

На правах рукописи

Громов Евгений Геннадьевич

**МЕТОДЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ И ТИПИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ
СИСТЕМ СМАЗКИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ УЗЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

**Специальность 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (информационные
технологии и промышленность)**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Волгоград – 2020

Работа выполнена на кафедре «Высшая математика» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

Научный руководитель

доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Горбцов Александр Сергеевич.

Официальные оппоненты:

Русанов Олег Александрович,
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «Московский политехнический
университет», кафедра «Динамика, прочность
машин и сопротивление материалов», профессор;

Клячин Владимир Александрович,
доктор физико-математических наук,
доцент, ФГАОУ ВО «Волгоградский
государственный университет», заведующий
кафедрой компьютерных наук и экспериментальной
математики

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт проблем точной
механики и управления» Российской академии
наук.

Защита состоится « » 2020 г. в часов на заседании диссертационного
совета Д 212.028.08, созданного на базе Волгоградского государственного технического
университета, по адресу: 400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского государственного
технического университета и на сайте www.vstu.ru по ссылке
<http://www.vstu.ru/nauka/dissertatsionnye-sovety/>.

Автореферат разослан « »

2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

доктор технических наук



Орлова Юлия Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в мировой практике наблюдается все большее использование компьютеров практически во всех областях человеческой деятельности. Но по-прежнему, важной областью применения компьютеров является их использование для проектирования узлов и агрегатов машин. Проектная процедура включает в себя этап изготовления опытного образца и проведение предварительных испытаний, который зачастую является наиболее затратным с точки зрения временных и финансовых ресурсов. Использование вычислительной техники на данном этапе позволяет заменить часть натурных испытаний численным экспериментом, что резко сокращает время разработки изделия.

В настоящее время для проведения расчетов наибольшее распространение получили методы, использующие дискретные модели исследуемых объектов. Применение сеточных методов при решении инженерных задач и при проведении научных исследований зачастую базируется на численном интегрировании нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных в трехмерных областях. При уменьшении шага сетки, что требуется для точного представления геометрии, значительно увеличивается размерность уравнений численных методов, что ведет к увеличению затрат вычислительных ресурсов. На практике генерация трехмерной дискретной модели является фундаментальной геометрической проблемой в применении таких методов.

Расчет циркуляции смазывающей жидкости в различных узлах машин, использующий в своей работе сеточные методы, является актуальной задачей, поскольку позволяет значительно снизить затраты на экспериментальную доводку таких узлов.

Существующие методы генерации дискретной модели не предполагают разбиение внутренних областей сборки, по которым циркулирует смазка. Используемые в настоящее время методы расчета, основанные на использовании точных уравнений гидродинамики, требуют значительных вычислительных ресурсов и применимы к конструкциям с относительно небольшим количеством подвижных деталей, так как требуют ресурсоемкого численного решения дифференциального уравнения Навье-Стокса. Усложнение расчетной схемы при использовании таких методов приводит к значительному росту необходимых вычислительных ресурсов, что ведет к росту затрат на разработку изделия и затруднениям при расчете сложных сборок с большим количеством деталей. Следовательно, исходя из выше изложенного, можно сделать вывод об актуальности данной работы, направленной на сокращение издержек при производстве узлов и деталей машин.

Степень разработанности темы. Расчет циркуляции смазывающей жидкости изучался в работах Martin Webster, Yukio Hori, Вержбицкого А. Н., Валеева Д. Х. и др. В этих работах рассматривались общие принципы работы систем смазки, расчет циркуляции смазывающей жидкости основывался на численном интегрировании уравнений Навье-Стокса.

Генерация сеточных моделей изучалась в работах Herbert Edelsbrunner, Pascal Jean Frey, Paul-Louis George, Joe F. Thompson, Sam S. Y. Wang и др. Из отечественных исследователей проблемы генерации сеточных моделей изучали А. Н. Лабусов, Д. Ю. Погорелов, И. В. Нестеров, С. М. Алейников и др.

Однако генерация сеточных моделей рассматривалась в контексте разбиения отдельных геометрических моделей. В контексте генерации сеточных моделей для сборок и последующего их использования для инженерного анализа дискретизация моделей сборок

рассматривалась в работах Д. С. Куликова, С. Е. Сляднева, Brett W. Clark, Yongjie Jessica Zhang, Klas Jareteg и др. В их работах рассматривалась дискретизация заданной CAD-геометрии сборок. Рассмотрение проблемы построения сеток для внутренних объемов сборочных моделей, как это требуется в некоторых расчетных задачах, например, вычисление циркуляции смазывающей жидкости, не производилось.

Цель работы. Снижение затрат на доработку изделия при помощи моделирования циркуляции смазки в изделии, а также сокращение времени разработки машиностроительных изделий за счет повышения эффективности использования системами автоматизированного проектирования вычислительных ресурсов при построении ортогональных сеточных моделей.

Задачи исследования.

- 1) Определение структуры процесса автоматизированного проектирования систем смазки узлов и агрегатов машин (с использованием метода Монте-Карло и метода крупных частиц).
- 2) Анализ существующих методов генерации ортогональных сеток и разработка методов генерации ортогональных сеток внутренних объемов геометрических моделей сборок машиностроительных узлов с большим количеством деталей.
- 3) Разработка программной системы генерации ортогональных сеток внутренних объемов геометрических моделей сборок, использующей стандартные форматы представления 3D геометрических моделей.
- 4) Создание системы визуализации характеристик движения потока частиц внутри объема произвольной формы.
- 5) Тестирование результатов работы программных систем на тестовых примерах и моделях реальных машиностроительных изделий (расчет смазки в редукторе ведущего моста грузового автомобиля).

Объект исследования. Процесс генерации сеточных моделей CAD- геометрии в форме сборок. Процесс расчета параметров омывания поверхностей деталей смазывающей жидкостью в машиностроительных изделиях.

Предмет исследования. Методы, модели и алгоритмы генерации сеточных моделей большой размерности для CAD-геометрии в форме сборок. Методы и алгоритмы расчета и визуализации параметров циркулирования смазки в сборочных моделях агрегатов машин.

Научная новизна.

- 1) Метод генерации ортогональных гексаэдральных сеток по твердотельной CAD-геометрии, отличающийся повышенной точностью элементов сетки на граничных поверхностях за счет использования данных о направлениях нормалей этих поверхностей, что позволяет увеличить шаг сетки (п.п. 1, 3).
- 2) Метод построения сеток свободных внутренних объемов машиностроительных узлов по сборочной CAD геометрии, учитывающий произвольное количество деталей узла, на основе предложенных ортогональных гексаэдральных сеток, которые за счет сохранения точности при больших шагах сетки, по сравнению с существующими адаптивными сетками, обеспечивают построение сеточных моделей увеличенных геометрических размеров и инвариантных к особенностям граничных поверхностей (п.п. 1, 3).
- 3) Новая типовая процедура проектирования систем смазки машиностроительных узлов на основе автоматической генерации ортогональных гексаэдральных сеток

свободных внутренних объемов их сборочной CAD геометрии, отличающаяся введением этапа виртуальных испытаний на математической модели (п.п. 1).

- 4) Метод расчета статистических параметров омывания смазывающей жидкостью поверхностей свободных внутренних объемов машиностроительных узлов на ортогональной сетке, отличающийся интеграцией метода крупных частиц и метода Монте-Карло, который в отличие от использования уравнений гидродинамики дает значительное, на два — три порядка, сокращение вычислительных затрат (п.п. 1, 3).

Теоретическая значимость работы. Новым является использование ортогональных сеточных моделей с учетом направлений нормалей на граничных поверхностях, метода Монте-Карло и метода крупных частиц при расчете движения смазывающей жидкости. Метод генерации сеточных моделей большой размерности впервые применен для создания дискретных моделей свободных внутренних объемов CAD сборок.

