



**Гиацинтов Александр Михайлович**

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РАЗНОРОДНЫХ ДАННЫХ В  
ТРЕНАЖЕРНО-ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННОГО  
ПРИМЕНЕНИЯ**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации  
(промышленность)»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2017

Работа выполнена в Центре визуализации и спутниковых информационных технологий  
Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-  
исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»

Научный руководитель: **Мамросенко Кирилл Анатольевич**,  
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Семенов Николай Александрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический  
университет», профессор кафедры «Информационные  
системы»

**Солодов Сергей Владимирович**,  
кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский технологический университет  
«МИСиС», заместитель директора института  
Информационных технологий и автоматизированных  
систем управления

Ведущая организация: **Акционерное общество «Системы управления»,  
РОСТЕХ (г. Москва)**

Защита состоится **17 мая 2017 г.** в \_\_\_\_ час. \_\_\_\_ мин. на заседании диссертационного  
совета Д 212.132.13 на базе Национального исследовательского технологического  
университета «МИСиС» по адресу: г. Москва, Ленинский пр-т, д. 6, стр. 2, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального  
исследовательского технологического университета «МИСиС» (НИТУ «МИСиС») и на  
сайте НИТУ «МИСиС» (<http://misis.ru/science/dissertations/2016/3341>).

Отзывы на автореферат диссертации, заверенные печатью организации с указанием  
контактов, просьба присылать в 2 экз. по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д.4

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2017г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Лычев Андрей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В ряде отраслей промышленности в настоящее время ощущается нехватка квалифицированных специалистов, способных профессионально управлять сложными техническими системами. Причем потребности в таких специалистах по некоторым отраслям в ближайшие годы будут только расти. Тренировки операторов на реальных промышленных установках и в реальных условиях слишком опасны и дороги, а часто и не реализуемы. Альтернативой являются компьютерные тренажерно-обучающие системы (ТОС), которые в максимально возможной степени моделируют реальные комплексы и позволяют тренирующимся приобрести правильные и устойчивые навыки. Обучение операторов включает как теоретическую часть (изучение соответствующих математических моделей, критериев надежности и т.д.), так и практическую, без которой невозможно получение устойчивых навыков управления. Подготовка с применением ТОС позволяет отрабатывать навыки в условиях, которые в реальной эксплуатации могут привести к нештатным ситуациям. Например, возможен учет факторов, влияющих на возникновение визуальных иллюзий при реальной эксплуатации, что напрямую связано с безопасностью работы. Адекватное отображение световых эффектов особенно важно при отработке учебных задач в ночных условиях и в условиях плохой видимости.

Одним из важнейших компонентов ТОС является система визуализации, обеспечивающая отображение результатов моделирования внешней среды и объекта управления с помощью устройств отображения информации. Применительно к теоретическому этапу подготовки, система визуализации должна отображать следующие виды учебных материалов: динамические графики развития процессов; диаграммы для анализа массивов данных; графические материалы рассматриваемых объектов; трехмерные модели объектов, их частей; функциональные схемы взаимодействия отдельных подсистем; результаты работы моделирующих комплексов, с сохранением управляемости приложения; видеоматериалы реальных объектов.

Следовательно, возникает необходимость создания ТОС, позволяющих объединять разнородную учебную мультимедийную информацию в едином информационном пространстве.

Разработке тренажерных систем посвящены труды Бюшгенса Г.С., Бюшгенса А.Г.,

Решетникова В.Н., Косарева В.А., Дьякова А.Ф., Шibaева В.М., Кольцова С.Е., Кубланова М.С. и др.

Известна система автоматизированного обучения, которая может быть использована для комплексного группового и/или индивидуального обучения и переподготовки персонала для эксплуатации и обслуживания сложных технических комплексов в условиях возникновения экстремальных и аварийных ситуациях на морских нефтегазодобывающих платформах (Бирюков Ю.Б., Бондарь Е.М.). Также известна интерактивная автоматизированная система междисциплинарного обучения, позволяющая в режиме реального времени проводить междисциплинарное групповое обучение и тестирование обучаемых в условиях реальных технико-технологических, экологических и организационно-управленческих процессов, происходящих в сложных природно-технических комплексах (Мартынов В.Г., Владимиров А.И.).

Результаты проведенного анализа показывают, что вопросы разработки технологий и методов отображения разнородных мультимедийных учебных материалов в системах подготовки персонала раскрыты не достаточно полно. Следовательно, учитывая все вышеизложенное, задача создания тренажерно-обучающих систем, отвечающих современным требованиям, является актуальной.

**Цель диссертационной работы** – разработка архитектуры автоматизированной системы обучения, методов и алгоритмов визуализации, трансформации и анализа информации в тренажерно-обучающих системах подготовки персонала сложных промышленных объектов, а также проработка вопросов практической реализации системы на примере курса подготовки по обследованию и диагностике щеточно-контактных аппаратов турбогенераторов ГРЭС.

**Задачи исследования:**

- провести анализ современных систем визуализации и методов хромакеинга;
- разработать методы и алгоритмы одновременного воспроизведения видеоматериалов в виртуальном трехмерном окружении, позволяющие отображать параллельно выполняемые процессы, как реальные, так и моделируемые;
- создать методы воспроизведения потоковых мультимедиа материалов в виртуальном трехмерном окружении, обеспечивающие получение и отображение данных с моделирующих комплексов с минимальной задержкой;

- создать метод хромакеинга, обеспечивающий выделение объектов переднего плана в изображении из однородного фона в реальном масштабе времени с использованием вычислительных ресурсов видеокарт;
- разработать архитектуру подсистемы визуализации тренажерно-обучающих систем, применяемую для отображения разнородных данных в едином информационном окружении в реальном масштабе времени;
- разработать архитектуру подсистемы воспроизведения мультимедийных материалов, обеспечивающую отображение видеоматериалов высокой четкости на гранях объектов виртуальной трехмерной сцены;
- разработать модель языковой структуры программируемых сценариев, содержащую информацию о командах динамического языка программирования и командах, используемых для управления функциональностью ТОС;
- проработать вопросы практической реализации системы для подготовки промышленно-производственного персонала.

**Методы исследования.** Поставленные задачи решались с использованием методов математического и имитационного моделирования, визуализации, трансформации, кластерного, регрессионного анализа данных, методов системного анализа.

Методологическую и теоретическую основу диссертационной работы составили научные труды отечественных и зарубежных авторов в области визуализации данных, дистанционного обучения, создания компьютерных тренажерных систем.

#### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

- архитектура автоматизированной системы обучения, позволяющая осуществлять подготовку персонала в едином виртуальном трехмерном окружении;
- методы и алгоритмы одновременного воспроизведения нескольких видеоматериалов высокой четкости в виртуальной трехмерной сцене, обеспечивающие возможность отображения параллельно выполняемых процессов, как реальных, так и моделируемых;
- метод хромакеинга, позволяющий отделить объекты переднего плана от однородного фона с использованием вычислительных мощностей современных видеокарт.

**Теоретическая значимость исследования** заключается в разработке нового подхода к созданию информационных технологий обработки и визуализации больших объемов разнородной информации в тренажерно-обучающих системах, позволившего

единовременно использовать виртуальное трехмерное окружение, разнородную мультимедийную информацию, виртуальный графический образ инструктора.

### **Научная новизна:**

- установлена взаимосвязь порядка поступления данных и команд в память видеокарты и изменения производительности подсистемы визуализации при отображении видеоматериалов;
- разработан метод, впервые позволивший одновременно воспроизводить несколько разнородных видеоматериалов в разрешении 4K (3840\*2160) в режиме реального времени в виртуальной трехмерной сцене;
- предложен метод хромакеинга, который по сравнению с существующими решениями, имеет меньшее число этапов и применим для реализации в реальном времени на мощностях видеокарт, без использования специализированных аппаратных средств.

