

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
прикладной математики и  
информатики**

**А.М. Райгородский**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Математические основы 3D-визуализации
<b>по направлению:</b>	Прикладная математика и информатика
<b>профиль подготовки:</b>	Информатика
	Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики
	кафедра технологий цифровой трансформации
<b>курс:</b>	3
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 5 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: В.О. Афанасьев, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры технологий цифровой трансформации 25.03.2021

## Аннотация

Теоретические и практические знания в области математических основ и алгоритмов компьютерной графики, позволяющие осуществлять разработку математического и программного обеспечения интерактивных систем реалистичной 3D-визуализации.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

сформировать теоретические и практические знания в области математических основ и алгоритмов компьютерной графики, позволяющие осуществлять разработку математического и программного обеспечения интерактивных систем реалистичной 3D-визуализации (систем виртуальной реальности).

#### Задачи дисциплины

- овладение теоретическими основами методов и алгоритмов синтеза изображений;
- получение знаний в области описания, моделирования и визуализации поверхностей;
- освоение методов и алгоритмов моделирования распространения света в 3D-сценах;
- изучение оптико-геометрических основ стереовидения и стереовизуализации.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
	ОПК-4.3 Умеет составлять аннотации, рефераты, библиографические перечни и обзоры информации в области своей профессиональной деятельности
	ОПК-4.4 Владеет навыками работы с компьютером и компьютерными сетями с целью получения, хранения и обработки научной (технической, технологической) информации
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок
	ОПК-5.2 Обладает способностью к освоению новых знаний на основе изучения литературы, научных статей и других источников
	ОПК-5.3 Способен к профессиональной эксплуатации современной экспериментальной научно-исследовательской (измерительно-аналитической и технологической) аппаратуры
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели

новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Знает принципы построения научной работы, методы сбора и анализа полученного материала, способы аргументации
	ПК-2.2 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого научного коллектива
	ПК-2.3 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны  
знать:

- математический аппарат аффинных и аффинно-проективных преобразований;
- матрицы, матричные и векторные операции для основных классов параллельных проекций на плоскость;
- матрицы, матричные и векторные операции для перспективных преобразований и построения перспективных проекций на плоскость;
- особенности использования математического аппарата аналитической геометрии и линейной алгебры в задачах вычислений для синтеза изображений;
- формы описания и способы миграций между различными формами описания прямых и плоскостей в пространствах 2D и 3D;
- способы описания поверхности в контексте задачи 3D-визуализации;
- способы описания дифференциальных свойств поверхности применительно к вычислениям для 3D-визуализации;
- принципы и методы решения задачи восполнения поверхностей;
- существующие подходы (с описанием их достоинств и недостатков) к описанию геометрических 3D-примитивов;
- методы описания существующих разновидностей 3D-примитивов;
- подходы к представлению поверхностей с помощью массивов плоских полигональных ячеек;
- основные алгоритмы триангуляции поверхностей;
- основные сведения о сплайновых поверхностях;
- подходы, методы и алгоритмов удаления невидимых линий при формировании изображений поверхностей;
- ретроспективу развития подходов, методов и алгоритмов удаления невидимых линий при формировании изображений поверхностей;
- принцип действия и назначение растеризации;
- подходы к подавлению артефактов растеризации на границах областей (основные виды алгоритмов Брезенхэма);
- принципы работы, аппаратной поддержки, возможности, достоинства и недостатки алгоритма z-буфера;
- принципы работы, аппаратной поддержки, возможности, достоинства и недостатки алгоритмов трассировки лучей;
- современные представления об организации и аппаратной поддержке алгоритмов трассировки лучей;
- постановку и подходы к решению геометрической задачи трассировки неплоских поверхностей, в том числе заданных в параметрической форме;
- математические основы, подходы к реализации и возможности CSG-операций;
- математические основы описания структуры поверхностей виртуальных 3D-объектов;
- математические основы управления формой поверхностей виртуальных 3D-объектов;
- математические и физические основы расчётов освещённости и видимой яркости точек поверхностей в алгоритмах трассировки лучей;
- оптико-физические основы вычислений BRDF;
- существующие подходы к вычислениям BRDF;
- строение и особенности функционирования зрительного анализатора в целом;
- строение и особенности функционирования сенсорного отдела зрительного анализатора человека;
- подходы к построению редуцированных оптико-геометрических моделей камерного глаза и бинокулярной зрительной системы человека;
- современные представления о процессах формирования у человека объёмного образа окружающей среды на основе бинокулярного восприятия;
- принципы организации процессов визуализации виртуальных 3D-объектов непосредственно в объёме;
- принципы организации, основные возможности, достоинства и недостатки стереоскопической визуализации виртуальных 3D-объектов;
- артефакты моно- и стереоскопической визуализации;
- существующие и перспективные подходы к сепарации полей стереопары;
- принципы устройства и функционирования различных видов стереоскопического интерфейса;
- принципы построения оптико-геометрических моделей видеоинтерфейса с большим числом степеней свободы;
- подходы и основы методологии создания API для создания видеоинтерфейса с большим числом степеней свободы;
- подходы и основы методологии создания API для задач рендеринга;
- подходы и основы методологии создания API для задач моделирования поведения и реконструкции состояния сенсорного отдела зрительного анализатора;
- основы методологии ООП применительно ко всем основным задачам создания систем

