PREPOST will make it possible to determine the presence of potential problem areas in the model geometry that can impede the generation of high-quality computational grids, which will reduce the time and economic costs of the user for preparing the model for the subsequent stages of working with it.

**Key words:** the data quality of an electronic model, the exchange of geometric data, analyzing the quality of geometric models, key regulatory documents and standards, the cause of quality loss, core C3D.

## Потеря качества

Современная технология разработки изделия машиностроения в электронно-цифровой среде подразумевает интенсивный обмен, в частности, геометрическими данными (трансляцию CAD-модели) [1].

Основной документооборот происходит на этапе активной разработки проекта:

- CAD→CAD – создание сборок на основе моделей смежников;

- CAD→CAE – проведение расчетов на прочность, гидродинамику и прочее инструментами математического моделирования;

- CAD→CAM – моделирование технологических операций и процессов;

- CAD→LOTAR – хранение детали в системе долговременного архивирования на всем протяжении жизненного цикла изделия.

При передаче геометрических моделей между CAD-системами может происходить потеря качества моделей:

- потеря твердотельного представления в следствии деформации поверхностей или их удаления;
- сохранение твердотельного представления с наличием деформации поверхностей и удалением части элементов.

Проблема организации взаимодействия между различными САПР, особенно основанными на разных геометрических ядрах, заключается в невозможности обеспечить прямой экспорт данных из одной системы в другую, либо в некорректной передаче данных. Потеря качества модели может происходить даже в случае передачи геометрической модели между различными поколениями одной и той же CAD-системы, такая проблема имела место, например, при переходе с CATIA V4 к CATIA V5 [2].

### **Причины проблем качества при обмене геометрическими данными**

Причины появления ошибок в цифровых моделях различны, их классификация приведена ниже:

#### *1. Разная концепция представления геометрической точности*

Старые системы моделирования характеризуются относительным методом определения точности представления геометрии и топологии. Величина точности зависит от габаритов всей детали или от текущего размера элемента детали. Это приводит к изменению точности модели, от случая к случаю, а также потере твердотельного представления (с образованием зазоров между кромками соседних поверхностей) при чтении подобных моделей в современных CAD-системах, построенных на абсолютной точности представления линейных размеров, независимо от габарита изделия. Аналогичная ситуация возникает и на уровне топологии геометрической модели, что приводит к изменению облика (формы) детали.

#### *2. Различные концепции внутреннего представления многосложных тел – единое представление и раздельное представление*

В случае единого представления тело сложной формы представляется как единый объем пространства, ограниченный поверхностями, обрезанными друг по другу, с использованием топологии. В случае раздельного представления модели тело состоит из нескольких тел, стыкующийся друг с другом по соседним граням.

#### *3. Некорректная реализация алгоритмов трансляции CAD-форматов*

Среди наиболее распространенных проблем трансляции данных выделяют неточное совпадение границ поверхностей, неправильное направление векторов нормалей, дублирование или, наоборот, частичная потеря поверхностей, а также большое количество невоображаемых вспомогательных линий и необрезанных поверхностей. Чем сложнее

геометрия модели, тем больше сбоев может возникнуть при попытке ее импорта.

Такая некорректность возникает из-за неполной поддержки нейтральных форматов или вследствие закрытости «родных» форматов CAD-систем. Далее, рассмотрим некоторые форматы, встречающиеся при работе в CAD-системах:

- IGES – международный формат, предназначенный для хранения геометрии в большей степени поверхностей, расшифровывающийся Initial Graphics Exchange Specification, принятый Американским Национальным институтом стандартов (American National Standards Institute –ANSI). Разрабатывался для крупных промышленных предприятий;

- DXF, DWG – формат активно используется в программных продуктах AutoCAD, который становится стандартом благодаря популярности AutoCAD;

- ISO 10303 STEP – это международный формат, задающий полную модель изделия, способы реализации обмена данными и независимый от программно-аппаратной платформы. STEP стандарт для обмена данными об изделии, разработан для реализации идеологии CALS (англ. Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла изделий);

- SAT – формат, принадлежащий компании «Dassault», который используется для обмена между основанными на ACIS продуктами. Файлы в этом формате больше по размерам, имеют проблемы при работе с большими сборками;

- AGS – формат является цифровым форматом обмена данными для геотехнических сообществ, состоящее из словаря данных, правил и файлового формата [3];

- HSF – открытый формат, базирующийся на XML. Компактный формат обмена визуальной 3D-информацией между различными инженерными приложениями;

- x\_t – общий формат обеспечивающий единство данных между внутренними приложениями и коммерческими системами компании Siemens PLM Software. Концепция обмена данными известна как «Parasolid Pipeline» и означает обмен твердотельными моделями Parasolid [4], сохраненными в открытом файловом формате.