**Практическая значимость** диссертационного исследования состоит в том, что разработанные архитектура систем, методы, алгоритмы и модели используются при создании тренажерно-обучающих систем сложных технических комплексов в различных отраслях промышленности, курсов теоретической подготовки промышленно-производственного персонала.

**Достоверность результатов** основывается на корректном использовании методов системного анализа и математического моделирования, а также на основании данных, полученных в ходе создания мультимедийных курсов по проектированию подсистем связи космических аппаратов, по обследованию и диагностике щеточно-контактных аппаратов турбогенераторов ГРЭС и внедрения результатов исследования в деятельность ООО «ЭФ-КОНТЭЛ».

**Реализация результатов работы.** Основные практические результаты диссертационной работы использовались ООО «ЭФ-КОНТЭЛ» в 2015-2016 годах при проведении обучения персонала предприятий электроэнергетики по обследованию и диагностике щеточно-контактных аппаратов турбогенераторов ГРЭС; их внедрение осуществлено в МАИ (МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского) при создании мультимедийного курса по проектированию подсистем связи космических аппаратов.

**Апробация результатов работы.** Результаты демонстрировались на авиасалоне МАКС 2013, на выставке "Телевидение высокой четкости России", заседании секции

Информационных технологий НП «Научно-технический совет Единой энергетической системы» в 2015 году.

Результаты исследований докладывались на следующих конференциях:

- Международная конференция «Гагаринские чтения» в 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 годах, Москва;
- Международная конференция «Научные исследования по проблемам открытого и дистанционного образования», проводимая Комитетом министров образования стран АСЕАН в 2012, 2015 годах, Ханой, Вьетнам;
- VI Всероссийская научно-практическая конференция «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии», 2013 год, Оренбург;
- VII Международная конференция «Авиационные тренажеры и учебные центры 2015»;

В 2007 году коллективу, в котором работает автор, присуждена премия «Кристалл знаний», учрежденная Комитетом министров образования стран АСЕАН, в 2009 году автору присуждена золотая медаль Российской академии наук за лучшую научную работу 2008 года молодых ученых России.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 научных печатных работ, в том числе 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

**Структура и объемы работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка из 117 наименований, содержит 20 рисунков и 3 таблицы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении к диссертации обосновывается актуальность работы, ее научная новизна, формулируются цели и задачи диссертационного исследования, приводится краткое содержание глав диссертации и положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены современные технологии визуализации трехмерного окружения в режиме реального времени (визуализация с частотой смены кадров не менее 25 в секунду), методы рир-проекции, определена возможность применения рассмотренных технологий и методов в тренажерно-обучающих системах.

Применительно к тренажерно-обучающим системам, система визуализации - это тренажерный имитатор, воспроизводящий визуальную обстановку, соответствующую

реальной. Для осуществления такой имитации система должна обеспечивать визуализацию высоко-реалистичных виртуальных сцен большой сложности в реальном режиме времени.

Одним из основных аспектов реалистичности генерируемого системой визуализации изображения является освещение трехмерной сцены. Существует четыре основных вида источников света: отраженный свет (ambient light), направленный источник свет (directional light), всенаправленный источник света (point light) и источник света типа «прожектор» (spot light).

Отраженный свет используется для грубой аппроксимации освещения в виртуальной среде. Он равномерно освещает объекты трехмерной сцены с равной интенсивностью.

Направленный источник света испускает свет в одном направлении и не затухает с увеличением расстояния. Подобные тип источников света часто применяется для имитации солнца.

Всенаправленный источник света излучает свет из одной точки во все стороны с одинаковой интенсивностью. Интенсивность света уменьшается в зависимости от расстояния по закону обратных квадратов.

Если источник света находится в точке  $P$ , тогда интенсивность света в точке пространства  $Q$  рассчитывается по следующей формуле:

$$C = \frac{1}{k_c + k_l d + k_q d^2} C_0, \quad (1)$$

где  $C$  - цвет источника света в точке  $Q$ ,  $C_0$  - цвет источника света,  $d$  – дистанция между источником света и точкой  $Q$  ( $d = |P - Q|$ ),  $k_c$  – константа неизменного затухания света,  $k_l$  – константа линейного затухания света,  $k_q$  – константа квадратичного затухания света.

Источник света типа «прожектор» (spot light) во многом схож с всенаправленным источником света, но имеет направление. Для источника света с началом в точке  $P$  и направлением  $R$ , интенсивность в точке пространства  $Q$  будет рассчитываться по следующей формуле:

$$C = \frac{\max\{-R \cdot L, 0\}^p}{k_c + k_l d + k_q d^2} C_0, \quad (2)$$

где  $C$  - цвет источника света в точке  $Q$ ,  $C_0$  - цвет источника света,  $d$  – дистанция между источником света и точкой  $Q$ ,  $k_c$ ,  $k_l$ ,  $k_q$  – константы затухания света,  $L$  – вектор единичной длины, направленный из точки  $Q$  в центр источника света:

$$L = \frac{P - Q}{|P - Q|}, \quad (3)$$

Коэффициент  $p$  определяет фокусировку источника света. Чем больше значение  $p$ , тем меньше световое пятно.

Диффузной поверхностью является поверхность, на которой часть падающего света рассеивается, равномерно отражая определенный цвет (отражаемый цвет диффузной поверхности) во всех направлениях. Для расчета цвета диффузного отражения световой волны  $K_{DIFF}$ , отраженной от поверхности в точке  $Q$  в направлении наблюдателя, с использованием нескольких источников света, применяется следующая формула:

$$K_{DIFF} = DTA + DT \sum_{i=1}^n C_i \max \mathbf{N} \cdot \mathbf{L}_i, 0, \quad (4)$$

где  $D$  – диффузный цвет, отражаемый поверхностью,  $A$  – интенсивность рассеянного света,  $C_i$  – цвет  $i$ -го источника света в точке  $Q$ ,  $\mathbf{N}$  – вектор нормали,  $\mathbf{L}_i$  – вектор направления  $i$ -го источника света,  $T$  – цвет пикселя используемой текстуры.

В дополнение к равномерно рассеиваемому диффузному отражению, поверхность отражает свет под углом, равным углу падения. В отличие от диффузного отражения, зеркальное отражение света зависит от позиции наблюдателя. Для расчета зеркально отраженного от поверхности света применяется следующая формула:

$$K_{SPEC} = SG \sum_{i=1}^n C_i \max\{\mathbf{N} \cdot \mathbf{H}_i, 0\}^m, (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}_i > 0), \quad (5)$$

где  $S$  – цвет отраженного света,  $C_i$  – цвет  $i$ -го источника света в точке  $Q$ ,  $\mathbf{N}$  – вектор нормали в точке  $Q$ ,  $m$  – коэффициент отражения света,  $G$  – цвет пикселя из текстуры освещения,  $\mathbf{H}_i$  – единичный вектор, лежащий на биссектрисе угла между вектором направления к наблюдателю  $\mathbf{V}$  и вектором направления источника света  $\mathbf{L}_i$ :

$$\mathbf{H}_i = \frac{\mathbf{L}_i + \mathbf{V}}{|\mathbf{L}_i + \mathbf{V}|}, \quad (6)$$

Выражение  $(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}_i > 0)$  является булевым выражением, которое может принимать значения 0 (ложь) и 1 (истина), и позволяет избежать появления отражений на точках поверхности, которых не достигает свет от конкретного источника.