уметь:

- применять формы описания и способы миграций между различными формами описания прямых и плоскостей в пространствах 2D и 3D;
- описывать поверхности в контексте задачи 3D-визуализации;
- описывать дифференциальные свойства поверхности применительно к вычислениям для 3D-визуализации;
- использовать методы решения задач восполнения поверхностей;
- применять основные алгоритмы триангуляции поверхностей; основные алгоритмы триангуляции поверхностей;
- применять описания сплайновых поверхностей;
- применять подходы, методы и алгоритмов удаления невидимых линий при формировании изображений поверхностей;
- применять ретроспективу развития подходов, методов и алгоритмов удаления невидимых линий при формировании изображений поверхностей;
- применять подходы к подавлению артефактов растеризации на границах областей (основные виды алгоритмов Брезенхэма);
- реализовать CSG-операций;
- вычислять BRDF;
- применять основы методологии ООП ко всем основным задачам создания систем 3D-визуализации;
- применять основы методологии ООП к задачам создания API для систем 3D-визуализации.

владеть:

- методами математического описания, управления формой и построения изображений проекций поверхностей 3D-объектов;
- методологией разработки математического и программного обеспечения графического ядра системы 3D-визуализации (системы рендеринга);
- методологией разработки математического и программного обеспечения стереоскопического видеоинтерфейса для интерактивных систем 3D-визуализации.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Математические основы методов и алгоритмов 3D-визуализации.	6	6		15
2	Описание, моделирование и 3D-визуализация поверхностей.	6	6		15
3	Структура поверхности 3D-объекта и управление её формой.	6	6		15
4	Моделирование распространения света в 3D-сценах и вычисление освещенности.	6	6		15
5	Оптико-геометрические основы стереовидения и стереовизуализации.	6	6		15
Итого часов		30	30		75
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

## 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 5 (Осенний)

### 1. Математические основы методов и алгоритмов 3D-визуализации.

Элементарные преобразования на плоскости (поворот, растяжение симметрия) и связанные с ними матрицы. Параллельный перенос. Ограниченность возможностей ортогональных преобразований 1-го рода. Однородные координаты. Аффинно-проективные преобразования на плоскости и в пространстве. Суперпозиция аффинно-проективных преобразований. Вращение 3D-объекта и связанные с ним матрицы. Углы Эйлера и Крылова и связанные с ними матрицы. Проецирование. Основные классы проекций на плоскость (ортографическая, косоугольная, аксонометрическая, перспективная проекции) и связанные с ними матрицы. Центральное проецирование на плоскость и перспективное преобразование. Матрицы одно-, двух- и трехточечных перспективных преобразований, и проецирования. Основные принципы программной реализации аффинно-проективных преобразований. Подходы к организации решетки классов для описания поверхности.

### 2. Описание, моделирование и 3D-визуализация поверхностей.

Каноническое определение поверхности и использование его в задачах 3D-визуализации. Визуализация явных и самопересекающихся поверхностей. Взаимосвязь подходов к определению поверхностей и принципов их 3D-визуализации. Принцип визуализации поверхностей, задаваемых неявными функциями. Определения нормали и касательной к поверхности в заданной точке и связанные с ними вычисления в алгоритмах 3D-визуализации. Ретроспектива подходов к описанию и моделированию 3D-примитивов. Общие сведения о сплайновых поверхностях. Полигональные сетки с плоскими ячейками. Триангуляция поверхностей. Триангуляция Делоне и диаграммы Вороного, и их двойственность. Алгоритмы триангуляции. Принципы визуализация поверхностей с удалением невидимых линий фрагментов и ретроспектива связанных с ними алгоритмов. Растеризация и алгоритмы Брезенхема. Алгоритм Z-буфера, его возможности и ограничения. Алгоритмы трассировки (прямой и обратной) лучей, их возможности и ограничения. CSG-операции и моделирование поверхностей на основе CSG-операций.

Составная полиморфная поверхность. Гибридные алгоритмы обратной трассировки лучей. Основные принципы программной реализации визуализации 3D-поверхностей. Подходы к организации решетки классов для описания поверхностей и вычислений для их визуализации.

### 3. Структура поверхности 3D-объекта и управление её формой.

Понятие структуры поверхности 3D-объекта. Иерархическая структура поверхности 3D-объекта и древовидный граф. Структурное дерево и связанный список. Взаимосвязь дерева структуры и кинематических систем 3D-объекта и их использование для управления формой 3D-объекта. Организация вычислений суперпозиции аффинно-проективных преобразований на основе дерева структуры поверхности. Иерархические структуры с переменным отношением порядка (RTR-деревья) и связанные RTR-списки. Моделирование поведения и взаимодействия 3D-объектов с изменением компонент связности и отношения порядка. Модели данных и подходы к программной реализации управления формой поверхности 3D-объектов.