Практическая значимость работы. На базе сеток разработаны алгоритмы расчета циркуляции смазывающей жидкости, учитывающие нормали на границах и использующие метод крупных частиц и метод Монте-Карло. Разработанные методы генерации сеток и визуализации использованы в мультифизических моделях теплопереноса, напряженно-деформированного состояния и динамики системы тел. Разработанные алгоритмы программно реализованы и интегрированы в систему моделирования динамики связанных систем тел ФРУНД. Выполненные разработки могут использоваться как для расчетов в процессе проектирования машиностроительных узлов, так и в учебном процессе.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы вычислительной математики, линейной алгебры, методы объектно-ориентированного программирования, методы компьютерной графики, методы проектирования сложных систем и методы механики, в частности пространственного движения материальной точки.

Положения, выносимые на защиту.

- 1) Методы создания ортогональных гексаэдральных сеток CAD-геометрии сборок машиностроительных узлов, учитывающие точное направление нормалей к граничным элементам, что позволяет генерировать сеточные модели для свободных внутренних объемов.
- 2) Метод расчета движения смазывающей жидкости в ортогональных сеточных моделях с использованием метода крупных частиц и метода Монте-Карло, что позволяет выполнить инженерный анализ проектируемой системы смазки и сокращает вычислительные затраты по сравнению с методами, основанными на использовании уравнений гидродинамики.
- 3) Алгоритмы и программные модули визуализации параметров движения потока частиц в объеме произвольной формы, что позволяет снизить время анализа проектных решений по системе смазки.
- 4) Методики использования предложенных методов визуализации динамических процессов на сеточных моделях при решении физически разнородных задач в рамках моделирования динамики систем связанных тел, что позволяет производить сложные междисциплинарные расчеты проектируемых изделий.
- 5) Программная система, реализующая методы генерации предложенных ортогональных гексаэдральных сеток свободных внутренних объемов, что позволяет доказать корректность и эффективность работы разработанных алгоритмов.

Достоверность результатов. Достоверность подтверждается теоретическим обоснованием использованных и предлагаемых подходов к разбиению САД-геометрии и расчету течения смазывающей жидкости, корректностью применения математического аппарата, соответствием полученной сеточной модели исходной САД-геометрии, соответствием результатов моделирования циркуляции смазки экспериментальным данным.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях по информационным технологиям:

- Школа-практикум молодых ученых и специалистов «Технологии высокопроизводительных вычислений и компьютерного моделирования» в рамках VII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, апрель, 2010 г.;
- The 1st Joint International Conference on Multibody System Dynamics, Lappeenranta, Finland, май, 2010 г.;
- Международная научная конференция «Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности» АСТИНТЕХ – 2010, Астрахань, Астраханский государственный университет, май, 2010 г.;
- XII Всероссийская школа-конференция молодых учёных, Волгоград, Волгоградский государственный университет, сентябрь 2015 г.;
- XI всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, Казанский (Приволжский) федеральный университет, август 2015 г.
- Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» – 2019, Сочи, март 2019 г.

Полученные результаты нашли применение в научно-исследовательских работах кафедры «Высшая математика» по темам № 34/616-13 «Расчетное и экспериментальное исследование систем смазки привода ведущих колес транспортных средств с независимой подвеской», № 34/270-10 «Разработка алгоритмов автоматического управления демпфированием подвески и динамического изменения клиренса по анализу условий движения автомобиля», № 4416/17/70-14 «Разработка и идентификация виртуальной модели автомобиля КАМАЗ 6560».

Имеется 1 акт внедрения результатов диссертационной работы в процесс проектирования и совершенствования параметров элементов приводов колес для автомобилей различного назначения, выданный ООО «ОКБ АНТ».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 4 публикации в изданиях из перечня ведущих научных журналов ВАК и 1 работа в зарубежных изданиях, индексируемых в базе научного цитирования Scopus. Имеется 3 авторских свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие паспорту научной специальности. Область диссертационного исследования соответствует паспорту специальности 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования (информационные технологии и промышленность)», в частности пункту 1 – «Методология автоматизированного проектирования в технике, включая постановку, формализацию и типизацию проектных процедур и процессов проектирования, вопросы выбора методов и средств для применения в САПР», пункту 3 – «Разработка научных основ построения средств САПР, разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для

синтеза и анализа проектных решений, включая конструкторские и технологические решения в САПР и АСТПП».

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 158 наименований, приложений. Работа содержит 147 страниц машинописного текста, включающего, 92 рисунка, 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель, определены задачи, научная новизна, практическая ценность работы и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** определяется объект проектирования, рассматриваются его характеристики, проводится анализ способов расчета циркуляции смазывающей жидкости в машиностроительных изделиях, исследуются существующие подходы к построению дискретных моделей узлов и деталей машин с использованием их CAD-геометрии, изучаются способы визуализации результатов расчетов на дискретных моделях.

В настоящее время (например, согласно ГОСТ РВ 15.203-401) основными этапами опытно-конструкторских работ являются:

- 1) разработка эскизного проекта;
- 2) разработка технического проекта;
- 3) разработка рабочей конструкторской документации для изготовления опытного образца изделия;
- 4) изготовление опытного образца изделия и проведение предварительных испытаний;
- 5) проведение государственных испытаний опытного образца изделия;
- 6) утверждение рабочей конструкторской документации для организации промышленного производства изделий.

Применение вычислительной техники на этапе 4 позволяет заменить часть натурных испытаний численным экспериментом, что резко сокращает время разработки изделия. В работе рассматриваются методы использования CAD-геометрии для моделирования циркуляции смазывающей жидкости в машиностроительных узлах и агрегатах.

Для решения задачи циркуляции смазывающей жидкости используются методы расчета, основанные на использовании точных уравнений гидродинамики. Они требуют значительных вычислительных ресурсов и применимы к конструкциям с относительно небольшим количеством подвижных деталей. Исследование распределения смазывающей жидкости в рабочей области узлов машин выполняется в рамках модели течения несжимаемой жидкости под действием вращающихся элементов конструкции в поле тяжести, требующей ресурсоемкого численного решения дифференциального уравнения Навье-Стокса, что не позволяет использовать данную схему для областей со сложной геометрией ввиду значительного роста требований к необходимым вычислительным ресурсам.

Решение задачи определения параметров циркуляции смазывающей жидкости предполагает использование дискретных моделей для рабочей области.

Дискретная (сеточная) модель является совокупностью узлов и элементов, натягиваемой на геометрическую модель. Геометрическая модель представляет собой каркас для дискретной сетки. После генерации сеточной модели надобность в исходной геометрии для

проведения расчетов отпадает. Процесс создания сеточной модели в общем случае происходит в несколько этапов:

- 1) передача данных о геометрии CAD-модели;
- 2) задание свойств материала, из которых изготовлено машиностроительное изделие;
- 3) разбиение геометрии на дискретные элементы;
- 4) генерация связей между соседними дискретными элементами на основании свойств материала;
- 5) дополнение модели нагрузками.

В результате анализа основных способов генерации сетки, были выявлены следующие их типы: экструзия, построение упорядоченных сеток, адаптивное построение. Экструзия – способ построения трехмерной модели сетки путем перемещения и сдвига основания в определенном направлении или путем вращения поперечного сечения вокруг заданной оси. При использовании этого способа становится возможным создание дискретной модели без расчетной модели машиностроительного изделия. Генерация упорядоченной сетки в основном происходит при помощи метода Pavior, генерирующего сетку из четырехугольников, и метода Delaunay-Voronoi, использующего триангуляцию Делоне для построения сеточной модели. Адаптивное построение сетки состоит в том, что после создания расчетной модели и задания граничных условий генерируется сетка с последующим анализом и оценкой ошибки дискретизации сетки, а также изменением размера сетки. Процесс протекает до тех пор, пока значение погрешности не станет меньше заданного, или число итераций не достигнет допустимого значения.