Учитывая приведенные выше рассуждения, получаем итоговую формулу расчета цвета поверхности в точке  $Q$ , освещенной несколькими источниками света, по модели Blinn-Phong:

$$K = EM + DTA + \sum_{i=1}^n C_i DT \max\{\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}_i, 0\} + (SG \max\{\mathbf{N} \cdot \mathbf{H}_i, 0\}^m, \mathbf{N} \cdot \mathbf{L}_i > 0), \quad (7)$$

где  $D$  – цвет отраженного диффузного света,  $S$  – цвет отраженного света,  $m$  – коэффициент отражения света,  $A$  – цвет рассеянного света,  $E$  – цвет излучаемого цвета,  $T$  – цвет из текстуры,  $G$  – цвет пикселя из текстуры освещения,  $M$  – цвет карты излучения,  $C_i$  – цвет  $i$ -го источника света в точке  $Q$ ,  $\mathbf{L}_i$  – вектор направления  $i$ -го источника света,  $\mathbf{H}_i$  – единичный вектор, лежащий на биссектрисе для  $i$ -го источника света,  $\mathbf{N}$  – вектор нормали.

Были проанализированы технологии визуализации трехмерного окружения и приведены следующие выводы:

- рассмотренные системы визуализации являются закрытыми, что усложняет или делает невозможной их модификацию (изменение базовой функциональности или исправление ошибок) и адаптацию к предъявляемым требованиям без согласования с разработчиками этих систем;
- высокий порог вхождения для работы с данными системами, значительный объем программного кода и документации для изучения;
- данные системы визуализации не предоставляют возможности воспроизведения разнородных видеоматериалов (видеоматериалы, представленные в различных форматах кодирования и хранения информации), а также не позволяют воспроизводить потоковые видеоматериалы; внесение такой функциональности может быть затруднительно в связи с причинами, описанными выше.

Из проведенного анализа следует, что описанные системы неприменимы в качестве основы подсистемы визуализации для ТОС. Было принято решение использовать в составе ТОС инструменты с открытым исходным кодом.

В настоящее время технология рир-проекции (кеинг) применяется при создании

детализированных виртуальных трёхмерных сред. Основной идеей технологии кеинга является выделение объекта с однородного фона при помощи маски, содержащей информацию о прозрачности фрагментов изображения. В компьютерной графике маска является изображением с одним каналом, т. н. «альфа каналом». Проанализированы существующие методы рир-проекции и выявлены особенности каждого метода:

- luma-кеинг прост в реализации, но образует острые грани у выделенного объекта, для сглаживания которых требуется размытие или другие техники обработки граней;
- хромакеинг может быть применим с использованием любого выбранного цвета фона, однако требует точной калибровки источников света для получения равномерного освещения фона и устранения теней;
- 3D кеинг характеризуется малым числом параметров обработки, обеспечивающий точную настройку обрабатываемых цветов с помощью произвольных трёхмерных фигур, но может быть сложен в реализации;
- Z-кеинг позволяет определять объект по глубине изображения, независимо от цвета объекта и качества освещения, но также требуется дополнительное оборудование для записи и обработки сигнала;
- кеинг с использованием температуры объекта обеспечивает выделение объекта переднего плана независимо от цвета объекта и качества освещения, но некорректно обрабатывает некоторые детали, например волосы, которые не будут правильно выделены из фонового изображения. Также требуется дополнительное оборудование для записи и обработки сигнала.

Проведенный анализ показывает ряд преимуществ 3D кеинга перед другими методами рир-проекции.

Во второй главе приводится разработанная автором архитектура автоматизированной системы обучения (АСО). Приводятся общие требования к архитектуре информационных систем. Описаны разработанные компоненты архитектуры и их взаимосвязи.

Предложенная архитектура системы АСО состоит из: ядра системы, содержащего базовые компоненты, необходимые для работы системы; подсистем, отвечающих за определенные функции (рендеринг, воспроизведение мультимедиа материалов, анимацию и т.д.); интерфейса взаимодействия, обеспечивающего связь различных

компонентов ядра и подсистем между собой; графического интерфейса пользователя, управляющего функциональностью системы через интерфейс взаимодействия. Основные компоненты архитектуры приведены на рис. 1.

Отличительной особенностью разработанной архитектуры является наличие функциональных элементов обеспечивающих одновременное воспроизведение нескольких разнородных видеоматериалов высокой четкости, в том числе потоковых, а также реализацию рир-проекции. Также преимуществами разработанной архитектуры является модульность, низкая связность между элементами системами и разделение ответственности подсистем. Следствием подобной организации архитектуры является ее масштабируемость и меньшее число ошибок при внесении изменений в существующую функциональность.

Ядро содержит базовые компоненты, на которых строится функциональность всей системы. Менеджер ресурсов отвечает за поиск, загрузку ресурсов и их передачу другим компонентам системы. Менеджер позволяет работать с такими типами ресурсов, как аудио файлы, видео файлы, изображения, файлы сценариев, текстовые файлы, файлы с информацией о виртуальной сцене (геометрия, материалы, шейдеры и т.д.). Для более эффективного управления ресурсами применяется счетчик ссылок на ресурс. Менеджер обеспечивает, чтобы ресурсы были загружены только один раз и в последствие использовались повторно. Существует возможность сбора мусора для выгрузки и удаления всех неиспользуемых ресурсов.

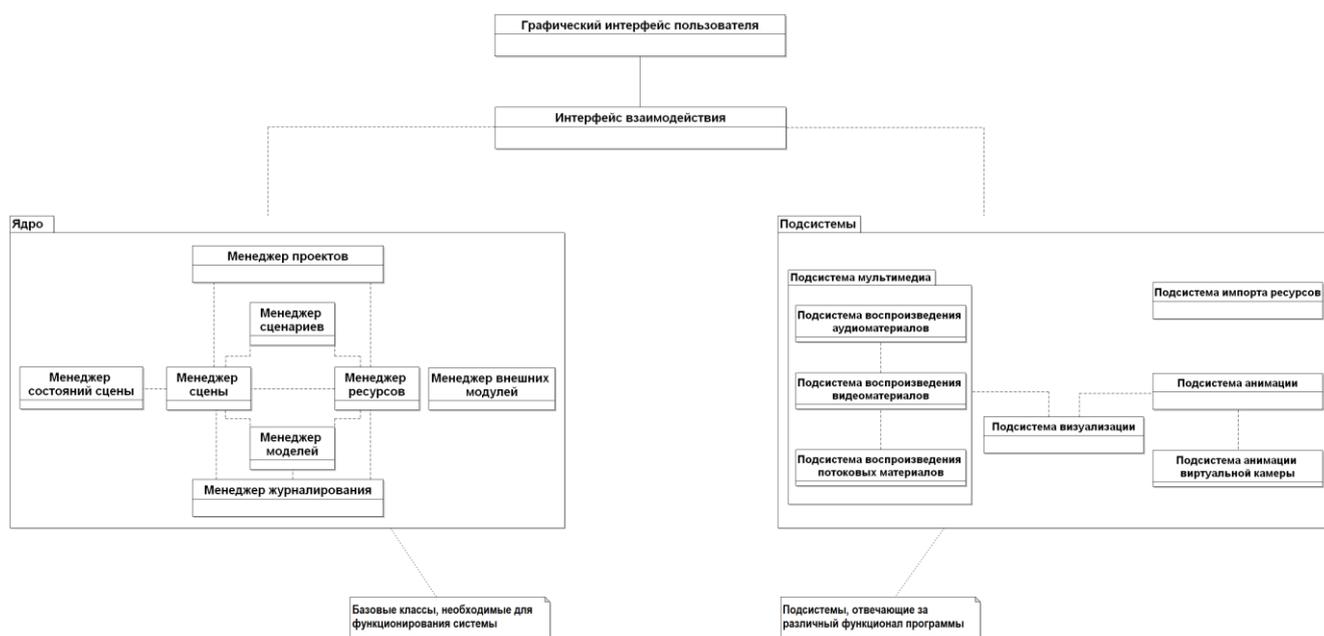


Рис. 1. Предложенная архитектура АСО

Менеджер сцены обеспечивает работу с узлами различных типов виртуальной трехмерной сцены. Основными типами являются: камера, источник света, геометрическая модель, группа объектов. Другие абстрактные сущности, такие как материалы, представлены как свойства узлов. Данный подход позволяет сократить количество узлов в графе и повысить производительность операций над деревом.

