|  |  |
| --- | --- |
| Gerb-BMSTU_01 | **Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)** |

ФАКУЛЬТЕТ «Информатика и системы управления»

КАФЕДРА «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»

**ОТЧЕТ ПО ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКЕ**

Студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Солопов Юрий Витальевич\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

*фамилия, имя, отчество*

Группа \_\_\_\_ИУ7-46Б\_\_\_\_\_\_

Тип практики \_\_\_\_\_Технологическая\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Название предприятия \_\_\_\_\_\_МГТУ им. Н. Э. Баумана, каф. ИУ7\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Студент **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_**Солопов Ю. В.\_**\_\_**

*подпись, дата фамилия, и.о.*

Руководитель практики **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_**Куров А.В.**\_\_\_\_\_\_\_**

*подпись, дата фамилия, и.о.*

Оценка \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

*Москва, 2022 г.*

**Индивидуальное задание:**

Спроектировать программное обеспечение, представляющее из себя графический редактор трехмерных моделей, предоставляющий возможность редактирования моделей на уровне вершин, ребер и граней. Интерфейс программы должен позволять пользователю при помощи мыши выбрать на дисплее несколько вершин, ребер или граней (необходимо реализовать визуальное выделение выбранных элементов для наглядности) и затем произвести над ними любой вид трансформации. Помимо этого, реализовать операции переноса, поворота и масштабирования для всей модели в целом.

Предоставить возможность выбора примитивных моделей (куба, пирамиды) в качестве начальных, а также возможность добавления на сцену точечных источников освещения. Реализовать функционал сохранения/загрузки всей сцены в/из файл(а). Предоставить возможность отображения моделей как в каркасном, так и в полигональном режимах.

Оглавление

[Введение 5](#_Toc112798574)

[1. Аналитическая часть 6](#_Toc112798575)

[1.1. Формализация объектов синтезируемой сцены 6](#_Toc112798576)

[1.2. Выбор типа задания трехмерных моделей 6](#_Toc112798577)

[1.3. Выбор способа задания поверхностной модели 7](#_Toc112798578)

[1.4. Анализ способа выбора элементов модели на дисплее 9](#_Toc112798579)

[1.5. Анализ алгоритмов удаления невидимых линий и поверхностей 9](#_Toc112798580)

[1.5.1. Алгоритм Робертса 9](#_Toc112798581)

[1.5.2. Алгоритм Варнока 10](#_Toc112798582)

[1.5.3. Алгоритм, использующий Z буфер 10](#_Toc112798583)

[1.5.4. Алгоритм обратной трассировки лучей 10](#_Toc112798584)

[1.5 Анализ методов закрашивания 12](#_Toc112798585)

[1.6 Анализ алгоритмов построения теней 13](#_Toc112798586)

[2. Конструкторская часть 15](#_Toc112798587)

[2.1 Общий алгоритм решения задачи 15](#_Toc112798588)

[2.2 Алгоритм Z-буфера 15](#_Toc112798589)

[2.3 Простой метод освещения 16](#_Toc112798590)

[2.4 Генерация осадков 16](#_Toc112798591)

[2.5 Выбор используемых типов и структур данных 16](#_Toc112798592)

[3. Технологическая часть 17](#_Toc112798593)

[3.1 Выбор и обоснование языка программирования и среды разработки 17](#_Toc112798594)

[3.2 Структура и состав классов 18](#_Toc112798595)

[3.3 Сведения о модулях программы 20](#_Toc112798596)

[3.4 Интерфейс программы 21](#_Toc112798597)

[Заключение 23](#_Toc112798598)

[Список использованной литературы 24](#_Toc112798599)

# Введение

Компьютерная графика является одной из неотъемлемых частей современной жизни. Она используется повсеместно: в кинофильмах и мультфильмах, в компьютерных играх, а также для наглядного отображения данных.

В связи с этим возрастает потребность в инструментах, позволяющих создавать трехмерные модели различной сложности. На данный момент существует множество подобных инструментов, предоставляющих обширный спектр различных функций, упрощающих процесс создания 3d модели. Но такие редакторы, зачастую, имеют перегруженный интерфейс, требующий предварительного изучения.