Выше перечисленные форматы являются стандартами, но не требуют обязательного использования всего заложенного в них функционала и допускают частичную или двоякую (неоднозначную) интерпретацию данных, а, следовательно, частичную реализацию в программных кодах. Если добавить к этому существование различных версий данных форматов, то в итоге мы можем получить некачественный результат при передаче CAD-модели с атрибутами через форматы [3].

#### *4. Нерегламентированные правила построения CAD-модели*

Подобные правила могут применяться пользователем и могут вносить системные ошибки в геометрию и топологию CAD-модели, мигрирующие

с этой CAD-моделью от формата к формату. Это наиболее существенный и часто встречающийся тип ошибок, которые зачастую можно эффективно исправить только путем перестроения исходной CAD-модели.

#### 5. Разная алгебраическая точность в реализации математических функций

В данном пункте рассматривается проблема реализации математических функций с разной алгебраической точностью при применении полиномов различных степеней при описании NURBS кривой, а также разное количество используемых контрольных точек в поверхностях любых типов. Вследствие избыточного количества контрольных узлов поверхностей увеличиваются накладные расходы в виде размера файла, объема памяти, арифметических затрат при работе с моделью, а в итоге – временные затраты. Отсутствие поддержки высоких значений степеней полиномов приводит к отсутствию поддержки работы с производными высоких порядков и к последующему разбиению исходной единой поверхности на множество малых в процессе трансляции. В дальнейшем отрицательным образом это может сказываться, например, на работе с подобными поверхностями в САМ-приложениях. Слишком частая сегментация поверхности приводит к избыточному изменению направления движения инструмента при его обработке, что в дальнейшем может отразиться на качестве обрабатываемой поверхности в худшую сторону, а также к увеличению времени необходимого для завершения обработки поверхности.

Встречающиеся на практике комбинации различных причин появления ошибок приводят к изменению в описании геометрических моделях, а в конечном счете – к браку на производстве, временным и финансовым потерям.

### Стандарты качества

Уменьшить количество проблемных при обработке геометрических данных можно за счет введения процесса верификации CAD-модели на соответ-

ствии стандарту качества геометрии: вводятся ограничения на характеристики геометрических элементов CAD-модели, получаемых при ее построении. Совокупность ограничений оформляется как стандарт качества геометрии (отрасли, компании, подразделения). В различных областях промышленности уже разработаны и внедрены стандарты обеспечения качества геометрии, позволяющие избежать появления проблем при дальнейшем применении CAD-модели. Критерии качества могут быть настроены в соответствии с внутренними требованиями компании для обеспечения выполнения производственного процесса и процесса математического моделирования.

1. AIAG D-15 – Automotive Industry Action Group.

2. VDA 4955 – Verband der Automobilindustrie e.V. [5].

3. JAMA – Japanese Automotive Recommendations [6].

4. PSA – French Automotive Group.

5. RENAULT – Renault Automotive Group.

6. SASIG – Strategic Automotive Standards Industry Group [8].

7. MIL-STD-31000A – United States Military Standard [7].

Эти рекомендации определяют качество 3D-модели. Топология и геометрия модели проверяется в соответствии с этими стандартами. Все выше перечисленные стандарты предназначены для автомобильной промышленности.

Для данной работы будут использоваться требования стандарта SASIG [8], поскольку этот стандарт является наиболее распространенным в автомобильной промышленности и является обобщением автомобильных стандартов. Из выше перечисленных форматов требования, предъявляемые к форматам, в открытом доступе имеются только у стандарта SASIG. В таблице показаны некоторые требования этого стандарта.

Помимо этих критериев, данный стандарт содержит ряд других требований к геометрии.