Менеджер сценариев позволяет задавать работу АСО при помощи программируемых сценариев, создаваемых на динамическом языке программирования. Применение динамических языков дает возможность реализовывать алгоритмы в пользовательских сценариях, например, расчет динамических воздействий на основе физических законов на объекты трехмерной сцены.

Менеджер проектов осуществляет создание, загрузку и сохранение проектов АСО. В проекте сохраняются параметры системы, в том числе ссылки на используемую виртуальную трехмерную сцену и пользовательские данные.

Для расширения базовой функциональности АСО используются подсистемы. На данный момент существуют подсистемы импорта ресурсов, визуализации, мультимедиа и анимации.

В третьей главе приводится разработанная архитектура подсистемы визуализации. Для реализации требований к подсистеме, разработаны методы анимации виртуальной камеры, а также формат хранения анимационных данных камеры. Кроме того предлагается технология отображения изображений с частичной прозрачностью в виртуальном трехмерном окружении.

Архитектура подсистемы визуализации состоит из графического модуля, являющегося ядром подсистемы, и расширений, отвечающих за работу с анимацией камеры и полупрозрачными изображениями, разработанных автором.

Для обеспечения возможности анимации виртуальных камер автор модернизировал алгоритм импорта графических ресурсов в графический модуль с целью создания файла анимации камеры, а также разработал алгоритмы и программный модуль управления и воспроизведения анимации.

Алгоритм основан на методах ключевой анимации (рис. 2.). Задаются номера начального и конечного кадров анимации камеры, а также скорость их воспроизведения. Если запрашиваемый сегмент выходит за границы массива кадров анимации, в т.ч. хотя

бы одна из границ сегмента меньше нуля, то анимация не воспроизводится. Скорость анимации задается в виде коэффициента, например, 0.5, 1, 1.3, 2.0 и т.д.

В отличие от большинства алгоритмов программируемой анимации камеры, разработанный алгоритм способен обрабатывать анимацию камеры не только в случае, когда последовательность воспроизводимых кадров возрастающая (например, воспроизведение анимации камеры с 0-го кадра по 60-й), но и в случае, когда последовательность является убывающей (с 60-го по 0-й). Данная функциональность позволяет избежать необходимости создания дополнительных кадров анимации камеры в приложениях трёхмерного моделирования.

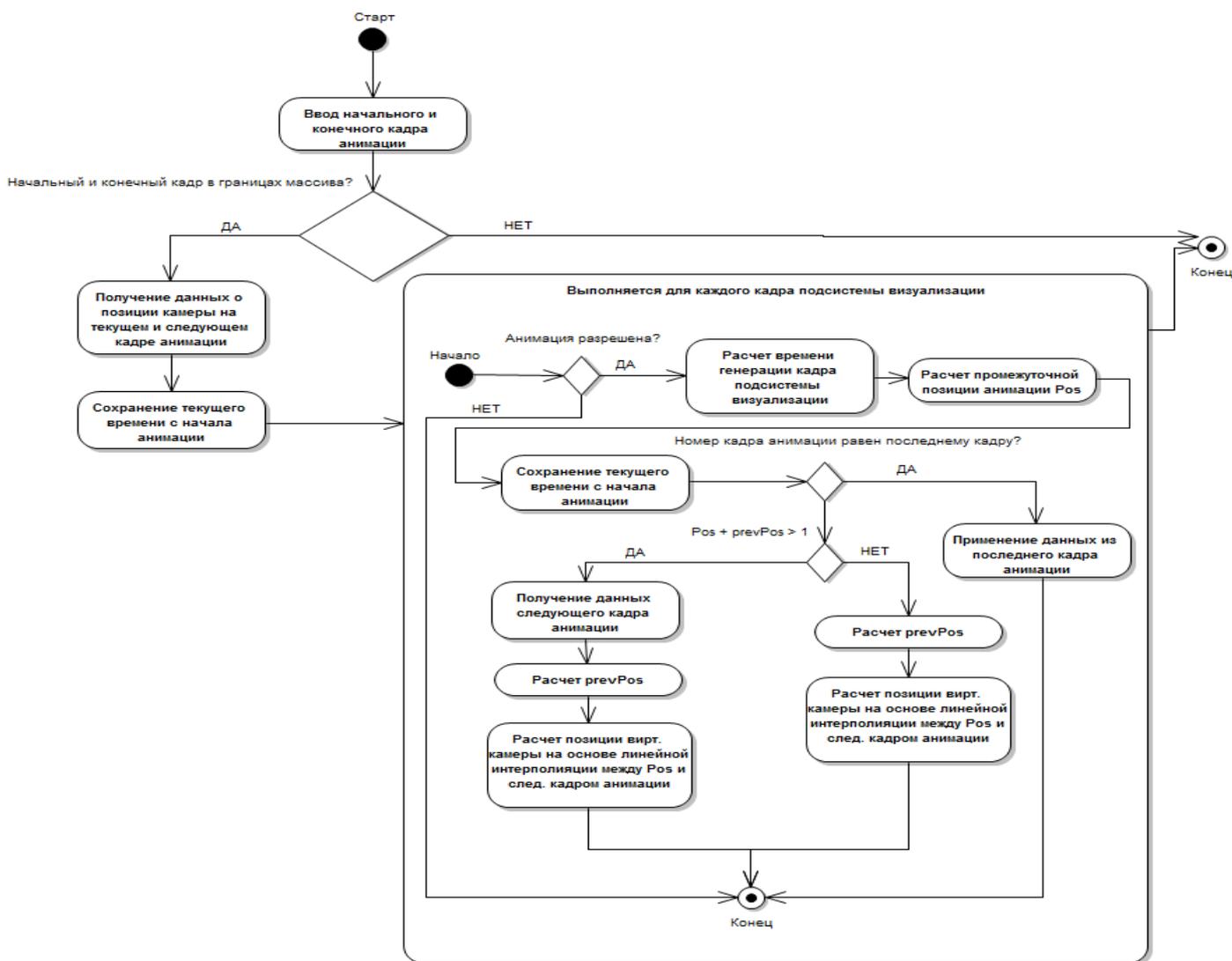


Рис. 2. Алгоритм анимации виртуальной камеры

Для отображения изображений с частичной прозрачностью, для каждого пикселя изображения обрабатывается цветовая информация из текстуры (значения цветовых компонент RGB), а также информация о прозрачности (альфа-канал). Альфа значение определяет уровень прозрачности пикселя. Минимальное значение битовой глубины

(всегда 0) указывает на абсолютную прозрачность, а максимальное значение, либо отсутствие альфа маски, указывает на полную непрозрачность. Расчет цвета результирующего пикселя выполняется по следующей формуле:

$$P_R = P_B (1 - A) + P_F A, \quad (8)$$

где  $P_R$  – цвет результирующего пикселя,  $P_B$  – цвет фонового пикселя,  $A$  – значение альфа,  $P_F$  – цвет накладываемого пикселя.

Для реализации технологии отображения изображений с частичной прозрачностью, автором был доработан базовый шейдер, используемый для визуализации трехмерных моделей. Результатом работы шейдера является измененный цвет каждого пикселя изображения. Кроме использования информации о прозрачности из альфа канала текстуры, значение прозрачности объекта может быть задано в материале трехмерного объекта в отрезке [0..1].

В четвертой главе приводятся методы и алгоритмы, позволяющие одновременно отображать несколько видеоматериалов высокой четкости на гранях объектов виртуальной трехмерной сцены, как из файлов, так и потоковых источников, таких как видеорекамеры или моделирующие комплексы. Описан разработанный метод хромакеинга, обеспечивающий обработку поступающих изображений с использованием вычислительных ресурсов графической карты. Описывается разработанная архитектура воспроизведения мультимедийных материалов в трехмерном виртуальном окружении.