Поэтому моей целью данного проекта является разработка редактора трехмерных моделей, имеющего интуитивно понятный интерфейс, и предоставляющего пользователю возможность производить базовые преобразования над полигональной моделью и ее составляющими частями.

В рамках реализации описанного проекта должны быть решены следующие задачи:

• Изучение и анализ существующих алгоритмов компьютерной графики удаления невидимых линий и поверхностей.

• Проектирование масштабируемой архитектуры программы и интуитивно понятного интерфейса.

• Проведение исследования на основе разработанной программы.

# 1. Аналитическая часть

## Формализация объектов синтезируемой сцены

Сцена состоит из:

* **Источников света** – объекты сцены, которые представляют собой материальную точку, излучающую свет во всех направлениях.
* **Камеры** – специальный сцены, позволяющий просматривать содержимое сцены. Камера определяется двумя точками пространства: местоположением самой камеры, и точкой, к которой направлен “взгляд” камеры.
* **Моделей** – трехмерные объекты, расположенные на сцене.

## Выбор типа задания трехмерных моделей

Тип трехмерной модели определяет, как именно объект будет отображаться на сцене.

Модели могут задаваться в следующих формах:

* **Каркасная модель.** Это простейшая форма задания модели. Каркасная модель хранит информацию о вершинах и ребрах объекта. Основная проблема такого отображения объектов заключается в том, что модель не всегда однозначно передает представление о форме объекта, в следствии чего ее можно неправильно интерпретировать.
* **Поверхностная модель.** Этот тип модели хранит информацию о каждой поверхности объекта. Поверхность может описываться аналитически, либо задаваться другим способом. Одним из недостатков поверхностной модели является отсутствие информации о том, с какой стороны поверхности находится материал.
* **Твердотельная модель.** Данный тип задания модели отличается от поверхностного тем, что в твердотельных моделях к информации о поверхностях добавляется информация о том, с какой стороны расположен материал. Это можно сделать, например, путем указания направления внутренней нормали.

**Вывод:**

Использовать каркасный тип модели в моей задачи нецелесообразно, потому что такой тип в некоторых случаях может запутать пользователя, не давая полного представления об объекте.

Использовать твердотельную модель просто нет необходимости, т.к. пользователю моей программы не важно, с какой стороны от модели находится материал.

Поэтому я принял решение использовать полигональный тип модели, как самый подходящий для моей задачи. Тем не менее, моя программа будет предоставлять возможность отображения модели и в каркасной форме.

## Выбор способа задания поверхностной модели

Поверхностную модель можно задать несколькими способами:

**Аналитический способ** – для получения поверхности нужно вычислять функцию, зависящую от параметра.

**Полигональная сетка** – совокупностью вершин, ребер и граней, которые определяют форму объекта.

Рассмотрим известные способы хранения информации о сетке:

* **Вершинное представление.** Объект хранит множество вершин. Вершины указывают на другие вершины, с которыми они соединены.
* **Список граней.** Объект хранит множество граней и множество вершин. Каждая вершина при этом хранит информацию о соседних вершинах и о гранях, ее окружающих.
* ***Крылатое* представление.** Объект хранит информацию о вершинах, ребрах и гранях. При этом каждая вершина и грань хранят окружающие их ребра, а каждое ребро состоит из двух вершин (конечные точки), двух граней (по каждую сторону), и четырех ребер (*«крылья»* ребра).
* **Таблица углов.** Объект задается таблицей, хранящей вершины. Обход заданной таблицы неявно задает полигоны.

**Вывод:**

Использовать для моей задачи аналитический способ невозможно, т.к. задача предполагает возможность изменение модели посредством трансформации элементов модели.

Выбор конкретного способа хранения сетки напрямую зависит от поставленной задачи. Моя программа должна предоставлять возможность быстрого выбора и трансформации любых вершин, ребер и граней. Соответственно, решающим фактором является скорость выполнения этих операций. Поэтому полигональная сетка должна явно хранить информацию о каждой этой составляющей объекта.