### 4. Моделирование распространения света в 3D-сценах и вычисление освещенности.

Видимая точка поверхности и принципы организации вычислений для определения её яркости в алгоритмах Z-буфера и трассировки. Полная и частичная трассировка лучей. Световое дерево. Вычисления освещенности на основе алгоритмов Гуро и Фонга и их ограниченные возможности. Алгоритм тривиального расчёта освещенности на основе характеристик луча и свойств поверхности в видимой точке. Понятие BRDF (двунаправленная функция распределения отражений) и подходы к её вычислениям и табуляции. Приближённые вычисления BRDF на основе 3-х и 5-ти компонентных аддитивных функций освещенности. Возможности алгоритма обратной трассировки для решения прикладных задач, не связанных с оптикой (моделирование воздействия и защиты от воздействия высокоскоростных частиц различного происхождения на объекты сложной геометрической формы). Возможности алгоритма обратной трассировки для моделирования наблюдений с использованием оптических систем в различных областях спектра и средах распространения.

#### 5. Оптико-геометрические основы стереовидения и стереовизуализации.

Зрительное восприятие 3D-среды в естественных условиях и бинокулярное зрение. Подходы к моделированию условий объемного видения с использованием 2D- и 3D-носителей изображения. Зрительный анализатор человека и его основные отделы. Редуцированная оптико-геометрическая модель глаза человека. Стереоскопия и непосредственный вывод 3D-объектов. Стереопара. Существующие подходы к сепарации полей стереопары. Модель стереоскопа и её ограниченные возможности как бинокулярного видеоинтерфейса. Сходство и различия систем виртуальной реальности и стереовизуализации. Артефакты зрительного восприятия статических и динамических 3D-сцен (конфликт вергенции и аккомодации, искажения ракурсов, инверсия параллакса движения). Подходы к нейтрализации артефактов зрительного восприятия объема. Модели данных и подходы к программной реализации высокоточного стереоинтерфейса (видеопост, оптико-геометрическая, координатная и объектная модели видеопоста).

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, оснащенная мультимедийным проектором, экраном, доской (меловой или Whiteboard).

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Основы математического и программного обеспечения систем 3D-визуализации индуцированного виртуального окружения [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. О. Афанасьев, С. В. Клименко ; М-во образования и науки РФ ; Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т), Фак. высоких технологий и инноваций. — М. : МФТИ, 2014. — 241 с.

#### Дополнительная литература

1. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры [Текст] : учебник для вузов / Д. В. Беклемишев. — 8-е изд., перераб. — М. : Физматлит, 2000, 2001, 2002. — 376 с.

### 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. <http://www.exponenta.ru> – образовательный математический сайт.
2. <http://mathnet.ru> – общероссийский математический портал.
3. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
4. <http://benran.ru> – библиотека по естественным наукам Российской академии наук.
5. <http://www.i-exam.ru> – единый портал Интернет-тестирования в сфере образования.
6. <https://developer.nvidia.com> – портал поддержки разработчиков ПО 3D-визуализации.

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

В процессе самостоятельной работы обучающихся предполагается использование таких программных средств, как Microsoft Visual Studio, OpenGL, 3D-Studio MAX, Open Scene Graph, Blender и др.

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.

Самостоятельная работа включает в себя:

- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- подготовку к практическим занятиям, выполнение 3-х индивидуальных домашних заданий.

Промежуточный контроль знаний проводится в виде письменных опросов по теории. Кроме этого в ходе освоения курса студент должен выполнить проект, содержащий три задания с их последующей защитой.



## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

<b>по направлению:</b>	Прикладная математика и информатика
<b>профиль подготовки:</b>	Информатика Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики кафедра технологий цифровой трансформации
<b>курс:</b>	3
<b>квалификация:</b>	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 5 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	В.О. Афанасьев, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
	ОПК-4.3 Умеет составлять аннотации, рефераты, библиографические перечни и обзоры информации в области своей профессиональной деятельности
	ОПК-4.4 Владеет навыками работы с компьютером и компьютерными сетями с целью получения, хранения и обработки научной (технической, технологической) информации
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок
	ОПК-5.2 Обладает способностью к освоению новых знаний на основе изучения литературы, научных статей и других источников
	ОПК-5.3 Способен к профессиональной эксплуатации современной экспериментальной научно-исследовательской (измерительно-аналитической и технологической) аппаратуры
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Знает принципы построения научной работы, методы сбора и анализа полученного материала, способы аргументации
	ПК-2.2 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого научного коллектива
	ПК-2.3 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Математические основы 3D-визуализации» обучающийся должен:

**знать:**

- математический аппарат аффинных и аффинно-проективных преобразований;
- матрицы, матричные и векторные операции для основных классов параллельных проекций на плоскость;
- матрицы, матричные и векторные операции для перспективных преобразований и построения перспективных проекций на плоскость;
- особенности использования математического аппарата аналитической геометрии и линейной алгебры в задачах вычислений для синтеза изображений;
- формы описания и способы миграций между различными формами описания прямых и плоскостей в пространствах 2D и 3D;
- способы описания поверхности в контексте задачи 3D-визуализации;
- способы описания дифференциальных свойств поверхности применительно к вычислениям для 3D-визуализации;
- принципы и методы решения задачи восполнения поверхностей;
- существующие подходы (с описанием их достоинств и недостатков) к описанию геометрических 3D-примитивов;
- методы описания существующих разновидностей 3D-примитивов;
- подходы к представлению поверхностей с помощью массивов плоских полигональных ячеек;
- основные алгоритмы триангуляции поверхностей;
- основные сведения о сплайновых поверхностях;
- подходы, методы и алгоритмы удаления невидимых линий при формировании изображений поверхностей;
- ретроспективу развития подходов, методов и алгоритмов удаления невидимых линий при формировании изображений поверхностей;
- принцип действия и назначение растеризации;
- подходы к подавлению артефактов растеризации на границах областей (основные виды алгоритмов Брезенхэма);
- принципы работы, аппаратной поддержки, возможности, достоинства и недостатки алгоритма z-буфера;
- принципы работы, аппаратной поддержки, возможности, достоинства и недостатки алгоритмов трассировки лучей;
- современные представления об организации и аппаратной поддержке алгоритмов трассировки лучей;
- постановку и подходы к решению геометрической задачи трассировки неплоских поверхностей, в том числе заданных в параметрической форме;
- математические основы, подходы к реализации и возможности CSG-операций;
- математические основы описания структуры поверхностей виртуальных 3D-объектов;
- математические основы управления формой поверхностей виртуальных 3D-объектов;
- математические и физические основы расчётов освещённости и видимой яркости точек поверхностей в алгоритмах трассировки лучей;
- оптико-физические основы вычислений BRDF;
- существующие подходы к вычислениям BRDF;
- строение и особенности функционирования зрительного анализатора в целом;
- строение и особенности функционирования сенсорного отдела зрительного анализатора человека;
- подходы к построению редуцированных оптико-геометрических моделей камерного глаза и бинокулярной зрительной системы человека;
- современные представления о процессах формирования у человека объёмного образа окружающей среды на основе бинокулярного восприятия;
- принципы организации процессов визуализации виртуальных 3D-объектов непосредственно в объёме;
- принципы организации, основные возможности, достоинства и недостатки стереоскопической визуализации виртуальных 3D-объектов;
- артефакты моно- и стереоскопической визуализации;
- существующие и перспективные подходы к сепарации полей стереопары;
- принципы устройства и функционирования различных видов стереоскопического интерфейса;
- принципы построения оптико-геометрических моделей видеоинтерфейса с большим числом степеней свободы;
- подходы и основы методологии создания API для создания видеоинтерфейса с большим числом степеней свободы;
- подходы и основы методологии создания API для задач рендеринга;
- подходы и основы методологии создания API для задач моделирования поведения и реконструкции состояния сенсорного отдела зрительного анализатора;
- основы методологии ООП применительно ко всем основным задачам создания систем

**уметь:**

- применять формы описания и способы миграций между различными формами описания прямых и плоскостей в пространствах 2D и 3D;
- описывать поверхности в контексте задачи 3D-визуализации;
- описывать дифференциальные свойства поверхности применительно к вычислениям для 3D-визуализации;
- использовать методы решения задач восполнения поверхностей;
- применять основные алгоритмы триангуляции поверхностей; основные алгоритмы триангуляции поверхностей;
- применять описания сплайновых поверхностей;
- применять подходы, методы и алгоритмов удаления невидимых линий при формировании изображений поверхностей;
- применять ретроспективу развития подходов, методов и алгоритмов удаления невидимых линий при формировании изображений поверхностей;
- применять подходы к подавлению артефактов растеризации на границах областей (основные виды алгоритмов Брезенхэма);
- реализовать CSG-операций;
- вычислять BRDF;
- применять основы методологии ООП ко всем основным задачам создания систем 3D-визуализации;
- применять основы методологии ООП к задачам создания API для систем 3D-визуализации.

**владеть:**

- методами математического описания, управления формой и построения изображений проекций поверхностей 3D-объектов;
- методологией разработки математического и программного обеспечения графического ядра системы 3D-визуализации (системы рендеринга);
- методологией разработки математического и программного обеспечения стереоскопического видеоинтерфейса для интерактивных систем 3D-визуализации.