Воспроизведение видеоматериалов внутри виртуальной трехмерной сцены является сложной задачей, так как необходимо учитывать факторы, не актуальные при воспроизведении в медиаплеерах. Графическая подсистема должна визуализировать трехмерную сцену с приемлемой частотой кадров (не менее 25 кадров в секунду), и должна быть способна при этом реагировать на внешние воздействия, в том числе на изменения параметров трёхмерной сцены или загрузку дополнительных объектов.

Разработанная автором архитектура подсистемы воспроизведения мультимедиа материалов позволяет декодировать и отображать одновременно несколько видео высокой четкости в трехмерной сцене. Состав архитектуры включает: декодер видео, в котором происходит декодирование видео и аудио пакетов; подсистема воспроизведения декодированного звука; управляющая структура, необходимая для запуска видео, паузы воспроизведения, выставления громкости воспроизводимого видео и т.д.; интерфейс

взаимодействия с движком, необходимый для обновления видеокадров; интерфейс управления графической подсистемой.

Декодер состоит из трёх независимых частей:

- блок получения пакетов из файла или внешнего источника, их демультиплексирование (при необходимости) и сортировка видео- и аудио пакетов по соответствующим очередям
- блок декодирования видеопакетов
- блок декодирования аудиопакетов

Каждая независимая часть декодера работает в собственном потоке. Использование многопоточности позволяет значительно повысить производительность подсистемы декодирования при использовании многоядерного процессора.

Общая диаграмма работы, созданного автором декодера, представлена на рис. 3.

Обновление видеотекстуры в подсистеме визуализации происходит в основном потоке программы (потоке рендеринга). Каждый кадр подсистемы визуализации происходит проверка – следует ли обновлять видеотекстуру в трёхмерной сцене или нет. Если обновление требуется, то видеокадр берётся из очереди декодированных кадров и помещается в память видеокарты в качестве текстуры, которая может быть наложена на поверхность любого трёхмерного объекта (рис. 4).

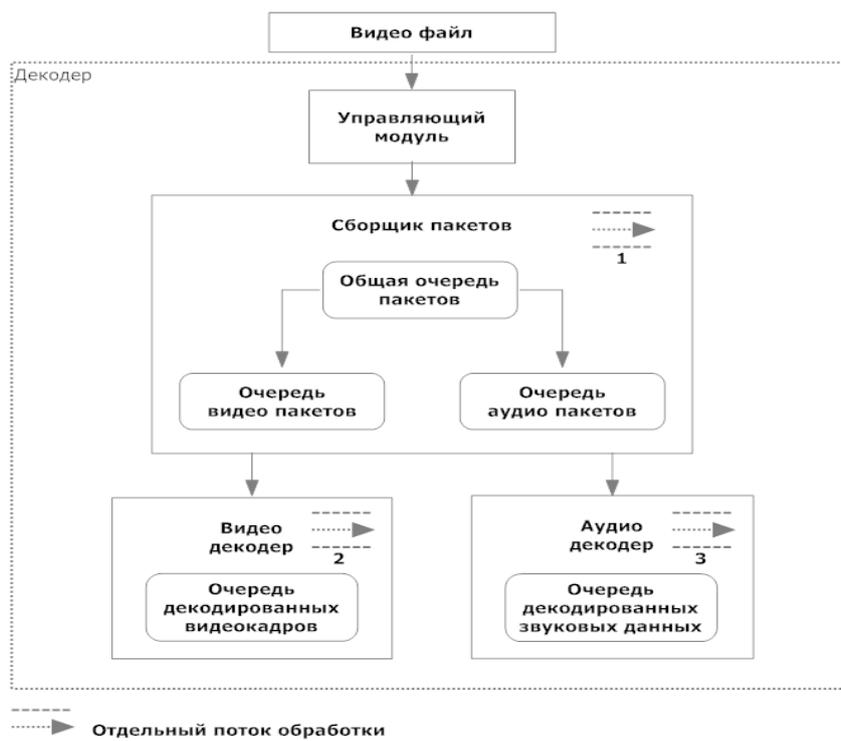


Рис. 3. Общая диаграмма работы декодера видео файла

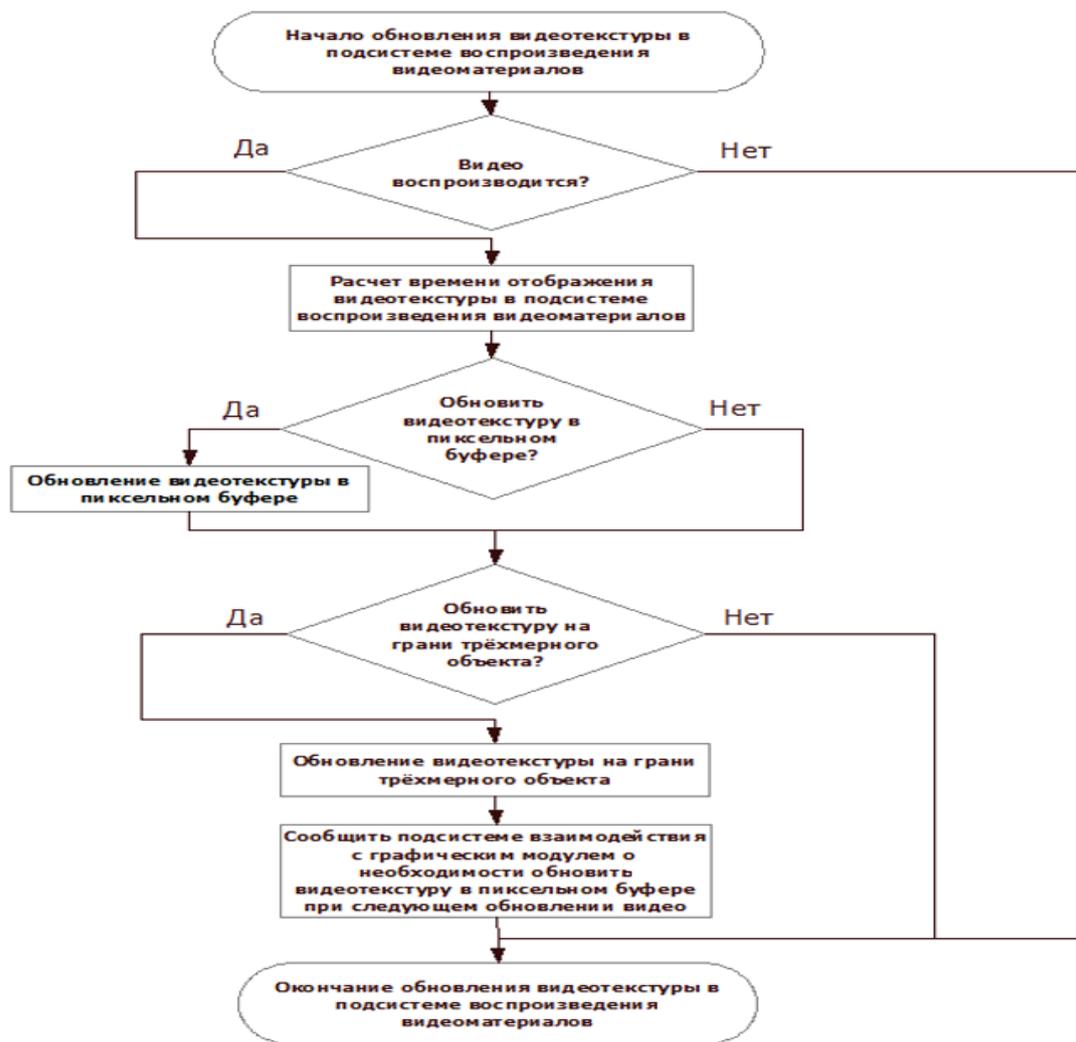


Рис. 4. Алгоритм обновления видеоматериала

Для определения необходимости обновления видеоматериала в подсистеме визуализации решается следующее неравенство:

$$TS - I_V \frac{1}{F} \leq \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (TF_i) - I_V \frac{1}{F}, \quad (9)$$

где  $TS$  - время с начала воспроизведения видео,  $I_V$  - количество обработанных кадров видеоматериала,  $F$  - частота кадров воспроизводимого видео,  $TF_i$  - время генерации одного кадра подсистемы визуализации.