Требования стандарта SASIG

№	Критерий	Требование стандарта
1.	Высокая степень поверхности	< 9
2.	Маленькая грань	> 0,1 mm <sup>2</sup>
3.	Короткое ребро	> 0,1 mm
4.	Маленькая поверхность	> 0,1 mm <sup>2</sup>
5.	Разрыв между ребер в цикле	< 0,02 mm

## Реализация средств анализа качества геометрий

### *Подход к решению задачи в ЛОГОС-ПРЕПОСТ*

Для получения результатов в реализации средств анализа качества геометрических моделей в ЛОГОС-ПРЕПОСТ, необходимо произвести декомпозицию задачи. Даная работа разбивается на следующие этапы:

- реализация базовых алгоритмов по конкретным критериям для конкретных составных элементов геометрии в модели;
- создание менеджера, позволяющего взаимодействовать с динамической библиотекой по анализу, геометрическим ядром, и с уже разработанным интерфейсом, используемым в ЛОГОС-ПРЕПОСТ;
- создание будущего интерфейса и сценария взаимодействия с ним пользователя;
- тестирование реализованных средств в ЛОГОС-ПРЕПОСТ на моделях различной сложности.

### *Геометрическое ядро в ЛОГОС-ПРЕПОСТ*

В ЛОГОС-ПРЕПОСТ для решения прочностных задач используется в качестве геометрического ядра библиотека C3D [9], следовательно, и требования к разрабатываемой библиотеке составлялись в соответствии с функциональными возможностями используемого ядра.

C3D представляет собой программный продукт, включающий в себя геометрическое ядро C3D Modeler, параметрическое ядро C3D Solver, конвертер C3D Converter и визуализатор C3D Vision.

Геометрическое ядро C3D Modeler выполняет построение геометрических моделей, редактирование моделей путем изменения ее внутренних данных, построение триангуляции, вычисление инерционных характеристик моделей, построение плоских проекций модели, определение столкновений элементов модели. Геометрическое ядро C3D Modeler строит геометрическую модель, которая содержит описание формы моделируемого объекта, описание связей элементов геометрической модели, историю построения модели, атрибуты элементов геометрической модели.

Параметрическое ядро C3D Solver обеспечивает взаимосвязь элементов геометрической модели, что позволяет редактировать модель, синхронно изменяя ее элементы, строить подобные модели, моделировать механизмы.

Конвертер C3D Converter выполняет обмен данными геометрической модели с другими системами. Визуализатор C3D Vision обеспечивает визуализацию геометрической модели. Наличие в одном программном продукте геометрического ядра, параметрического ядра и конвертера является одной из отличительной особенностью C3D.

Использование геометрического ядра C3D позволяет расширить функционал своего продукта, не за-

нимаясь решением задач геометрического моделирования, а работая над прикладными задачами приложения. Вторым важным моментом – снижение затрат на разработку продукта, поскольку математические алгоритмы являются наиболее сложной и трудоемкой частью систем автоматизированного проектирования.

### *Реализация библиотеки алгоритмов анализа качества*

Динамическая библиотека функций AnalysisNN, состоящая из описанных на языке C++ критериев по анализу качества геометрии и менеджера, получающего на вход все необходимые данные в виде геометрической модели и параметров для запуска алгоритмов, а также возвращает результаты после окончания анализа геометрии в менеджер. Разрабатывалась данная библиотека специалистами ННГУ им. Лобачевского, с учетом используемого геометрического ядра C3D в ЛОГОС-ПРЕПОСТ.

### *Реализация интерфейса пользователя*

Для реализации интерфейсной части необходимо представлять конечный сценарий взаимодействия пользователя с разрабатываемым средством анализа качества геометрии. Заранее нужно позаботиться о том, как и какие входные данные и параметры будут передаваться в динамическую библиотеку, а затем как представлять выходные результаты пользователю, для этого выделим в хронологической последовательности основные этапы взаимодействия пользователя с интерфейсной частью программы, рис. 1:

- создание или получение геометрических моделей в ЛОГОС-ПРЕПОСТ;
- открытие в окне «Панель управления» вкладки «Диагностика»;
- установка в дереве анализа, критериев или категорий и их пограничных значение (там, где это требуется);
- передача набора критериев, параметров и самой модели в библиотеку AnalysisNN, с последующим запуском анализа качества геометрии;
- получение результатов после исследования геометрии;
- отображение результатов в дереве анализа качества по каждому из критериев с выводом внутренних потенциально проблемных элементов в геометрии с их идентификаторами;
- возможность увеличения проблемных элементов и их выделение на модели;
- возможность сохранения набора критериев с их параметрами, с целью повторного использования на других геометрических моделях/проектах.