**3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

Перечень контрольных вопросов:

1. Ортогональные преобразования на плоскости и в 3D-пространстве (элементарные преобразования и их матрицы, композиция преобразований и формирование их матриц).
2. Основные классы проекций на плоскость и связанные с ними матричные преобразования.
3. Аффинные и аффинно-проективные преобразования и их матрицы.
4. Понятие несобственной точки на плоскости и её координатное представление.
5. Перспективная проекция и перспективное преобразование. Координаты несобственных точек и точек схода.
6. Формы описания прямой и плоскости. Миграция между формами описания прямой и плоскости.
7. Определение поверхности. Способы задания поверхности. Понятия точки поверхности, носителя точки поверхности и носителя поверхности. Эквивалентные отображения замыкания плоской области в  $R^3$ .
8. Неявная поверхность. Уравнения касательной плоскости и единичного вектора нормали для заданной точки неявной поверхности.
9. Задача восполнения поверхности. Подход к восполнению поверхностей. Триангуляция.
10. Сплайновые поверхности.
11. Триангуляция Делоне. Определение и основные свойства ТД.
12. Жадный алгоритм ТД и его свойства.
13. Диаграммы Вороного и ТД. Двойственность задачи ТД и ДВ.
14. Алгоритмы с предварительным упорядочиванием (плавающего горизонта, художника, сортировка граней с использованием BSP-деревьев).
15. Растеризация и её артефакты (для линий и границ областей).
16. Алгоритм Z-буфера. Его организация, достоинства и недостатки.
17. Алгоритм Брезенхэма для отрезков прямых на дискретном растре.

18. Алгоритм обратной трассировки лучей, его организация, достоинства и недостатки.
19. Полный алгоритм обратной трассировки лучей. Световое дерево.
20. Подмножество алгоритма обратной трассировки (Ray-Casting).
21. Подходы к снижению вычислительной нагрузки в алгоритме обратной трассировки.
22. Использование алгоритма отсекаателя Сайруса-Бека на плоскости и в пространстве для формирования ограничивающих объемов.
23. Отсекатель Сайруса-Бека как 3D-примитив.
24. Расчёт глобальной освещённости.
25. Понятие BRDF. Модели BRDF. Вычисления и измерения BRDF.
26. BRDF и её приближённое вычисление на основе 3-х и 5-ти компонентной аддитивной функции.
27. Трассировка плоских областей.
28. Трассировка неплоских примитивов.
29. Составить систему уравнений и схему алгоритма обратной трассировки плоского кольца.
30. Составить систему уравнений и схему алгоритма обратной трассировки сплошной сферы.
31. Составить систему уравнений и схему алгоритма обратной трассировки конической поверхности.
32. Принципы организации CSG-операций в алгоритме обратной трассировки.
33. Понятие составной полиморфной поверхности (СПП) и организация алгоритма её трассировки.
34. Сопоставление СПП и триангулянта (с точки зрения описания поверхности и организации алгоритмов трассировки и Z-буфера).
35. Понятия и определения «бинокулярная визуализация», «стереоскопическая визуализация».
36. Строение камерного глаза. Редуцированная модель камерного глаза. Оптико-геометрическая модель анатомического отдела бинокулярной зрительной системы человека.
37. Бинокулярная зрительная система и бинокулярный интерфейс визуализации.
38. Наиболее сложные и нерешённые проблемы стереоскопической визуализации (конфликт аккомодации и вергенции, искажения при 2D-визуализации 3D-объектов, инверсия параллакса).
39. Иерархическая структура 3D-объекта, её формирование и использование.
40. Декомпозиции и формообразование 3D-объекта на основе структурного дерева.
41. Рекурсивный обход дерева структуры и формулы ортогональных преобразований для координатных фреймов узлов дерева.
42. Структура и кинематическая система 3D-объекта. Основные принципы использования структуры 3D-объекта для управления его формой.
43. Иерархические структуры с переменным отношением порядка.
44. Представление обычных связанных списков и связанных RTR-списков средствами UML.
45. Инкапсулируемые свойства связанных списков при описании поверхности 3D-объекта.
46. Виртуальный RTR-список и принципы построения алгоритма его обхода.
47. Особенности выполнения операций «склейка» и «разбиения» на RTR-деревьях.
48. Принципы построения интерфейса и реализаций операций «склейка» и «разбиения» на RTR-деревьях.
49. Паттерны моделирования операций «склейка» и «разбиения» на RTR-деревьях.
50. Особенности программной реализации ортогональных преобразований на RTR-деревьях при изменении связности графа 3D-сцены
51. Принципы построения программного интерфейса ортогональных преобразований на RTR-деревьях при изменении связности графа 3D-сцены
52. Модель взаимодействия «клиент-сервер» для системы визуализации.
53. Архитектура и топология распределённой системы 3D-визуализации.
54. Основные фазы моделирования и формирования изображения виртуальной среды в распределённой системе 3D-визуализации.
55. Основные проблемы, возникающие при использовании транспортного протокола UDP в распределённой системе 3D-визуализации.
56. Модели данных для описания состояния виртуальных 3D-объектов. Особенности моделей данных для транспортировки состояния объектов «над протоколами» UDP и TCP.
57. Понятие кадра состояния виртуального 3D-объекта, основные классы для описания поведения виртуальных 3D-объектов.

58. Принципы организации протокола прикладного уровня для распределённой системы визуализации
59. Понятие регулярных и нерегулярных 3D-объектов и описание состояния в контексте протокола прикладного уровня для распределённой системы 3D-визуализации.
60. Управление состоянием регулярных и нерегулярных 3D-объектов и особенности их рендеринга.