Серьёзной проблемой при воспроизведении видеоматериалов в подсистеме визуализации стало снижение производительности при воспроизведении видео разрешением 1280 на 720 и более. Причина снижения производительности – время загрузки одной видеотекстуры в память видеокарты, которое составляло от 15 до 20 миллисекунд. Было проанализировано и опробовано несколько методов обновления видеотекстур в подсистеме визуализации. Результаты измерения производительности

подсистемы визуализации с использованием различных методов показаны на рис. 5.

Описанные методы и алгоритмы применимы для воспроизведения одного видео с разрешением вплоть до 1920 на 1080 (FullHD) в подсистеме визуализации, либо нескольких видео с разрешением не выше 720 на 576 (576p, SD).

Однако они не применимы для одновременного воспроизведения нескольких видео высокой чёткости из-за значительного падения производительности.

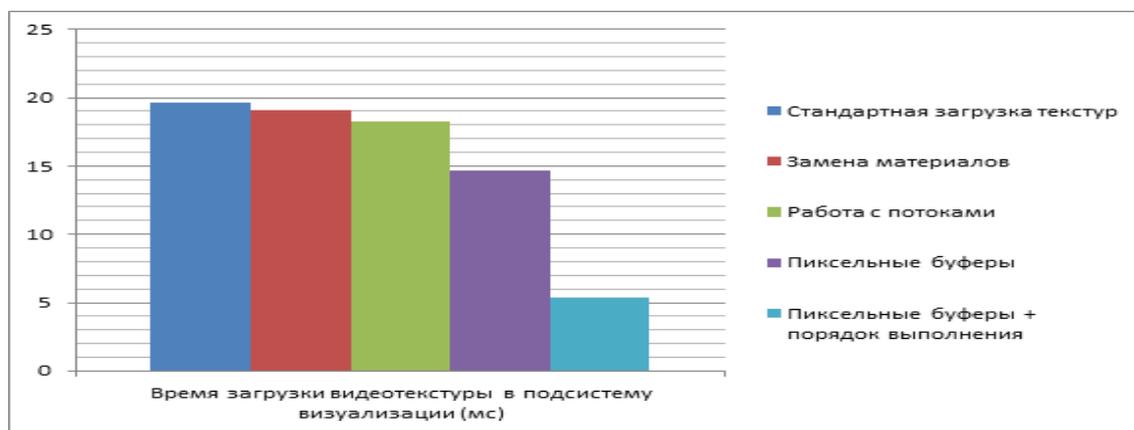


Рис. 5. Сравнение времени загрузки видеотекстуры для различных методов обновления

Автором выдвинута гипотеза о причинах значительного снижения производительности. Видеокарта не успевает обработать поступающие команды. По сути, процесс рендеринга изображения является конвейером. Процессор асинхронно задает команды видеокарте, которая сохраняет команды в очередь и последовательно их выполняет. Существуют некоторые команды, которые могут вызвать синхронизацию процессора и видеокарты, т.е. ситуацию, когда одно устройство будет ожидать другое. Основными командами, способными вызвать синхронизацию, являются команды получения данных из видеопамати и загрузки новых данных в видеопамать. Для того, чтобы получить данные из видеопамати или загрузить новые данные, видеокарте необходимо выполнить все стоящие в очереди задачи, в тоже время, центральный процессор ожидает, пока они будут выполнены. Соответственно, данная задержка ведет к снижению производительности подсистемы визуализации. В случае с обновлением видео, конвейер видеокарты мог не успевать выполнить операцию по смене кадров. Так как данная операция является асинхронной, а обработка команд внешних устройств и трансформация сцены может занимать незначительное время (около одной миллисекунды), то перед загрузкой новых данных в видеопамать, видеокарте приходилось выполнять операцию по смене кадра. В то же время, после рендеринга кадра видеокарта в большинстве случаев оказывается свободной до операции смены

кадра. Следуя этой гипотезе, автором разработан метод, позволивший получить требуемую производительность при воспроизведении нескольких видео высокой чёткости, основанный на применении приоритетов к обновлению воспроизводимых видео файлов.

Для каждого видео применяется весовой коэффициент, отражающий общий приоритет видео и весовой коэффициент выполняемого действия. Общий приоритет видео основывается на разрешении видео – чем ниже разрешение видео, тем выше приоритет, так как видео меньшего размера обновляется быстрее. Существует три общих приоритета видео – высокий (8), средний (4), низкий (0). Для видео с разрешением до 720 на 576 выставляется высокий приоритет, до 1280 на 720 - выставляется средний приоритет, для видео с разрешением до 1920 на 1080 выставляется низкий приоритет. Весовой коэффициент выполняемой операции меняется каждый раз при обновлении видео в зависимости от действия, которое необходимо будет выполнить при следующей итерации подсистемы визуализации. Выполняемые операции имеют следующие весовые коэффициенты (обновление видеотекстуры имеет наибольший коэффициент): обновление видеотекстуры (3), обновление видеотекстуры и пиксельного буфера (2), обновление пиксельного буфера (1), исключение видео (0). Операция «исключение видео» выполняется в случае, когда на следующей итерации подсистемы визуализации нет необходимости обновлять видеотекстуру, а также все пиксельные буферы заполнены. Видео исключается из списка обновляемых, однако весовой коэффициент выполняемого действия меняется на высший для того, чтобы состояние видео было проверено на следующей итерации подсистемы визуализации.

Список обновляемых видео определяется на каждой итерации подсистемы визуализации. На основе общего приоритета видео и весового коэффициента выполняемого действия, определяется позиция видео в списке обновления.

Воспроизведение потоковых видеоматериалов отличается от воспроизведения видеоматериалов, хранящихся в виде файлов. Основной задачей при воспроизведении потоковых видеоматериалов является достижение наименьшей задержки между получением информации с внешнего устройства и отображением уже преобразованной информации. Таким образом, использование технологии кэширования данных в оперативной памяти, которая применяется при воспроизведении видеоматериалов из

файлов для обеспечения плавности воспроизведения, в значительной степени ограничено либо вовсе неприменимо при воспроизведении потоковых видеоматериалов.

Поток данных с внешнего устройства (с видеокамеры) представляет собой поступающие с равной периодичностью массивы данных одинакового размера (пакеты). Зачастую поток данных, приходящий с видеокамеры, совмещает в себе звуковую и видеоинформацию. Такой поток называется мультиплексированным. Как формат DV, так и формат Mpeg 2 передают свои данные мультиплексированными. Для их воспроизведения сначала необходимо демуплексировать поступающую информацию, т.е. произвести разделение видео и аудио данных на отдельные пакеты.

Разработанные методы воспроизведения потоковых видеоматериалов позволяют осуществлять захват данных с внешних устройств и осуществлять их воспроизведение на операционных системах Windows, Linux, MacOS X. Для захвата данных с внешних устройств на платформе Windows был создан фильтр захвата данных. Разработанный фильтр состоит из трёх основных частей: вход фильтра, который принимает данные с видеокамеры; интерфейс фильтра, позволяющий настраивать работу фильтра; выход фильтра, с которого происходит получение пакетов, полученных с камеры, приложением. Фильтр способен хранить до 20 поступивших с камеры пакетов. При превышении этого порога наиболее старый пакет удаляется из очереди.