Все вышеописанные способы, помимо крылатого представления, не хранят в явном виде информацию о ребрах, хотя в моей программе эта информация необходима. Крылатое представление же избыточно для моей задачи.

Поэтому я разработал собственный способ хранения информации о сетке. В качестве основы был взят список граней, к которому я добавил информацию о ребрах, которые определяются двумя конечными точками. Т.е. я решил использовать следующее представление модели:

* **Вершина**: Ее координаты в пространстве. Окружающие ее грани.
* **Ребро**: Две ее конечные точки.
* **Грань**: Принадлежащие ей вершины и ребра.

Объект же определяется набором его граней, ребер и вершин.

## Анализ способа выбора элементов модели на дисплее

Специфика моей задачи предполагает, что программа должна предоставлять пользователю возможность выбора необходимых ему вершин, ребер и граней при помощи клика мышью по дисплею вблизи них. Более того, пользователь должен иметь возможность выбрать только те элементы фигуры, которые являются видимыми.

Для решения этой проблемы было принято решение помимо буфера кадра хранить еще и буфер граней, каждая ячейка которого будет указывать на грань, которая отображается в соответствующей ячейке буфера кадров. Буфер граней позволит за константное время определить, какую именно грань выбрал пользователь. И, при необходимости, можно будет быстро найти ближайшие к месту клика мыши точку или ребро.

## Анализ алгоритмов удаления невидимых линий и поверхностей

**Требования к алгоритму:**

При выборе алгоритма удаления невидимых линий необходимо в первую очередь учесть особенности поставленной задачи. Моя задача подразумевает, что алгоритм удаления невидимых линий будет быстродействующим, поскольку пользователь должен видеть плавную анимацию при трансформации моделей или камеры. Также немаловажное значение имеет сложность реализации определенного алгоритма. Кроме того, выбранный алгоритм должен позволять быстро и эффективно заполнять буфер граней, описанный в пункте 1.4.

При этом не имеет значения, в каком пространстве работает алгоритм, т.к. для моей задачи скорость важнее точности.

## Алгоритм Робертса

Данный алгоритм работает в объектном пространстве, решая задачу только с выпуклыми телами.

Алгоритм выполняется в 3 этапа.

1. **Этап подготовки исходных данных.** На данном этапе должна быть задана информация о телах. Для каждого тела сцены должна быть сформирована матрица тела V. Размерность матрицы – 4 \* n, где n – количество граней тела. Каждый столбец матрицы представляет собой четыре коэффициента уравнения плоскости , проходящей через очередную грань.

Матрица тела должна быть сформирована корректно, то есть любая точка, расположенная внутри тела, должна располагаться по положительную сторону от каждой грани тела. В случае, если для очередной грани условие не выполняется, соответствующий столбец матрицы надо умножить на −1. Для проведения проверки следует взять точку, расположенную внутри тела.

1. **Этап удаления ребер, экранируемых самим телом.** На данном этапе рассматривается вектор взгляда E = {0, 0,−1, 0}. Для определения невидимых граней достаточно умножить вектор E на матрицу тела V. Отрицательные компоненты полученного вектора будут соответствовать невидимым граням.
2. **Этап удаления невидимых ребер, экранируемых другими телами сцены.** На данном этапе для определения невидимых точек ребра требуется построить луч, соединяющий точку наблюдения с точкой на ребре. Точка будет невидимой, если луч на своем пути встречает в качестве преграды рассматриваемое тело. Если тело является преградой, то луч должен пройти через тело. Если луч проходит через тело, то он находится по положительную сторону от каждой грани тела.

Основным преимуществом данного алгоритма является точность вычислений. Она достигается за счет работы в объектном пространстве, в отличии от большинства других алгоритмов.

Серьезным недостатком является вычислительная трудоемкость алгоритма. В теории она растет как квадрат количества объектов. Поэтому при большом количестве объектов на сцене, этот алгоритм будет работать достаточно медленно. Но для решения этой проблемы можно использовать разные оптимизации для повышения эффективности, например, сортировку по z. Тем не менее, некоторые из оптимизаций крайне сложны, что затрудняет реализацию этого алгоритма.