Построение сеточных моделей для CAD-геометрии в форме сборок производится путем разделения сборки на отдельные геометрические модели и последующей генерации сетки для каждой модели, что не позволяет получить сопряжения узел-узел для всех сеток сборки. Генерация сеток для внутренних объемов происходит из геометрической модели, получаемой путем вычитания из геометрии ограничивающего параллелограмма исходной геометрической модели, что ведет к избыточности получаемой модели.

На основании проведенного анализа сформулированы цели и поставлены задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** описан процесс создания метода и алгоритмов построения сеточной модели большой размерности на основе CAD-геометрии в форме сборок, создания дискретных моделей внутренних областей, проведения операции вычитания над сетками с объединением граничных поверхностей, рассмотрены способы повышения эффективности использования ресурсов ЭВМ при генерации дискретных моделей.

Существует достаточно широкий класс задач, для решения которых необходимо использовать сеточные модели внутренних полостей агрегатов машин, а также сетки для деталей узлов. Для таких задач целесообразно использовать CAD геометрию в форме сборок. Создаваемый метод должен быть инвариантным к форме модели, то есть должна производиться дискретизация моделей с геометрией произвольной формы с учетом всех технологических отверстий и полостей внутри фигуры. Кроме того, сетка должна быть объемной – дискретизировать внутреннюю структуру модели, а не только натягиваться на поверхность.

Разработанный метод учитывает поставленные требования и обладает следующими характеристиками:

- использование составной CAD-геометрии произвольной формы;

- генерация ортогональной дискретной модели произвольной размерности для исходной модели и внутренних объемов, возможность вычитания сеток с целью получения новой дискретной модели из уже существующих;
- низкие требования к ресурсам ЭВМ.

Ортогональная кубическая решетка выбрана для уменьшения требований к вычислительным ресурсам, а также для повышения точности расчетов. Расчет нерегулярных сеточных моделей требует больших вычислительных ресурсов, так как в процессе решения необходимо проводить ресурсоемкие вычисления с матрицами математической модели. К тому же вследствие многократных приближенных вычислений происходит накопление ошибки. Применение ортогональной сетки позволяет для численного моделирования использовать более широкий набор методов, например, метод крупных частиц, что положительно сказывается на производительности и точности расчетов. Выбор дискретного элемента в форме гексаэдра обусловлен критерием качества, так как каждый такой элемент может быть связан с шестью соседними элементами, что позволяет точнее аппроксимировать структуру материала машиностроительного изделия, а также относительной простотой реализации и удобством при расчетах траекторий частиц смазки. При равном количестве узлов в одном и том же объеме в неструктурированной сетке требуется в 5-6 раз больше ячеек (тетраэдров), чем в регулярной сетке. Более того, использование гексаэдральной ортогональной сетки значительно облегчает процесс вычисления траекторией частиц при расчете циркуляции смазывающей жидкости.

Процесс создания сеточной модели с применением предлагаемого метода разбивается на несколько шагов:

- задание начальных и граничных поверхностей;
- триангуляция поверхности деталей;
- построение ортогональной решетки;
- назначение параметров поверхностей граничным элементам сетки.

Исходными данными для генерации дискретной модели являются шаг дискретизации сетки и 3D CAD геометрия.

Поверхностная триангуляция представляет собой триангуляцию Делоне. Она происходит с использованием библиотеки функций OpenCASCADE. Выходными данными являются треугольники, аппроксимирующие поверхность изделия. Они используются при генерации пространственной решетки.

Генерация ортогональной решетки представляет собой итеративный процесс и происходит послойно внутри секущей плоскости. Для этого на каждой итерации ищутся линии пересечения треугольников, полученных на предыдущем этапе, и секущей плоскости. Ввиду замкнутости исходной геометрии полученные линии образуют сечение, внутри которого происходит генерация пространственных дискретных элементов.

Важной характеристикой полученной ортогональной решетки является упорядоченная нумерация элементов сетки. Возрастание индексов элементов сетки происходит сначала вдоль OX, затем вдоль OY, а потом вдоль OZ. Это позволяет разработать способ хранения сетки, снижающий требования к объему памяти, необходимой для хранения сетки.

Вследствие ортогональности и постоянного шага сетки, а также известных координат левого нижнего угла шестигранника, ограничивающего исходную модель, положение центра каждого элемента сетки, равно как и каждой его узловой точки, может

быть однозначно вычислено. Поэтому целесообразно хранить только индекс элемента. Однако упорядоченная нумерация позволяет осуществить дальнейшее снижение объема требуемой для хранения элементов памяти. На рисунке 1 приведена графическая иллюстрация расположения в памяти одного слоя элементов. Жирной линией темного цвета показан контур сечения, а пунктирные линии образуют ограничивающий прямоугольник. Цифры показывают номера элементов сетки. На темном фоне изображены номера элементов, дискретизирующие внутреннюю структуру модели, а на светлом – не принадлежащие исходной геометрии. Для хранения сетки достаточно хранить только номер первого элемента и количество непрерывно следующих элементов (рисунок 1). При использовании данного подхода к хранению происходит тем большее уменьшение требуемой памяти, чем больше элементов лежат непрерывно в ряд, то есть зависимость требуемой памяти от количества элементов не является линейной, как если бы требовалось хранить каждый элемент.

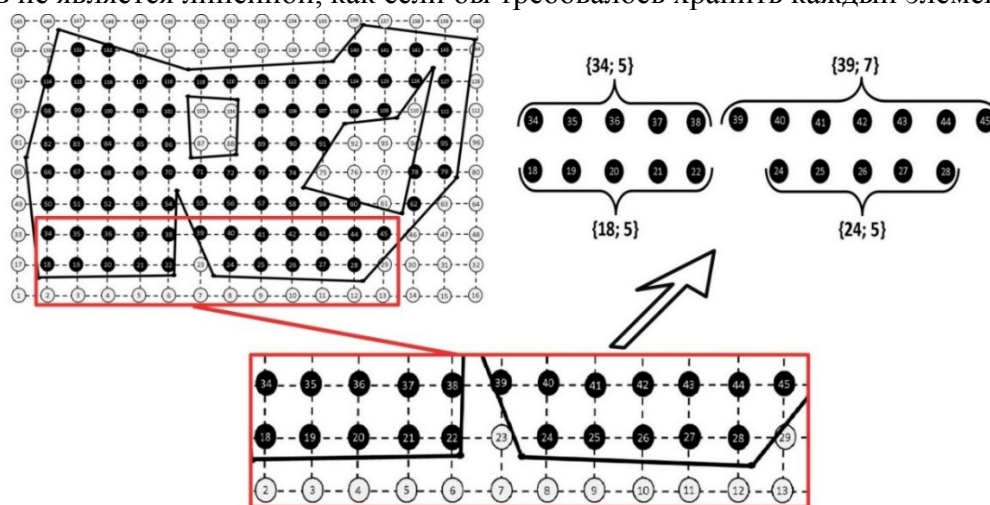


Рисунок 1 - Графическое представление расположения в памяти одного слоя элементов

Для уменьшения требований к памяти и ресурсам процессора генерация сетки и назначение граничных поверхностей ведется внутри текущего окна. Текущее окно представляет собой последовательность трех сечений, в которых сетка представлена в двоичном виде. Если элемент принадлежит модели, то он имеет значение 1, в противном случае – 0. Данный подход позволяет обращаться к любому элементу сетки по индексу (низкое время доступа) и не вызывает переполнения памяти при маленьком шаге дискретизации, так как нужно хранить только три слоя, а не всю сетку. При этом назначение граничных поверхностей элементам ведется по среднему слою. Это сделано для того, чтобы имелась возможность определения принадлежности элемента к граничной поверхности по трем координатным осям. Исключения составляют лишь первый и последний слои, где все элементы являются граничными.