Примеры экзаменационных билетов из 4-х вопросов

В каждом билете содержатся по 4 вопроса, при ответе на которые учащийся должен показать знания соответствующих тем (разделов) программы курса. Один из вопросов может иметь форму задачи.

Билет.

1. Формы описания прямой и плоскости в пространствах 2D и 3D. Миграция между формами описания прямой и плоскости.
2. Перспективная проекция и перспективное преобразование. Матрицы перспективного преобразования и перспективного проецирования. Координаты несобственных точек и точек схода.
3. Построить матрицу поворота вокруг оси, проходящей через точку  $A(a_1, a_2, a_3)$ , имеющую направляющий вектор  $(l, m, n)$  единичной длины для 3D-пространства.
4. Система уравнений и схема алгоритма обратной трассировки конической поверхности

#### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Промежуточная аттестация по дисциплине «Компьютерная 3D графика» осуществляется в форме экзамена. Экзамен проводится в устной форме.

Каждый студент в течение семестра должен выполнить индивидуальный проект, который состоит из 3-х или 4-х заданий, завершающиеся программной реализацией.

Для программной реализации используется язык C++ и API OpenGL 3. Проект должен сопровождаться сборочным скриптом CMakeLists.txt.

Примеры проектов с разбиением на задания:

Проект 1. Визуализация трехмерной поверхности, составленной из простых тел (полигональная поверхность, которая является результатом применения булевских операций).

Разбиение на задания.

1. Построить и визуализировать полигональную поверхность. Параметры: размеры и координаты центров куба и сферы, тип операции (пересечение, объединение, вычитание). Результат должен выводиться при любых значениях параметров. Использовать два вершинных атрибута: координаты вершин и цвет. Цвет можно назначить вершинам произвольно. Поддерживать возможность управления камерой от клавиатуры для облета поверхности, приближения/удаления. По желанию можно вывести сетку. Для этого нужно отрисовать полигоны повторно с командами `glPolygonMode` и `glPolygonOffset`
2. Использовать несколько источников света :
  - Добавить освещение с бликами от 2х источников света одновременно. 1й - точечный источник, должен двигаться вокруг поверхности. 2й - на голове, который движется вместе с виртуальной камерой и светит конусом (spotlight)
  - Текстурировать полигональную поверхность.
3. Реализовать зеркало:
  - Разместить рядом с поверхностью зеркало в виде плоского 4-угольника.
  - С помощью рендеринга в текстуру выполнить «честное» отражение поверхности в зеркале в зависимости от положения камеры.
  - С помощью GUI или клавиатуры реализовать управление положением и ориентацией зеркала.

- Дополнительно: можно реализовать отложенный рендеринг и добавить эффекты постобработки

4. Решить исходную задачу (булевские операции) с помощью метода Constructive Solid Geometry.

Проект 2. Симулятор эффектов специальной теории относительности

Разбиение на задания.

1. Построить и визуализировать 3D-модель некоторой тестовой территории: земля и на ней кубы, сферы, цилиндры и другие объекты.

При визуализации внести искажения, обусловленные преобразованиями Лоренца в зависимости от скорости наблюдателя.

- Использовать два вершинных атрибута: координаты вершин и цвет. Цвет можно назначить вершинам произвольно.

- Реализовать возможность перемещения виртуальной камеры на фиксированном расстоянии от поверхности земли.

2. Настроить освещение и текстурировать объекты сцены. Визуализировать эффект Доплера (цвет должен изменяться в зависимости от скорости движения наблюдателя).

3. Дополнительные эффекты

- Добавьте фоновый куб с кубической текстурой, движущиеся объекты в сцене
- Реализуйте deferred rendering
- Сделайте несколько движущихся источников света (фонарей)
- Сделайте на экране горизонтальную полосу для обозначения текущей скорости по сравнению со скоростью света. Размер полосы должен быть пропорционален скорости
- Доработайте ваши эффекты СТО в новых условиях

Билет.

1. Формы описания прямой и плоскости в пространствах 2D и 3D. Миграция между формами описания прямой и плоскости.

2. Перспективная проекция и перспективное преобразование. Матрицы перспективного преобразования и перспективного проецирования. Координаты несобственных точек и точек схода.

3. Построить матрицу поворота вокруг оси, проходящей через точку  $A(a_1, a_2, a_3)$ , имеющую направляющий вектор  $(l, m, n)$  единичной длины для 3D-пространства.

4. Система уравнений и схема алгоритма обратной трассировки конической поверхности

## Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой.



### **3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков.**

Промежуточная аттестация по дисциплине «Компьютерная графика» осуществляется в форме экзамена. Экзамен проводится в устной форме.

Каждый студент в течение семестра должен выполнить индивидуальный проект, который состоит из 3-х или 4-х заданий, завершающиеся программной реализацией.

Для программной реализации используется язык C++ и API OpenGL 3. Проект должен сопровождаться сборочным скриптом CMakeLists.txt.

#### **Примеры проектов с разбиением на задания**

**Проект 1.** Визуализация трехмерной поверхности, составленной из простых тел (полигональная поверхность, которая является результатом применения булевских операций).