Еще один весомый недостаток этого алгоритма - все тела сцены должны быть выпуклыми. Данная проблема также приводит к усложнению алгоритма, так как потребуется прибегнуть к проверке объектов на выпуклость и их разбиению на выпуклые многоугольники, что сильно замедлит алгоритм при большом количестве тел.

**Вывод:**

Алгоритм Робертса не подходит для решения поставленной задачи по следующим причинам:

* от программы не требуется той точности визуализации объектов, которую предоставляет алгоритм;
* на сцене может находиться множество объектов (зачастую - невыпуклых), что сильно замедлит скорость работы алгоритма. Таким образом, алгоритм не удовлетворяет требованиям к скорости выполнения алгоритма.
* реализация модификаций, позволяющих приблизить рост сложности алгоритма к линейной, очень труднозатратна.

## Алгоритм Варнока

Алгоритм Варнока основывается на рекурсивном разбиении экрана. В зависимости от расположения объектов это может стать, как положительной, так и отрицательной стороной алгоритма. Чем меньше пересечений объектов, тем быстрее алгоритм завершит свою работу.

## Алгоритм, использующий Z буфер

Несомненным плюсом данного алгоритма может являться его простота, которая не мешает решению задачи удаления поверхностей и визуализации их пересечения. В этом алгоритме не тратится время на сортировку элементов сцены, что дает преимущество в скорости работы. Особенно полезным это может стать при большом количестве домов в сцене.

Так как размер синтезируемого изображения сравнительно мал, затраты по памяти, при хранении информации о каждом пикселе, в данном алгоритме незначительны для современных компьютеров.

## ****Алгоритм обратной трассировки лучей****

В этом алгоритме за счет скорости работы достигается излишняя, для моей сцены, универсальность. Обратная трассировка позволяет работать с несколькими источниками света, передавать множество разных оптических явлений.

Для создания реалистичного изображения, по правилам обратной трассировки, каждую частицу в осадках (капля дождя, снежинка) нужно будет рассматривать, как отдельный объект сцены, внутри которого могут возникнуть явления дисперсии, преломления и внутреннего отражения. Данный способ взаимодействия с осадками очень ресурсозатратен, хотя позволяет моделировать явления радуги, гало, что не является задачей программы.

Положительной стороной данного алгоритма является возможность использования в параллельных вычислительных системах (т.к. расчет отдельной точки выполняется независимо от других точек).

Серьезным недостатком этого алгоритма будет являться большое количество необходимых вычислений для синтеза изображения моей сцены. Алгоритм не подойдет для генерации динамических сцен и моделирования диффузного отражения.

**Вывод:** так как в моей сцене не подчеркиваются явления преломления и отражения света, использование алгоритмов трассировки будет излишним. При заметном замедлении работы программы, качество изображения заметно не улучшится.

Вывод

Алгоритм метода трассировки лучей не позволит в реальном времени смоделировать туман из-за рассеивания света. Можно лишь его сымитировать используя зависимость затуманенности от пройденного расстояния луча.

Поэтому предпочтительнее использовать Z буфер для динамической сцены визуализации погоды, т.к. важна скорость работы алгоритма. На его основе будет просто визуализировать туман и дождь. В случае тумана можно хранить глубину пикселя, с помощью которой можно будет вычислить насколько «затуманенным» он будет. В случае осадков, можно накладывать осадки на уже посчитанный Z буфер сцены, не проводя повторных расчетов.

## 1.5 Анализ методов закрашивания

Простая закраска

Вся грань закрашивается одним уровнем интенсивности, который высчитывается по закону Ламберта.

Этот метод крайне прост в реализации и совершенно не требователен к ресурсам. Однако плохо подходит для тел вращения (Рис.2), плохо учитывает отраженный свет.

Для моей задачи этот метод очень хорошо подходит, так как вся работа ведется с гранями зданий, тел вращения нет.

Закраска по Гуро

Основа закраски по Гуро – билинейная интерполяция интенсивностей, за счет которой устраняется дискретность изменения интенсивности и создается иллюзия гладкой криволинейной поверхности. Хорошо сочетается с диффузным отражением.