В **третьей главе** описывается процесс программной реализации алгоритмов и методов для генерации сеточных моделей большой размерности на основе составной CAD-геометрии с возможностью дискретизации полостей внутри модели и задания граничных поверхностей, а также возможностью вычитания сеток. Рассматривается процесс создания системы визуализации сеточных моделей и результатов расчетов с использованием этих сеток. Описываются примеры использования системы генерации сеточных моделей и системы визуализации при моделировании машин и их узлов и агрегатов.

На практике генерация трехмерной дискретной сетки является фундаментальной геометрической проблемой. Это связано, прежде всего, со сложной формой современных

машиностроительных изделий. Она предполагает наличие большого числа криволинейных поверхностей, сложных сопряжений, технологических отверстий и полостей внутри изделия.

Генерация сеточных моделей для внутренних объемов сборочных моделей узлов и агрегатов машин не является тривиальной задачей ввиду того, что сборочные геометрические модели исследуемых агрегатов, как правило, не содержат геометрии, описывающей полости внутри агрегата, по которым, например, циркулирует смазка. То есть программной системе необходимо самой определять, внутри какого объема может, например, циркулировать смазывающая жидкость и строить для него дискретную модель с назначением граничных поверхностей.

В соответствии со сформулированными задачами была проработана функциональная структура разрабатываемой системы генерации сеточных моделей для геометрии в форме сборок:

- создание ортогональных сеточных моделей:
 - генерация сеточной модели из геометрии произвольной формы;
 - задание соответствия граничных элементов сетки поверхностям исходной геометрии;
- дискретизация полостей внутри модели машиностроительного изделия:
 - генерация дискретной модели для полостей внутри исходной геометрической модели;
 - назначение соответствия поверхностей исходной геометрии граничным элементам решетки;
- вычитание сеточных моделей:
 - задание списка файлов с дискретными моделями для проведения операции вычитания;
 - генерация результирующей дискретной модели;
 - объединение граничных поверхностей и их назначение элементам результирующей дискретной модели;
- импорт дискретных моделей в сторонние расчетные программы.

Система визуализации обеспечивает загрузку полученной дискретной модели и производит ее отрисовку с возможностью вращения, масштабирования и перемещения модели. При отрисовке учитываются граничные условия, наложенные на исходную модель (каждому граничному условию соответствует свой цвет). В визуализаторе заложена возможность построения XYZ-выреза в указанном пользователем месте для возможности анализа внутренних узлов дискретной модели. Визуализатор результатов расчетных данных имеет возможность показа анимации для отображения изменения свойств модели во времени. Функционал позволяет скрывать все элементы дискретной модели, значение выбранного скалярного параметра которых удовлетворяет задаваемым условиям. В визуализаторе имеется возможность изменять контрастность отображаемой геометрии в зависимости от выбранного скалярного параметра, присутствует возможность выбора логарифмического либо линейного масштаба при отображении выбранного скалярного параметра из результатов расчетов. Система предоставляет возможность создания контента для систем виртуальной реальности, в том числе с использованием специализированной аппаратуры, например, очков виртуальной реальности.

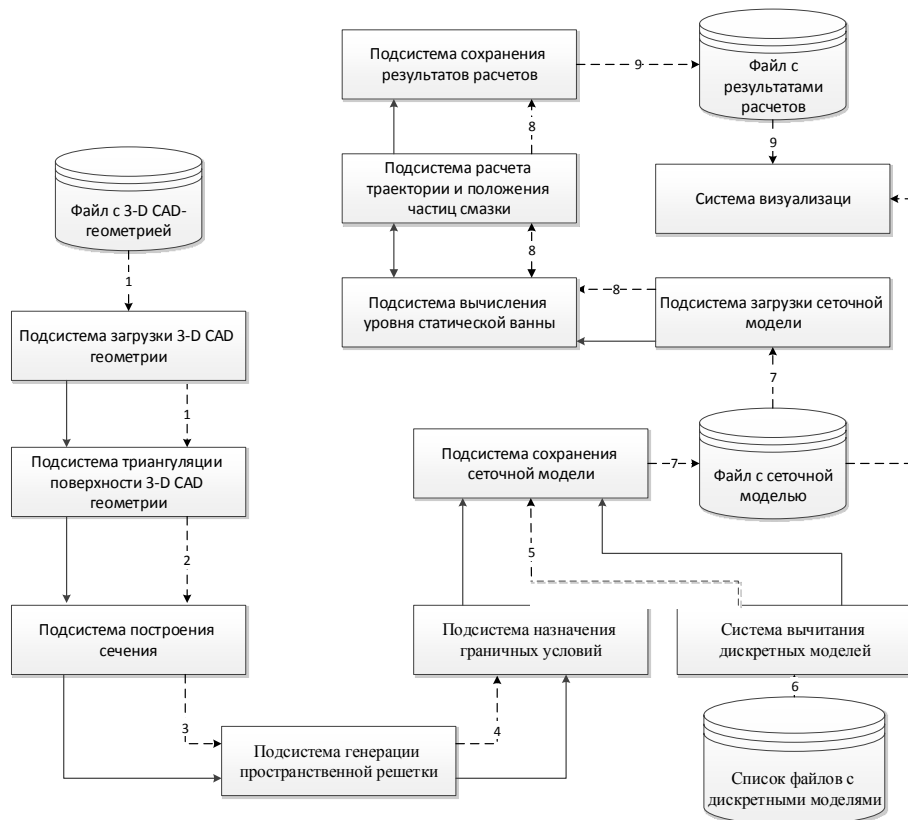


Рисунок 2 – Архитектура системы генерации сеточных моделей

Архитектура системы генерации сеточных моделей и системы визуализации была разработана с учетом их использования как в САПР циркуляции смазки, так и в сторонних MBS системах (рисунок 2). Цифрами обозначены: 1 – набор геометрических примитивов, описывающий геометрию модели; 2 – набор треугольников; 3 – сечение; 4 – пространственная ортогональная решетка; 5 – ортогональная решетка с назначенными граничными поверхностями; 6 – список исходных дискретных моделей; 7 – результирующая сеточная модель с назначенными граничными поверхностями; 8 – расчетная дискретная модель; 9 – результирующая расчетная модель.

Подсистема триангуляции поверхности 3-D CAD-геометрии выполняет функции по разбиению поверхности модели машиностроительного изделия на треугольники, которые подаются на вход подсистемы построения сечения. Особенностью этой подсистемы является то, что в ней происходит поиск всех треугольников, пересекаемых сечением, и затем на основе линий пересечения строится сечение. Построенное сечение передается на вход подсистемы генерации пространственной решетки. На выходе подсистемы получается структурированный массив элементов дискретной пространственной ортогональной сеточной модели. В случае необходимости дискретизации полостей внутри модели машиностроительного изделия происходит поиск внутренних областей, выделение их в отдельную модель и ее разбиение.

Подсистема назначения граничных поверхностей служит для поиска граничных дискретных элементов и сопоставления их номеров заданным граничным условиям. Граничные поверхности могут назначаться как для исходной дискретной модели, так и для дискретной модели внутренних полостей.

Сгенерированная сетка передается в подсистему сохранения сеточной модели, где и происходит ее сохранение на диск. Результат сохраняется в двоичном файле оригинального формата.

На вход системы вычитания сеток подается список названий файлов с дискретными моделями. Исходной является сетка, хранящаяся в первом файле из списка, остальные являются вычитаемыми. Выходная сетка подается на вход подсистемы сохранения сеточной модели, где происходит ее сохранение.

Система визуализации выполнена в виде отдельного модуля. Она позволяет загружать и визуализировать, в том числе с использованием средств виртуальной реальности, как сеточные модели, так и результаты расчетов. Архитектура системы визуализации приведена на рисунке 3.