Метод кеинга, реализованный в подсистеме визуализации ТОС, базируется на методе 3D кеинга. Первой проверкой является сравнение компонентов цвета пикселя друг с другом. Каждая компонента цвета представляется в диапазоне от 0 до 255. Рассмотрим случай, когда базовой является компонента зеленого цвета (т.е фон, на котором снимается объект, зеленый). Осуществляем проверку на преобладание зеленой компоненты цвета пикселя над остальными, то есть  $(G > R)$  и  $(G > B)$ . Однако данный подход подвержен ошибкам, например, если  $G = x$ ,  $R = x - 1$  и  $B = x - 1$ , то данный цвет является оттенком серого. По выше указанному критерию данный пиксель будет считаться не принадлежащим объектам переднего плана, что неверно. Одним из способов повышения точности выбора пикселей с преобладающей зеленой компонентой является введение параметра дистанции (10).

$$d = \sqrt{(G - R)^2 + (G - B)^2}, d > d_{max}, \quad (10)$$

где  $d$  - дистанция, определяющая степень преобладания зеленой компоненты пикселя над остальными;  $G$  - зеленая компонента пикселя;  $R$  - красная компонента пикселя;  $B$  - синяя компонента пикселя;  $d_{max}$  - дистанция, задаваемая пользователем, свыше которой пиксели признаются фоном.

Если условие  $d > d_{max}$  выполняется, то пиксель не принадлежит объектам переднего плана и, соответственно, должен быть прозрачным в итоговом изображении.

Генерируемая маска прозрачности позволяет задавать частичную прозрачность пикселя изображения. При объединении обработанного кеингом изображения с изображением, генерируемым подсистемой визуализации, итоговый пиксель будет являться линейной интерполяцией цвета пикселей двух изображений, а рассчитанное значение альфа будет выступать в качестве параметра (рис. 6).

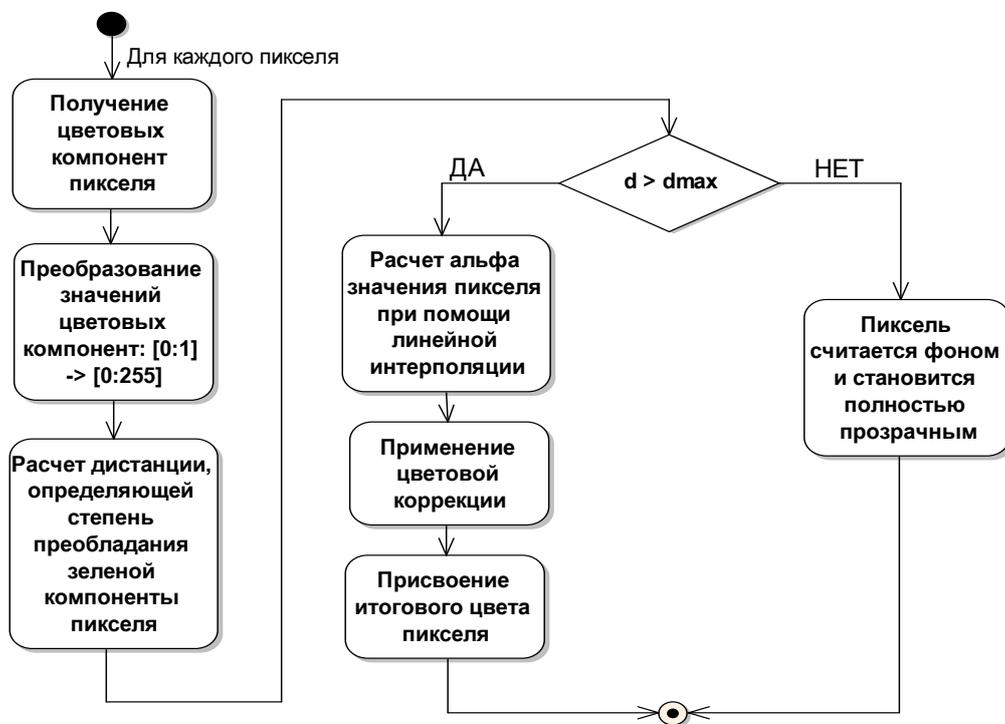


Рис. 6. Разработанный метод кеинга, реализованный в виде алгоритма

Зачастую по краям объектов переднего плана видны цветовые артефакты, присутствующие из-за отражения света от фона. Например, в области попадания отраженного света значение зеленой компоненты пикселя оказывалось меньше, чем значение красной компоненты, соответственно, такой пиксель признавался принадлежащим объектам переднего плана. Такие цвета близки к светло-желтому, поэтому хорошо заметны на коже актера. Для преодоления данной проблемы применяется цветокоррекция. Пользователь выставляет пороговые значения, на основе

которых алгоритм проверяет необходимость выполнения цветокоррекции для данного пикселя:

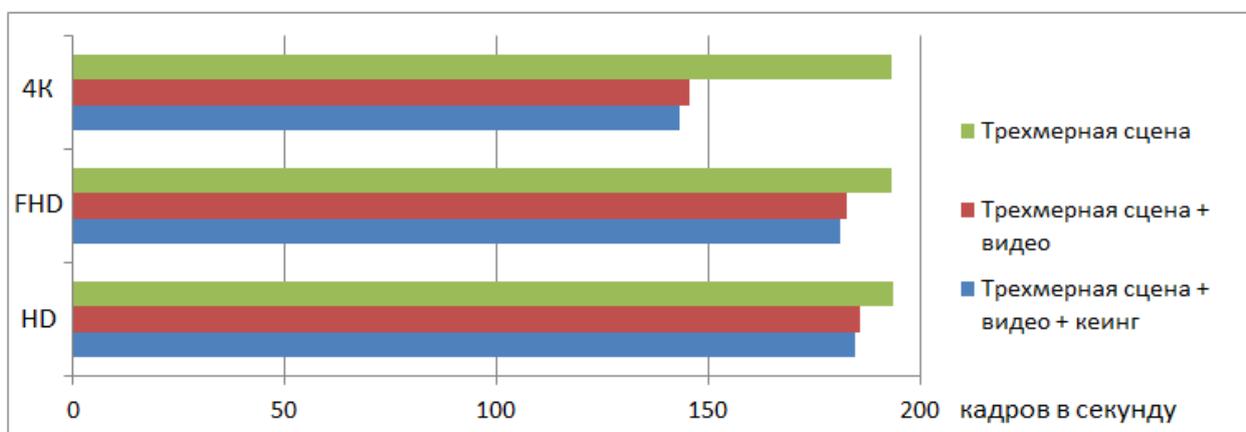
$$P_G = \frac{P_R + P_B}{2}, \quad (11)$$

где  $P_G$  – зеленая компонента пикселя,  $P_R$  – красная компонента пикселя,  $P_B$  – синяя компонента пикселя

Метод кеинга реализован автором в виде GLSL шейдера, выполняемого при помощи видеокарты и внедрен в разрабатываемую подсистему визуализации. Определение влияния реализации алгоритма на производительность подсистемы визуализации было произведено на видеоматериалах с разрешениями 1280\*720 (HD), 1920\*1080 (FullHD), 3840\*2160 (4K). Результаты приведены на рис. 7.

Полученные результаты показывают, что влияние работы шейдера хромакеинга на частоту кадров подсистемы визуализации незначительно и составляет доли процента. Применение разработанного решения в большинстве случаев позволит отказаться от использования дорогостоящих аппаратных реализаций хромакеинга.

В пятой главе приведены методы взаимодействия пользователя с виртуальным окружением с помощью программируемых сценариев. Произведено описание существующих технологий программируемых сценариев и применяемых для этого динамических языков программирования. Представлена разработанная модель языковой структуры программируемых сценариев, описаны виды хранения информации в модели, обрабатываемые команды и варианты взаимодействия пользователя с моделью языковой структуры.