Закраска по Фонгу

Основа закраски по Фонгу – билинейная интерполяция векторов нормалей. Достигается лучшая локальная аппроксимация кривизны поверхности. Изображение выходит более реалистичным, зеркальные блики выглядят правдоподобнее, чем в методе закраски по Гуро.

Однако по сравнению с методом Гуро, закраска по Фонгу требует больших вычислительных затрат, так как интерполируются значения векторов нормалей, на основе которых потом вычисляется интенсивность.

**Вывод:** так как фигуры сцены состоят из плоскостей закраска по Фонгу и Гуро будет скорее мешать: ребра зданий будут сглажены. Тело здания будет хуже восприниматься (Рис.1). Поэтому лучше всего использовать простую закраску.

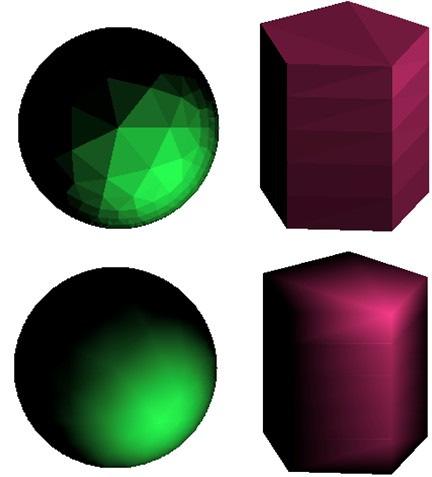


Рисунок 1 Сравнение методов закрашивания



## 1.6 Анализ алгоритмов построения теней

При трассировке лучей тени получаются без дополнительных вычислений.  
Пиксел затенен, когда луч попадает на объект и позже не попадает ни в объект, ни в источник света.

Так как в анализе алгоритмов трассировка лучей не была выбрана в качестве алгоритма синтеза сцены, то тени нужно вычислять отдельно.

Один из способов нахождения теней – вычисление проекций тел.

Можно использовать метод теневых карт, в котором предполагается, что освещены только те фрагменты, которые видны из положения источника. Находить видимость можно с помощью алгоритма Робертса, алгоритма Z буфера и других.

Для создания теневых карт будет использоваться алгоритм Z буфера так как этот алгоритм позволит быстро найти видимость объектов сцены.

# 2. Конструкторская часть

## 2.1 Общий алгоритм решения задачи

1. Задать объекты сцены

2. Задать источники света (учет перемещения солнца) и положение наблюдателя

3. Для каждого полигона высчитать нормаль и интенсивность цвета, найти внутренние пиксели

4. Найти тени

5. Используя алгоритм Z буфера получить изображение сцены, сохранить Z буфер для дальнейших расчетов

6. Если присутствуют осадки, то выполнять пункты 6.1 и 6.2 до тех пор, пока не изменится один из параметров, влияющих на изображение сцены -> переход в 1 (перемещение объектов, вращение камеры, перемещение источников света).

6.1 Используя систему частиц, наложить осадки на полученное изображение

6.2 Отобразить изображение

6.2 Обновить данные о положении частиц

Иначе отобразить изображение.

## 2.2 Алгоритм Z-буфера

1. Всем элементам буфера кадра присвоить фоновое значение
2. Инициализировать Z буфер минимальными значениями глубины
3. Выполнить растровую развертку каждого многоугольника сцены:
   1. Для каждого пикселя, связанного с многоугольником вычислить его глубину z(x, y)
   2. Сравнить глубину пискселя со значением, хранимым в Z буфере.

Если z(x, y) > zбуф(x, y), то zбуф(x,y) =z(x,y), цвет(x, y) = цветПикселя.