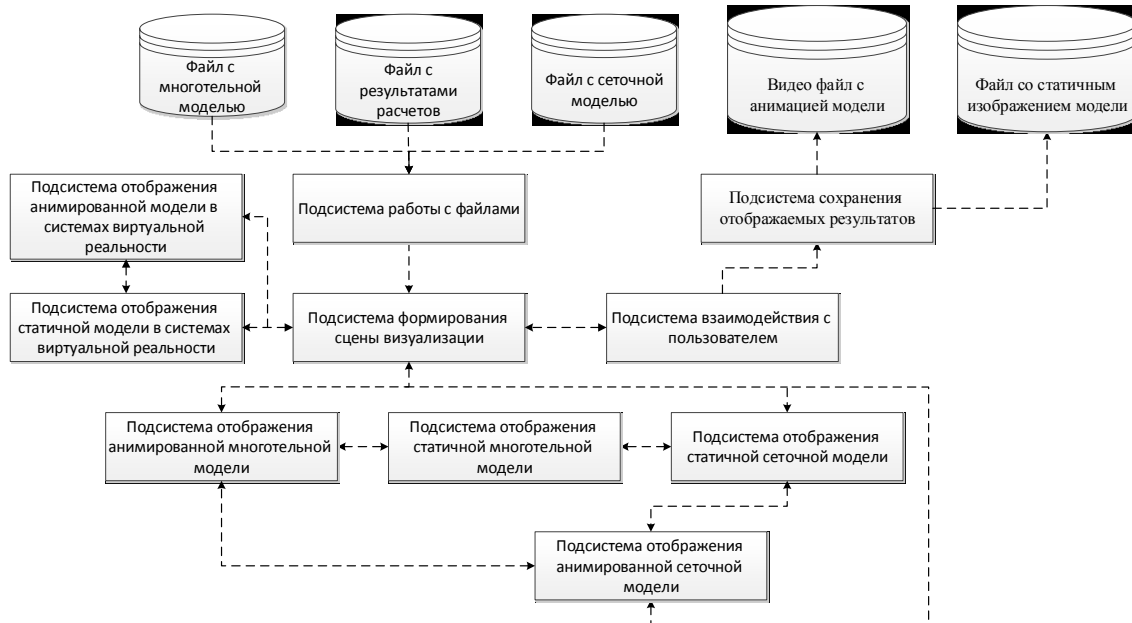


Рисунок 3 – Архитектура системы визуализации расчетов

Система генерации сеточных моделей и система визуализации были использованы при расчетах моделей машин в MBS FRUND. Программная система формирования решений уравнений нелинейной динамики (FRUND) предназначена для моделирования динамических процессов в машинах и конструкциях. FRUND обладает значительным набором инструментов для расчета динамики систем многих тел, однако в нем отсутствует возможность генерации сеточных моделей на основе CAD геометрии сборок, что существенно ограничивает его применимость, так как невозможно решить такие задачи, как расчет напряженно-демпфированного состояния или расчет температурных полей, хотя решатель позволяет производить такие вычисления. Для решения задачи интеграции с системой FRUND были проанализированы способы работы с моделями в данной системе, а также форматы файлов, используемые при работе пакета. В результате была предложена схема обмена данными между системой генерации сеточных моделей, MBS FRUND, системой для расчета циркуляции смазки и системой визуализации. Схема обмена показана на рисунке 4.

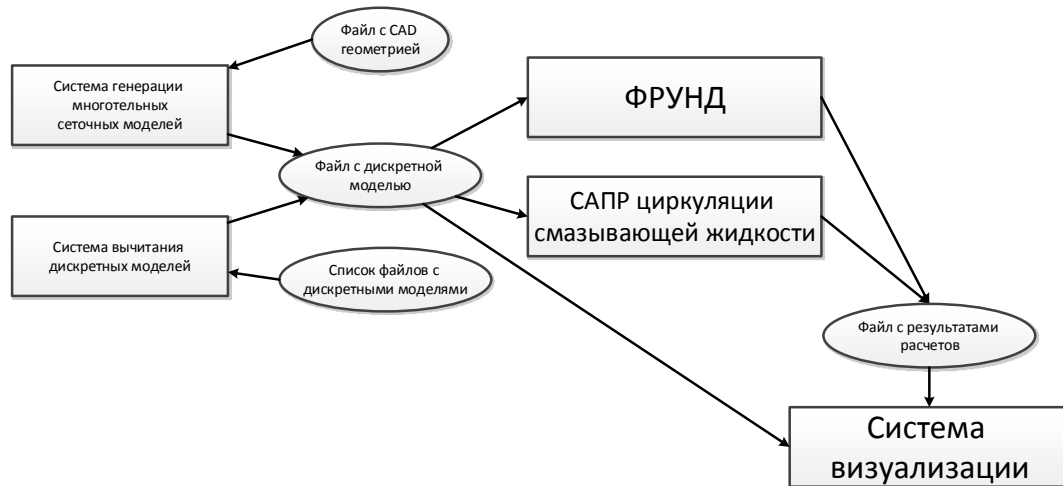


Рисунок 4 – Схема взаимодействия между системами

Программный комплекс FRUND использует упрощенное геометрическое представление для деталей машин. Для расчетов физических процессов в телах в модель встраивается подробное геометрическое представление импортом конструкторской геометрии, которая совмещается с упрощенным представлением тела. При совмещении подробной геометрии для абсолютно твердого тела в системе тел добавляется вспомогательная модель деформируемого тела или вспомогательная модель нестационарной теплопроводности в теле.

В системе FRUND существует возможность проведения тепловых расчетов, расчета напряженно-деформированного состояния, совместных расчетов динамики систем многих тел и теплопередачи.

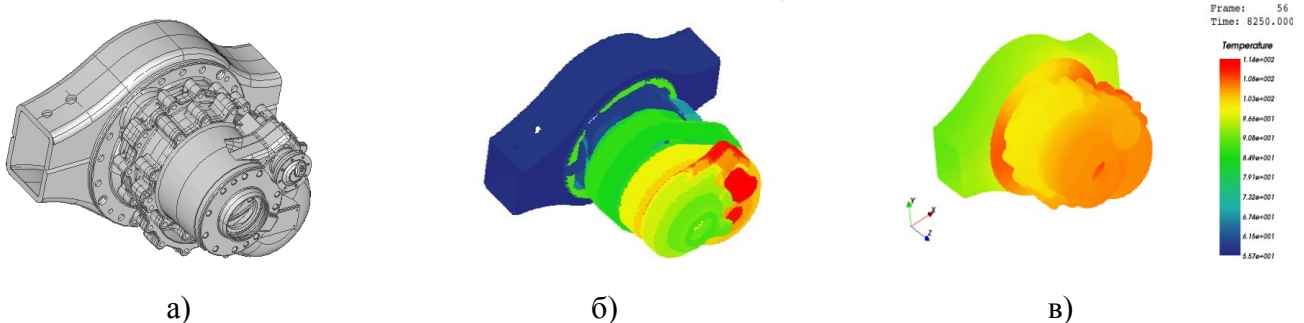
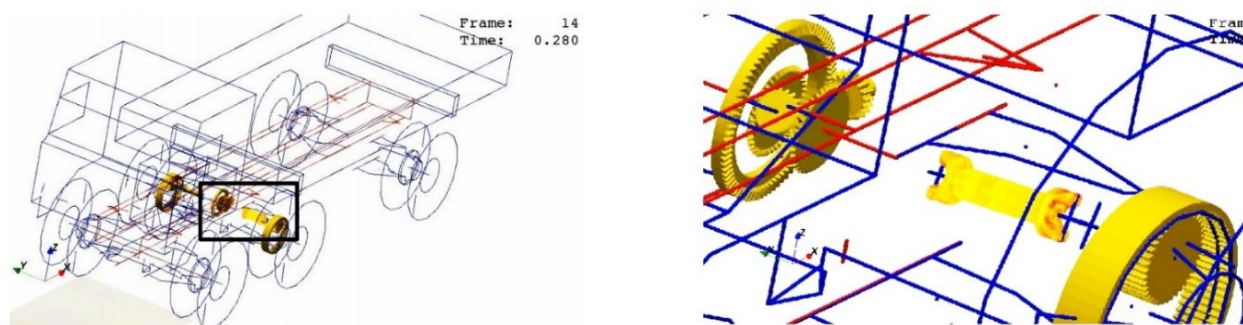