Разбиение на задания.

1. Построить и визуализировать полигональную поверхность. Параметры: размеры и координаты центров куба и сферы, тип операции (пересечение, объединение, вычитание). Результат должен выводиться при любых значениях параметров. Использовать два вершинных атрибута: координаты вершин и цвет. Цвет можно назначить вершинам произвольно. Поддерживать возможность управления камерой от клавиатуры для облета поверхности, приближения/удаления. По желанию можно вывести сетку. Для этого нужно отрисовать полигоны повторно с командами `glPolygonMode` и `glPolygonOffset`
2. Использовать несколько источников света :
  - Добавить освещение с бликами от 2х источников света одновременно. 1й - точечный источник, должен двигаться вокруг поверхности. 2й - на голове, который движется вместе с виртуальной камерой и светит конусом (spotlight)
  - Текстурировать полигональную поверхность.
3. Реализовать зеркало:
  - Разместить рядом с поверхностью зеркало в виде плоского 4-угольника.
  - С помощью рендеринга в текстуру выполнить «честное» отражение поверхности в зеркале в зависимости от положения камеры.
  - С помощью GUI или клавиатуры реализовать управление положением и ориентацией зеркала.
  - Дополнительно: можно реализовать отложенный рендеринг и добавить эффекты постобработки
4. Решить исходную задачу (булевские операции) с помощью метода Constructive Solid Geometry.

**Проект 2.** Симулятор эффектов специальной теории относительности

Разбиение на задания.

1. Построить и визуализировать 3D-модель некоторой тестовой территории: земля и на ней кубы, сферы, цилиндры и другие объекты.  
При визуализации внести искажения, обусловленные преобразованиями Лоренца в зависимости от скорости наблюдателя.

- Использовать два вершинных атрибута: координаты вершин и цвет. Цвет можно назначить вершинам произвольно.
  - Реализовать возможность перемещения виртуальной камеры на фиксированном расстоянии от поверхности земли.
2. Настроить освещение и текстурировать объекты сцены. Визуализировать эффект Доплера (цвет должен изменяться в зависимости от скорости движения наблюдателя).
3. Дополнительные эффекты
- Добавьте фоновый куб с кубической текстурой, движущиеся объекты в сцене
  - Реализуйте deferred rendering
  - Сделайте несколько движущихся источников света (фонарей)
  - Сделайте на экране горизонтальную полосу для обозначения текущей скорости по сравнению со скоростью света. Размер полосы должен быть пропорционален скорости
  - Доработайте ваши эффекты СТО в новых условиях

### **Перечень контрольных вопросов:**

1. Ортогональные преобразования на плоскости и в 3D-пространстве (элементарные преобразования и их матрицы, композиция преобразований и формирование их матриц).
2. Основные классы проекций на плоскость и связанные с ними матричные преобразования.
3. Аффинные и аффинно-проективные преобразования и их матрицы.
4. Понятие несобственной точки на плоскости и её координатное представление.
5. Перспективная проекция и перспективное преобразование. Координаты несобственных точек и точек схода.
6. Формы описания прямой и плоскости. Миграция между формами описания прямой и плоскости.
7. Определение поверхности. Способы задания поверхности. Понятия точки поверхности, носителя точки поверхности и носителя поверхности. Эквивалентные отображения замыкания плоской области в  $R^3$ .
8. Неявная поверхность. Уравнения касательной плоскости и единичного вектора нормали для заданной точки неявной поверхности.
9. Задача восполнения поверхности. Подход к восполнению поверхностей. Триангуляция.
10. Сплайновые поверхности.
11. Триангуляция Делоне. Определение и основные свойства ТД.
12. Жадный алгоритм ТД и его свойства.
13. Диаграммы Вороного и ТД. Двойственность задачи ТД и ДВ.
14. Алгоритмы с предварительным упорядочиванием (плавающего горизонта, художника, сортировка граней с использованием BSP-деревьев).
15. Растеризация и её артефакты (для линий и границ областей).
16. Алгоритм Z-буфера. Его организация, достоинства и недостатки.
17. Алгоритм Брезенхема для отрезков прямых на дискретном растре.