*Рис. 7. Влияние разработанной реализации хромакеинга на производительность подсистемы визуализации*

Одним из основных методов взаимодействия пользователя с АСО является использование программируемых сценариев. Пользователь создаёт сценарии, в которых определяет алгоритмы взаимодействия компонентов системы между собой и системы в целом. Например, сценарий может содержать алгоритмы для моделирования режимов работы сложных технических комплексов, в том числе отказов оборудования.

Модель языковой структуры является основой для функциональности программируемых сценариев. Основной составляющей модели является узел или элемент. Элемент содержит имя, текст, а также любую дополнительную пользовательскую информацию. Элементы также содержат данные о родительском и дочерних узлах, что позволяет выстраивать иерархию узлов в необходимом формате.

Модель языковой структуры также получает данные от других моделей, используемых в СПП. Данные из других моделей используются в качестве значений параметров команд управления. При обновлении любой из моделей в СПП происходит передача новых данных в модель языковой структуры. После этого модель языковой структуры обновляет значения параметров в командах управления.

Данные из модели языковой структуры могут также использоваться для облегчения процесса ввода команд пользователем. Например, данные могут использоваться для графического выделения или вывода подсказок для вводимых пользователем команд.

Во время разработки курса теоретической подготовки промышленно-производственного персонала по обследованию и диагностике щеточно-контактных аппаратов (ЩКА) турбогенераторов (ТГ) ГРЭС использовались разнородные материалы: трехмерные модели с высокой детализацией, чертежи, фотографии и видеоматериалы для изучения конструктивного и технологического состава ЩКА ТГ. В состав материалов курса были включены термограммы, гистограммы, схемы охлаждения для демонстрации методов обследования ЩКА. Для подготовки теоретического курса применяется персональный компьютер с операционной системой Windows или Linux с разработанным программным комплексом. Для внедрения динамического изображения инструктора в виртуальную трехмерную сцену применяется созданная архитектура подсистемы воспроизведения мультимедийных материалов и методы воспроизведения потоковых мультимедиа материалов, обеспечивающие получение и отображение данных

с внешних источников с минимальной задержкой. Выделение изображения инструктора с однородного фона и его внедрение в виртуальную трехмерную сцену производится при помощи разработанного метода хромакеинга. Порядок действий, выполняемых автоматизированной обучающей системы, задается при помощи разработанного метода управления с использованием программируемых сценариев. Разработанные новые методы и алгоритмы применялись в ООО «ЭФ-КОНТЭЛ» в 2015-2016 годах при проведении обучения персонала предприятий электроэнергетики по обследованию и диагностике ЩКА ТГ ТВВ-160 ГРЭС.

При реализации результатов работы обеспечена возможность использования в курсах подготовки промышленно-производственного персонала разнородной мультимедийной информации в т.ч. данных интерактивных моделирующих комплексов, поступающих в режиме реального времени. Применение программируемых сценариев позволило сократить время на подготовку курса за счет оперативного изменения виртуальной трехмерной сцены при внесении коррекций в сценарий, а также методов оптимизации ввода правил в систему. С учетом того, что обработка мультимедийных материалов происходит в режиме реального времени, обеспечена возможность коммуникации инструктора и обучаемого персонала промышленного предприятия с территориально-распределённой структурой.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе содержится решение важной научной задачи разработки методов и алгоритмов визуализации, трансформации и анализа информации в режиме реального времени в тренажерно-обучающих системах промышленного применения. Лично автором лично получены следующие результаты:

- разработаны методы и алгоритмы, позволяющие одновременно воспроизводить несколько видеоматериалов высокой четкости с разрешением 4К в виртуальном трёхмерном окружении, при поддержании частоты смены кадров подсистемы визуализации не ниже 25;
- представлены методы воспроизведения потоковых мультимедиа материалов в виртуальном трехмерном окружении, обеспечивающие прием данных с различных устройств, таких как видеокамеры, платы захвата, звуковые карты и др.;

- создан метод хромакеинга, позволяющий выделять объекты переднего плана из однородного фона, реализация которого не требует узкоспециализированных аппаратных устройств. Метод использует цветокоррекцию для устранения засветки на краях объектов переднего плана и оптимизирован для использования мощностей современных видеокарт;
- разработана архитектура подсистемы визуализации, обеспечивающая генерацию изображений в реальном времени (не менее 25 кадров в секунду), работу на нескольких платформах (Windows, Linux, Macintosh), имеющая небольшое число связей с внешними модулями. Следствием подобной организации архитектуры является ее масштабируемость и меньшее число ошибок при внесении изменений;
- создана архитектура подсистемы воспроизведения мультимедийных материалов, позволяющая отображать разнородные материалы на гранях трехмерных объектах синтезированного виртуального окружения;
- разработана модель языковой структуры программируемых сценариев, обеспечивающая взаимодействие пользователя с тренажерно-обучающей системой. Данные из модели языковой структуры также используются для оптимизации процесса ввода команд пользователем - для выделения синтаксических конструкций текста и подстановки ключевых слов и данных;
- новые методы, алгоритмы и программные модули, изложенные в диссертации, использованы ООО «ЭФ-КОНТЭЛ» в период 2015-16 гг. при проведении обучения персонала предприятий электроэнергетики по обследованию и диагностике щеточно-контактных аппаратов турбогенераторов ТВВ-160 ГРЭС.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в журналах из перечня ВАК:**

1. Гиацинтов А.М., Мамросенко К.А. Управление тренажерно-обучающими системами при помощи программируемых сценариев // Вестник компьютерных и информационных технологий.- 2016. -№ 5.- С. 52–56.
2. Гиацинтов А.М. Метод формирования управляющих воздействий в системах предтренажерной подготовки // Энергетик. -2015. -№ 4.- С. 27–28.
3. Гиацинтов А.М., Мамросенко К.А. Метод рир-проекции в подсистеме визуализации тренажерно-обучающей системы // Программные продукты и системы. -2014. -№ 4.- С. 31–37.

4. Гиацинтов А.М., Мамросенко К.А. Воспроизведение потоковых видеоматериалов в подсистеме визуализации тренажерно-обучающей системы // Программная инженерия. - 2014. -№ 7.- С. 33–39.
5. Гиацинтов А.М. Отображение разнородных видеоматериалов на гранях трехмерных объектов в подсистеме визуализации тренажерных обучающих систем // Программные продукты и системы. -2012. -№ 3.- С. 80–86.
6. Гиацинтов А.М., Мамросенко К.А. Одновременное воспроизведение разнородных видеоматериалов в виртуальной сцене в подсистеме визуализации ТОС // Информационные ресурсы России.- 2012. -Т. 4.- С. 25–28.
7. Гиацинтов А.М., Мамросенко К.А. Методы анимации виртуальной камеры и отображения объектов с частичной прозрачностью в тренажерно-обучающих системах // Информационные ресурсы России. -2011.- № №6 (124).- С. 31–34.

Другие публикации:

8. Полевой Н.М., Гиацинтов А.М. Требования к компоненту визуализации виртуального окружения в имитационных системах // Автоматика и программная инженерия. -2016. - № 3.- С. 34–39.
9. Мамросенко К.А., Гиацинтов А.М. Технические средства обучения при подготовке специалистов радиоэлектронной промышленности // Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение /Сб. тр. 2-ой Российско-Белорусской научно-технической конференции имени О. В. Лосева. - Нижний Новгород: ННГУ им. Н. И. Лобачевского.- 2015. - С. 460–462.
10. Гиацинтов А.М., Мамросенко К.А., Решетников В.Н. Инструментальные средства предтренажерной и тренажерной подготовки операторов сложных технических систем // Программные продукты, системы и алгоритмы. -2014. -№ 1.- <http://swsys-ru/simulator-training-operators.html>.
11. Giatsintov Alexander, Mamrosenko Kirill, Reshetnikov Valeriy. Playback of heterogeneous videos in 3d environment in e-learning systems // Proceedings International Conference Southeast Asian In the 21 Century Open and Distance Learning. Danang, Vietnam: In Savina, - 2012. -С. 29–37.