Рисунок 5 – Исходная геометрия (а), дискретная модель (б), визуализация процесса распределения тепла с использованием дискретной модели (в)

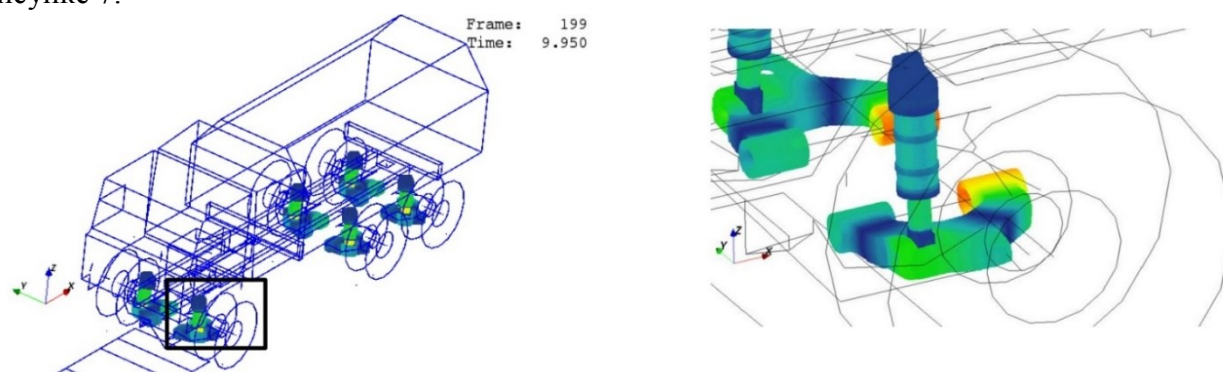
На рисунке 5 показано моделирование процесса нагрева корпуса редуктора грузового автомобиля. Было произведено разбиение исходной геометрической модели (рисунок 5а) на ортогональную стеку большой размерности. На полученную дискретную модель (рисунок 5б) были наложены тепловые потоки на границах и был произведен расчет нагрева (рисунок 5в).

Ортогональные сетки были использованы при моделировании напряженно-деформированного состояния деталей автомобиля в составе многотельной модели. На рисунке 6 показан расчет НДС карданного вала, а на рисунке 7 – расчет НДС рычагов подвески. Напряженно-деформированные состояния возникают вследствие движения автомобиля по неровностям дорожного покрытия.



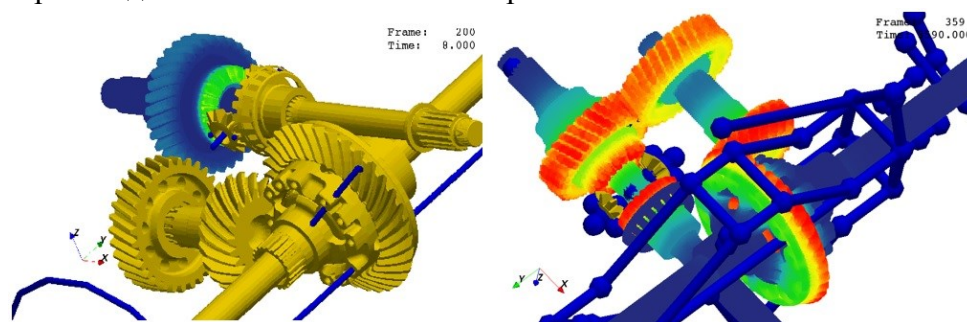
Риснок 6 – Результаты мультифизического моделирования с определением НДС карданного вала

При моделировании узлов и деталей машин имеется возможность произвести совместные расчеты динамики и тепловых потоков на получаемых дискретных моделях. Для этого на этапе генерации дискретной модели на исходной CAD геометрии задаются граничные поверхности, к которым прикладываются силы или тепловые потоки, после чего происходит разбиение геометрической модели на большое количество дискретных элементов, которые участвуют в расчете физического процесса. Результат моделирования нагрева амортизатора в результате движения автомобиля по неровной дороге приведен на рисунке 7.



Риснок 7 – Результаты мультифизического моделирования с определением НДС рычага подвески и нагрева амортизатора

При оценочных значениях рассчитанной рассеиваемой мощности сил трения в кинематических парах, моделирующих зубчатые зацепления и подшипники, использование дискретных моделей позволяет рассчитать теплонапряженность. На рисунке 8 показан результат расчета пространственных тепловых полей в деталях редуктора грузового автомобиля при его движении с постоянной скоростью.



Риснок 8 – Результаты моделирования нагрева внутренних деталей редуктора грузового автомобиля

В **четвертой главе** рассматривается методика для расчета циркуляции смазывающей жидкости в машиностроительных изделиях с использованием метода крупных

частиц на ортогональной сетке, описываются алгоритмы, по которым ведутся расчеты. Рассматривается программная реализация алгоритмов расчетов САПР циркуляции смазки, приводятся результаты работы САПР циркуляции смазки как на модельных задачах, так и на геометрии реальных сборок, производится сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

Для определения характеристик циркуляции смазывающей жидкости во внутреннем объеме как трехмерном пространстве сложной конфигурации предлагается использовать метод крупных частиц совместно с методом Монте-Карло. Геометрия внутреннего объема при этом представляется кубическими ортогональными сетками, которые получаются из САД геометрии рассматриваемого узла (агрегата), а смазывающая жидкость представляет собой набор частиц. Такой подход позволит получить некоторые статистические характеристики циркуляции жидкости, например, интенсивность смачивания поверхностей и параметры потоков жидкости, без необходимости ресурсоемкого численного решения точных уравнений гидродинамики, что позволит на 2-3 порядка сократить время расчетов.

Для описания движения частиц используются следующие допущения и правила:

- 1) движение частиц осуществляется в ортогональной сетке, состоящей из внутренних и граничных элементов;
- 2) в граничных элементах сетки известны усредненные направления нормалей поверхностей, располагающихся в этих элементах сетки;
- 3) во внутренних элементах сетки частицы движутся только под действием силы тяжести;
- 4) при попадании в граничные элементы сетки происходит абсолютно неупругий удар в направлении нормали поверхности, то есть у частицы остается только тангенциальная составляющая скорости;
- 5) при движении по касательной к ограничивающим поверхностям на частицу действует сила вязкого сопротивления;
- 6) скорости покоящихся частиц могут меняться скачком в специальных областях – областях разбрызгивания;
- 7) в областях разбрызгивания в каждой ячейке находится заданное фиксированное количество частиц.

Расчет циркуляции жидкости основан на вычислении координат траекторий движения частиц во времени. Координаты рассчитываются по аналитическим формулам с фиксированным шагом по времени. Величина шага выбирается из условия перемещения частицы только в соседнюю ячейку за время шага. В пределах одной итерации по шагу происходит пересчет объема жидкости в каждой ячейке. Предполагается, что в начальный момент времени, все частицы находятся в специальной области – статической ванне.

Расчет параметров циркуляции смазывающей жидкости происходит на основании дискретной модели, загруженной подсистемой загрузки сеточной модели. В подсистеме вычисления уровня статической ванны происходит вычисление текущего уровня смазки и назначение начальных скоростей частицам, с учетом заданных параметров распределения. Подсистема расчета траектории движения частиц вычисляет текущее положение всех частиц смазки. По завершении процесса расчета положения частиц смазки во времени происходит сохранение полученных данных подсистемой сохранения результатов расчетов.