18. Алгоритм обратной трассировки лучей, его организация, достоинства и недостатки.
19. Полный алгоритм обратной трассировки лучей. Световое дерево.
20. Подмножество алгоритма обратной трассировки (Ray-Casting).
21. Подходы к снижению вычислительной нагрузки в алгоритме обратной трассировки.
22. Использование алгоритма отсекаателя Сайруса-Бека на плоскости и в пространстве для формирования ограничивающих объемов.
23. Отсекатель Сайруса-Бека как 3D-примитив.
24. Расчёт глобальной освещённости.
25. Понятие BRDF. Модели BRDF. Вычисления и измерения BRDF.
26. BRDF и её приближённое вычисление на основе 3-х и 5-ти компонентной аддитивной функции.
27. Трассировка плоских областей.
28. Трассировка неплоских примитивов.
29. Составить систему уравнений и схему алгоритма обратной трассировки плоского кольца.
30. Составить систему уравнений и схему алгоритма обратной трассировки сплошной сферы.
31. Составить систему уравнений и схему алгоритма обратной трассировки конической поверхности.
32. Принципы организации CSG-операций в алгоритме обратной трассировки.
33. Понятие составной полиморфной поверхности (СПП) и организация алгоритма её трассировки.
34. Сопоставление СПП и триангулянта (с точки зрения описания поверхности и организации алгоритмов трассировки и Z-буфера).
35. Понятия и определения «бинокулярная визуализация», «стереоскопическая визуализация».
36. Строение камерного глаза. Редуцированная модель камерного глаза. Оптико-геометрическая модель анатомического отдела бинокулярной зрительной системы человека.
37. Бинокулярная зрительная система и бинокулярный интерфейс визуализации.
38. Наиболее сложные и нерешённые проблемы стереоскопической визуализации (конфликт аккомодации и вергенции, искажения при 2D-визуализации 3D-объектов, инверсия параллакса).
39. Иерархическая структура 3D-объекта, её формирование и использование.
40. Декомпозиции и формообразование 3D-объекта на основе структурного дерева.
41. Рекурсивный обход дерева структуры и формулы ортогональных преобразований для координатных фреймов узлов дерева.
42. Структура и кинематическая система 3D-объекта. Основные принципы использования структуры 3D-объекта для управления его формой.
43. Иерархические структуры с переменным отношением порядка.

44. Представление обычных связанных списков и связанных RTR-списков средствами UML.
45. Инкапсулируемые свойства связанных списков при описании поверхности 3D-объекта.
46. Виртуальный RTR-список и принципы построения алгоритма его обхода.
47. Особенности выполнения операций «склейка» и «разбиения» на RTR-деревьях.
48. Принципы построения интерфейса и реализаций операций «склейка» и «разбиения» на RTR-деревьях.
49. Паттерны моделирования операций «склейка» и «разбиения» на RTR-деревьях.
50. Особенности программной реализации ортогональных преобразований на RTR-деревьях при изменении связности графа 3D-сцены
51. Принципы построения программного интерфейса ортогональных преобразований на RTR-деревьях при изменении связности графа 3D-сцены
52. Модель взаимодействия «клиент-сервер» для системы визуализации.
53. Архитектура и топология распределённой системы 3D-визуализации.
54. Основные фазы моделирования и формирования изображения виртуальной среды в распределённой системе 3D-визуализации.
55. Основные проблемы, возникающие при использовании транспортного протокола UDP в распределённой системе 3D-визуализации.
56. Модели данных для описания состояния виртуальных 3D-объектов. Особенности моделей данных для транспортировки состояния объектов «над протоколами» UDP и TCP.
57. Понятие кадра состояния виртуального 3D-объекта, основные классы для описания поведения виртуальных 3D-объектов.
58. Принципы организации протокола прикладного уровня для распределённой системы визуализации
59. Понятие регулярных и нерегулярных 3D-объектов и описание состояния в контексте протокола прикладного уровня для распределённой системы 3D-визуализации.
60. Управление состоянием регулярных и нерегулярных 3D-объектов и особенности их рендеринга.

### **Примеры экзаменационных билетов из 4-х вопросов**

В каждом билете содержатся по 4 вопроса, при ответе на которые учащийся должен показать знания соответствующих тем (разделов) программы курса. Один из вопросов может иметь форму задачи.

#### **Билет.**

1. Формы описания прямой и плоскости в пространствах 2D и 3D. Миграция между формами описания прямой и плоскости.

2. Перспективная проекция и перспективное преобразование. Матрицы перспективного преобразования и перспективного проецирования. Координаты несобственных точек и точек схода.

3. Построить матрицу поворота вокруг оси, проходящей через точку  $A(a_1, a_2, a_3)$ , имеющую направляющий вектор  $(l, m, n)$  единичной длины для 3D-пространства.
4. Система уравнений и схема алгоритма обратной трассировки конической поверхности.

#### 4. Критерии оценивания.

Оценка	Баллы	Критерии
отлично	10	всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений;
	9	систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений;
	8	глубокие знания учебной программы дисциплины и умение применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений;
хорошо	7	твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;
	6	знает материал, грамотно излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;
	5	знает основной материал, грамотно излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач неточности;
удовлетворительно	4	фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;
	3	характер знаний недостаточен для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;
неудовлетворительно	2	не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет правильно использовать полученные знания при решении типовых практических задач.
	1	не знает формулировок основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.

## **5. Порядок проведения устного экзамена, особенности оценки выполненных заданий.**

При проведении экзамена учитываются результаты зачета заданий проекта. Каждое не зачтённое задание заменяется дополнительным вопросом (например, если проект не зачтён полностью, суммарное число вопросов составляет  $4+3 = 7$ ).

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется до 60 минут на подготовку ответов на вопросы и/или решение задачи.

Опрос обучающегося по билету на экзамене не должен превышать двух астрономических часов.

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины «Компьютерная графика».