Черта на рис. 1 отображает момент обращения к динамической библиотеке AnalysisNN и получение результатов анализа геометрии обратно.



Рис. 1. Схема работы со средствами анализа качества геометрии

После описания схемы работы пользователя с разработанными средствами анализа, становится возможным переход к интеграции библиотеки в пакет программ ЛОГОС-ПРЕПОСТ, с целью использования разработанных функциональных возможностей по исправлению недочетов в геометрических моделях, для последующих построений расчетных сеток на правильной геометрии моделей.

### Реализация средств анализа качества геометрии в интерфейсной части

После того как предыдущий этап был завершен, а требования были определены для дальнейшего внедрения, данная библиотека была предоставлена нам специалистами из ННГУ для интеграции в пакет программ ЛОГОС-ПРЕПОСТ.

По итогу предъявляемых требований к библиотеке AnalysisNN было выделено 65 критериев анализа качества геометрии, разделенных на 7 категорий, используемых при создании геометрии в ЛОГОС-ПРЕПОСТ. Вся строящаяся или импортированная объемная геометрическая модель с использованием ядра C3D состоит из таких элементов, как: кривые, поверхности, ребра, грани, контуры, оболочки, твердые тела, топологии. Следовательно, и все критерии были разбиты в группы по этим самым категориям.

На рис. 2 показан пример отображения критериев, а также изображено дерево проблем, разбитых по категориям. После получения геометрии запускаем данный инструмент с панели «Инструментов» и в окне «Панели управления» появляется вкладка «Диагностика», относящаяся к этому проекту. Также имеется возможность задания параметров или пороговых значений для некоторых критериев, в которых они необходимы, либо их задание по умолчанию, и после этого происходит запуск анализа качества геометрии по заданным критериям.

Так же, в процессе работы, заданные параметры для критериев и сам набор критериев могут быть использованы пользователем повторно на других анализируемых моделях. С целью удобства использования разрабатываемых средств анализа качества, была реализована возможность сохранения этих критериев и их значений в файл формата XML с воз-

можностью последующей загрузки в новый проект. XML широко используется для решения подобного рода задач. Кроме того, стоит отметить, что имеется возможность сброса заданного ранее набора критериев к значению по умолчанию.

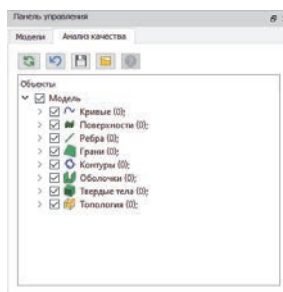


Рис. 2. Дерево анализа качества во вкладке «Анализ качества»

После редактирования геометрии необходимо производить обновление результатов, для этого был реализован механизм отслеживания подобных изменений. Соответствующее сообщение выводится пользователю в дерево анализа, после редактирования или загрузки новой геометрии.

На сложных моделях проблемная область может представлять маленькую точку относительно всей геометрии, и инженеру приходится тратить время на поиск этого элемента. Для удобства отображения найденных потенциальных проблемных мест (элементов) была реализована «подсветка», с возможностью увеличения этих самых мест в модели при выборе соответствующего элемента в дереве анализа геометрии, чтобы пользователь смог оценить проблему и найти пути ее устранения. Для выделения проблемных мест использовались функциональные возможности библиотеки VTK, которая уже используется при разработке ЛОГОС-ПРЕПОСТ.

Visualization Toolkit (VTK) – это кросс-платформенная программная библиотека с открытыми исходными кодами, предназначенная для работы с 3D-графикой, обработки изображений и визуализации. VTK поддерживает вызов функций на языке C++. Из VTK в ЛОГОС-ПРЕПОСТ используется механизмы: сеточной генерации, визуализатор объектов, а также структуры хранения данных [10].