В качестве апробации работы САПР циркуляции смазки рассмотрено течение жидкости в шаре с внутренним выступом (рисунок 9а) и редукторе грузового автомобиля (рисунок 9б).

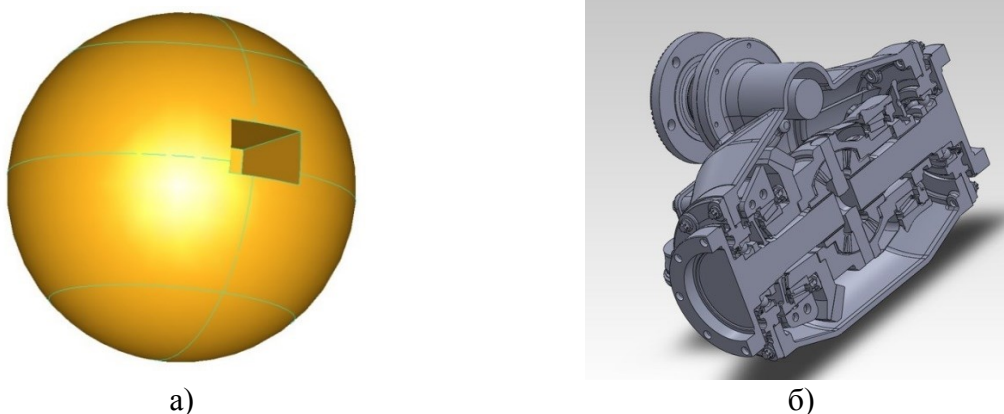


Рисунок 9 – Геометрия для расчета течения смазывающей жидкости: а) – шар с внутренним выступом, б) – редуктор

На рисунке 10а приведена сеточная модель для геометрии шара (рисунок 9а), на рисунке 10б показан результат расчетов траектории движения частиц для данной геометрии, а на рисунке 10в – отображение скопления частиц на границах (смачивание). При этом расчеты велись с учетом нормального распределения начальных скоростей.

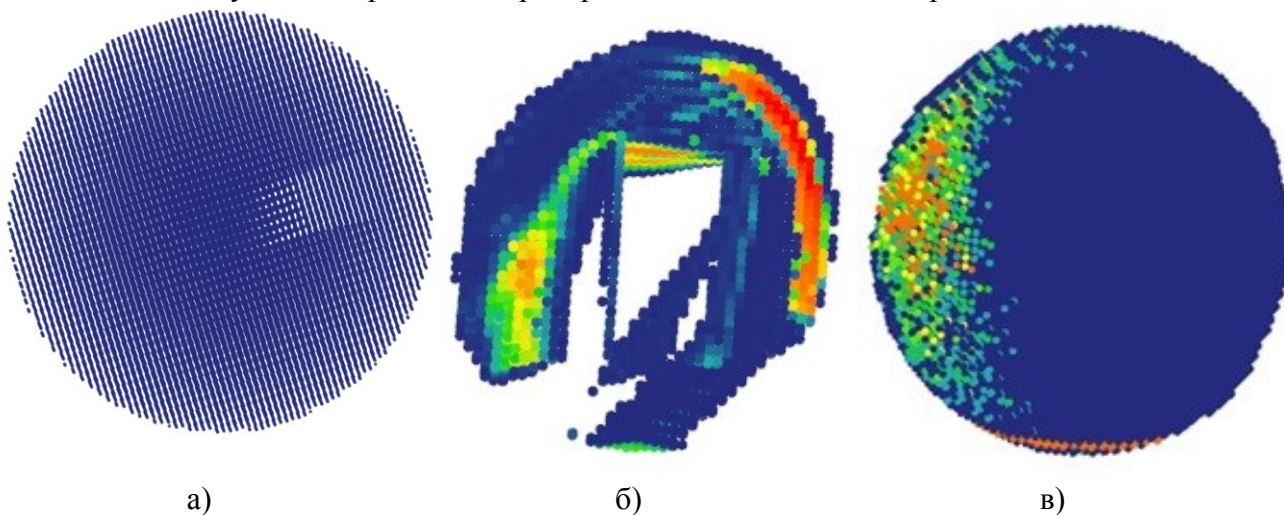


Рисунок 10 – Тестовая модель для расчета течения смазывающей жидкости: а) – исходная сеточная модель, б) – распределение частиц в потоке, в) – распределение частиц на границах

На рисунке 11а представлена сетка внутреннего объема корпуса редуктора, полученная на основе сеточной модели для исходной сборки.

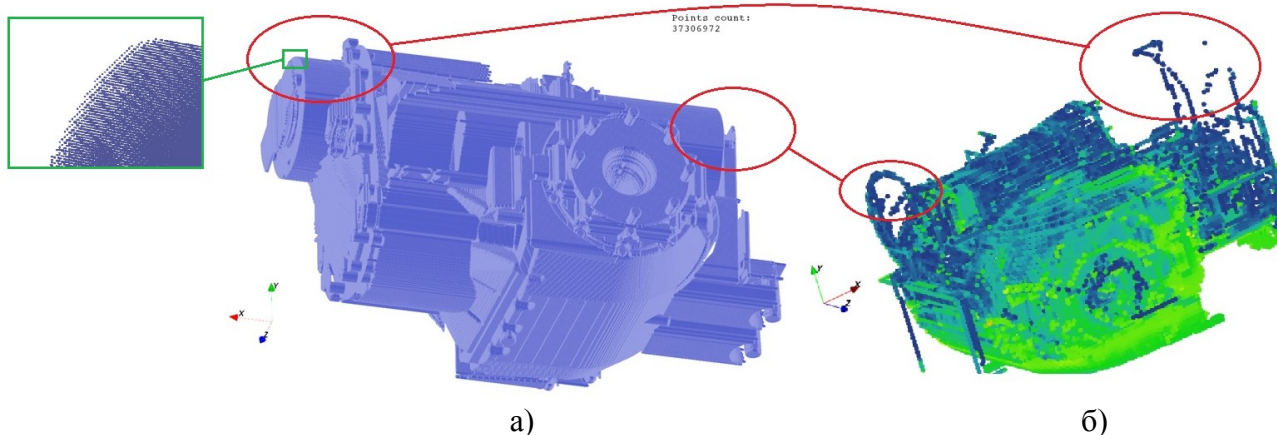


Рисунок 11 – Внутренний объем корпуса редуктора: а) сетка, б) – результаты расчетов (распределение жидкости на границах)

На рисунке 11б показано распределение смазки в корпусе редуктора. Можно заметить, что смазывающая жидкость циркулирует не только внутри объема, образованного корпусом редуктора и деталями, находящимся внутри него, а также по специальным каналам внутри корпуса. Также можно заметить области малой омываемости, которые совпали с областями масляного голодания натурального редуктора.

В **заключении** приведены выводы и основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенных работ было сделано следующее:

- 1) выполнен анализ предметной области: проанализированы способы генерации сеточных моделей, дискретизации CAD-геометрии в форме сборок, методы расчета циркуляции смазывающей жидкости в узлах и деталях машин. Это позволило создать метод получения дискретных моделей для исходных сборочных моделей и их внутренних объемов с использованием существующих стандартов представления CAD-геометрии.
- 2) произведена разработка системы генерации сеточных моделей большой размерности для CAD-геометрии в форме сборок сеточных моделей: проработана концепция системы, разработаны алгоритмы разбиения CAD-геометрии на сеточные структуры как для исходных геометрических моделей, так и для полостей внутри них (внутренних объемов), а также алгоритмы вычитания сеток, выполнена программная реализация системы.
- 3) предложен метод получения статистических характеристик циркуляции смазывающей жидкости (интенсивность смачивания поверхностей, параметры потоков смазки) с использованием метода крупных частиц на ортогональной сетке и метода Монте-Карло, разработаны алгоритмы расчета циркуляции смазки, выполнена разработка тестовой версии системы расчета смазки.
- 4) произведена проверка работы разработанных систем на тестовых примерах и реальных задачах. Дана оценка достоверности получаемых результатов работы систем. Получено совпадение мест масляного голодания натурального редуктора с результатами расчетов (рисунок 10).

Использование системы расчета смазки позволяет сократить временные и финансовые затраты на доработку изделия, так как происходит уменьшение числа натурных испытаний, и уменьшается количество изготовленных опытных образцов. Вместо этого производится моделирование циркуляции смазки в программной системе, в соответствии с результатами которого вносятся изменения в конструкцию.

Дальнейшие исследования в данной области планируется проводить в следующих основных направлениях:

- 1) разработка алгоритмов генерации адаптивных гексаэдральных сеток, в результате чего в функционал системы добавится возможность производить генерацию сеточных моделей с переменным шагом дискретизации без потери качества;
- 2) ускорение работы генератора за счет создания распределенной версии, способной выполнять дискретизацию исходной геометрической модели в несколько параллельно работающих потоков;
- 3) разработка методов визуализации сеток большой размерности;
- 4) уточнение моделей элементов разбрызгивания смазывающей жидкости – шестеренки, конические подшипники;

- 5) доработка алгоритма вычисления начального уровня смазывающей жидкости;
- 6) отработка интерфейса привязки элементов разбрызгивания к геометрии сетки;
- 7) доработка методов визуализации сетки и результатов расчета.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в журналах, рекомендуемых ВАК

1. Модуль построения ортогональных гексаэдральных сеточных моделей большой размерности / А.Е. Андреев, А.С. Горобцов, Е.Г. Громов, А.Д. Мохов // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. - Волгоград, 2015. - № 2 (157). - С. 5-9.
2. Система для расчёта тепловых технологических процессов машиностроения / А.Е. Андреев, Е.Г. Громов, М.В. Резников, О.В. Шаповалов // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 7 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2009. - № 12. - С. 124-126.
3. Программа синтеза управления движениями шагающего ортогонального движителя / А.Д. Мохов, Е.Г. Громов, В.А. Серов, К.Б. Мироненко // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 19 : межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 24 (127). - С. 57-61.
4. Математическое моделирование циркуляции смазки в зубчатых редукторах / А.С. Горобцов, Н.В. Чигиринская, Е.А. Смирнов, А.М. Бочкин, О.Е. Григорьева, Е.Г. Громов // Научно-технический журнал «Информационные технологии в проектировании и производстве» - № 4 (176) - 2019. - С. 27-31

Статьи в журналах SCOPUS

5. Method for Modeling of Circulation of the Lubricating Fluid in Models of Machine-Building Products / А.С. Горобцов, Е.Г. Громов, Н.В. Чигиринская // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Volume I / Editors: A.A. Radionov, O.A. Kravchenko, V.I. Guzeev, Y.V. Rozhdestvenskiy : Springer International Publishing, 2019. – P. 1063-1071.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

6. Программная система генерации гексаэдральных сеточных моделей большой размерности. Св. об офиц. рег. прогр. для ЭВМ № 2017661450 / Громов Е. Г. Зарег. 13.10.2017.
7. Программная система расчета течения смазывающей жидкости. Св. об офиц. рег. прогр. для ЭВМ № 2019613890 / Горобцов А. С., Громов Е. Г. Зарег. 26.03.2019.
8. Программный комплекс расчета движения системы твердых тел в постановке Эйлера-Лагранжа. Св. об офиц. рег. прогр. для ЭВМ № 2019616152 / Шурыгин В. А, Менделева И. В., Громов Е. Г., Агафонов С. А., Полетавкин А. А. Зарег. 17.05.2019.

Статьи в журналах и сборниках

9. Solving Equations of Nonstationary Heat Conduction in Multibody System Dynamics / А.Е. Андреев, О.В. Шаповалов, М.В. Резников, Е.Г. Громов // Multibody System Dynamics : the

- First Joint International Conference (Lappeenranta, Finland, May 25-27, 2010 : book of adstracts / Lappeenranta University of Technology.- [Lappeenranta], 2010.- 6 p.- Англ.
10. Громов, Е.Г. Investigation and optimization of active suspension in multibody car model / Е.Г. Громов, Д.А. Мирошниченко, А.С. Горобцов // Multibody System Dynamics : the First Joint International Conference (Lappeenranta, Finland, May 25-27, 2010 : book of adstracts / Lappeenranta University of Technology.- [Lappeenranta], 2010.- P. 130.- Англ.
 11. Разработка составных сеточных моделей для анализа теплового состояния узлов и деталей машин [Электронный ресурс] / А.Е. Андреев, А.С. Горобцов, Е.Г. Громов, В.О. Фирсова // Управление большими системами (УБС'2015) : матер. XII всерос. школы-конф. молодых учёных (г. Волгоград, 7–11 сент. 2015 г.) / под общ. ред. Д.А. Новикова, А.А. Воронина ; Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; Волгоградский гос. ун-т, Волгоградский научно-образовательный центр проблем управления. - Москва, 2015. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - С. 570-579.
 12. Исследование газодинамических процессов периода последствий при старте ракет из ТПК / Е.В. Бакланов, Е.Г. Громов, В.А. Комочков, А.С. Горобцов // Тезисы докладов юбилейного смотра-конкурса научных, конструкторских и технологических работ студентов ВолгГТУ, Волгоград, 11-14 мая 2010 г. / ВолгГТУ, Совет СНТО. - Волгоград, 2010. - С. 153.
 13. Мультифизические задачи в динамике систем твёрдых и упругих тел / Е.Г. Громов, А.А. Насонов, А.А. Новокшенов, В.О. Фирсова // XI всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Казань, 20-24 авг. 2015 г.) : сб. докл. / сост.: Д.Ю. Ахметов [и др.] ; АН Республики Татарстан, Казанский (Приволжский) федеральный ун-т [и др.]. - Казань, 2015. - С. 1080-1082.
 14. Мультифизические задачи в динамике систем твёрдых и упругих тел / Е.Г. Громов, А.А. Насонов, А.А. Новокшенов, В.О. Фирсова // XI всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Казань, 20-24 авг. 2015 г.) : аннотации докладов / АН Республики Татарстан, Казанский (Приволжский) федеральный ун-т [и др.]. - Казань, 2015. - С. 85.
 15. Громов, Е.Г. Расчёт тепловых нестационарных процессов для машиностроительных изделий / Е.Г. Громов, М.В. Резников, О.В. Шаповалов // Инновационные технологии в обучении и производстве : матер. VI всерос. науч.-практ. конф., г. Камышин, 15-16 дек. 2009 г. В 6 т. Т. 1 / ГОУ ВПО ВолгГТУ, КТИ (филиал) ВолгГТУ. - Волгоград, 2010. - С. 60-61.
 16. Нгуен, Ле Зунг Разработка программного модуля для определения точности дискретных моделей по аналитическим решениям / Ле Зунг Нгуен, Е.Г. Громов // Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности "АСТИНТЕХ-2010" : матер. междунар. науч. конф. (11-14 мая 2010 г.). В 3 т. Т. 1 / Астраханский гос. ун-т [и др.]. - Астрахань, 2010. - С. 63.
 17. Решение задачи нестационарной теплопроводности в многотельной модели автомобиля / О.В. Шаповалов, М.В. Резников, Е.Г. Громов, А.Е. Андреев // Сборник тезисов докладов VII всерос. межвуз. конференции молодых учёных, посвящ. 110-годовщине со дня создания СПбГУ ИТМО. Вып. 5 / Санкт-Петербургский гос. ун-т информ. технологий, механики и оптики. - СПб., 2010. - С. 99-100.