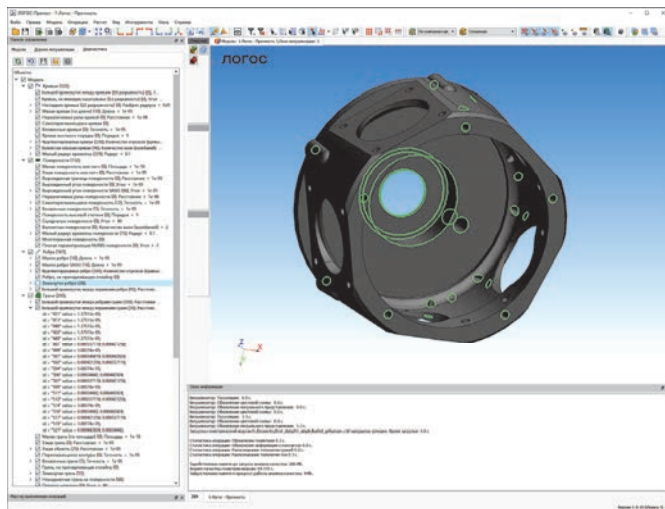


Рис.3. Обработка и отображение результатов библиотеки анализа качества

На рис. 3 продемонстрировано главное рабочее окно и интерфейс реализуемых средств анализа качества геометрии в ЛОГОС-ПРЕПОСТ. Также с целью проведения тестирования работоспособности новых функциональных возможностей для удобства разработчиков, была добавлена возможность замера времени работы алгоритмов анализа и общий расход по оперативной памяти с выводом информации в «Окно информации».

Реализованные средства анализа качества были протестированы на моделях с различной степенью сложности. После того, как исходная геометрия проверена на наличие потенциальных проблемных мест, пользователь может приступить к следующему этапу работы с моделью.

### Заключение

В ходе выполнения работ по реализации средств анализа качества были рассмотрены причины проблем при создании САД моделей, связанных с геометрией в различных САД системах и возникающие проблемы при их переносе из одной программной среды в другой. Так же проведен обзор мировых стандартов качества геометрических моделей, используемых в уже существующих программных продуктах зарубежного и отечественного происхождения. Исследованы основные причины потери качества геометрической модели, скорректирован необходимый набор критериев для анализа геометрических моделей, набор критериев был разбит на 7 подкатегорий, выделены основные этапы взаимодействия пользователя с разработанными средствами анализа качества, описаны основные функциональные возможности разработанного инструмента и проведены тесты на моделях разной сложности с целью оценки корректности и удобства использования.

В качестве дальнейших направлений развития планируется расширенное тестирование разработанных средств анализа качества в ЛОГОС-ПРЕПОСТ. Кроме этого, планируется создание тестовой базы с тестированием в автоматическом режиме реализо-

ванных функциональных возможностей. Усовершенствование эргономики в интерфейсной части анализа качества геометрии, оптимизация скорости работы разработанных средств и дальнейшее их развитие в сторону автоматизированных средств разработки проектирования.

### Список литературы

1. «Обмен данными между САД» [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://helpiks.org> (дата обращения: 19.01.2020).
2. «ТЕСИС» Обеспечение качества геометрии в промышленности [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://tesis.com.ru> (дата обращения: 04.02.2020).
3. «Геотехнические данные в открытых форматах обмена» [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://istknowledge.wordpress.com> (дата обращения: 06.02.2020).
4. «Parasolid» [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://ru.wikipedia.org/wiki/Parasolid> (дата обращения: 04.02.2020).
5. «VDA-4955», Verband der Automobilindustrie, 2010.
6. «JAMA PDQ», Japan Automobile Manufacturers Association, 2010.
7. «MIL-STD-31000A» [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://quicksearch.dla.mil> (дата обращения: 12.02.2020).
8. «Product Data Quality Guidelines for the Global Automotive Industry», Strategic Automotive product data Standards Industry Group, 2005 (дата обращения: 12.02.2020).
9. Руководство разработчика C3D, C3D Labs, 2017 (дата обращения: 12.02.2020).
10. «Visualization Toolkit (VTK)» [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://vtk.org> (дата обращения: 20.02.2020).