1. Отобразить результат

## 2.3 Простой метод освещения

В простом методе освещения интенсивность рассчитывается по закону Ламберта:

I = I0\*cos(α), где

I – результирующая интенсивность света в точке

I0 – интенсивность источника

α – угол между нормалью к поверхности и вектором направления света

## 2.4 Генерация осадков

1. Инициализация начальных данных (направления и скорости ветра, интенсивности осадков)

2. Пока не получена команда прекращения осадков:

2.1 Обновление положения частиц по заданному закону

2.2 Инициализация новых частиц

2.3 Отображение частиц на дисплее

3. Пока система частиц не пуста

3.1 Обновление положения частиц по заданному закону

3.2 Отображение частиц на дисплее

## 2.5 Выбор используемых типов и структур данных

* Источник света – задается расположением и направленностью света.
* Объекты сцены – задаются вершинами и гранями.
* Система частиц – хранит в себе частицы, направление движения
* Математические абстракции
  + Точка – хранит координаты x, y, z
  + Вектор – хранит направление по x, y, z
  + Многоугольник – хранит вершины, нормаль, цвет
* Интерфейс – используются библиотечные классы для предоставления доступа к интерфейсу.

# 3. Технологическая часть

## 3.1 Выбор и обоснование языка программирования и среды разработки

В качестве языка программирования был выбран C# т.к.:

* Я ознакомилась с этим языком программирования во время занятий по компьютерной графике, что сократит время написания программы
* Данный язык программирования объектно-ориентирован, что даст в полной мере
  + использовать наследование, абстрактные классы и т.д.
  + представлять трехмерные объекты сцены в виде объектов классов, что позволит легко организовать взаимодействие между ними, положительно влияя на читабельность, не снижая эффективности.

В качестве среды разработки была выбрана «Visual Studio 2017» т.к.:

* Она бесплатна в пользовании студентами;
* имеет множество удобств, которые облегчают процесс написания и отладки кода;
* обеспечивает работу с Windows Forms – интерфейсом, который упрощает доступ к элементам интерфейса Microsoft Windows за счет создания обертки для существующего Win32 API в управляемом коде;
* я знакома с данной средой разработки, что сократит время изучения возможностей среды.

## 3.2 Структура и состав классов

Источник света

class LightSource

{

public Point3D position;

public Vector direction;

public Color color;

}

Модель

class Model

{

List<Point3D> vertices;

public List<Polygon> polygons;

private Color basicColor;

}

Система частиц

class ParticleSystem

{

List<Drop> system;

Vector direction;

int xMax, yMax;

int intensity;

}

class Drop

{

int x, y, z;

}

Математические абстракции

class Point3D

{

public int x, y, z;

}

class Vector

{

public double x, y, z;

public double length;

}

class Polygon

{

List<Point3D> vertices;

Color basicColor;

public List<Point3D> pointsInside;

Vector normal;

}

Класс обработки сцены

class Zbuffer

{

private Bitmap res;

private int[][] Zbuf;

}

## 3.3 Сведения о модулях программы

Program – главная точка входа в приложение;

Form1 – интерфейс;

Light – описание источников света;

Model – Описание объектов сцены;

Rain – Описание дождя;

Zbuffer – Алгоритм Z буфера.

## 3.4 Интерфейс программы

Группа «Сцена»

Позволяет добавить параллелепипед с заданными размерами и положением на сцену.

Группа «Источник света»

Позволяет выбрать направление источника света.

Группа «Направление ветра»

Позволяет задать направление ветра, который, в свою очередь, задает направление движения и длину капель.

Группа «Дождь»

Позволяет задать интенсивность дождя – количество капель, добавляемых при обновлении кадра.

Задержка (в мс) – задает частоту смены кадров.

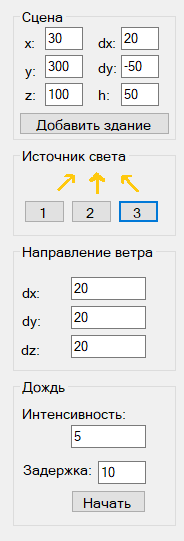


Рисунок 3 Интерфейс программы

# Заключение

Во время выполнения поставленной задачи были рассмотрены и проанализированы основные алгоритмы удаления невидимых линий, построения теней, методы закрашивания, методы генерации осадков. Были проанализированы их достоинства и недостатки, выбраны наиболее подходящие для решения поставленной задачи.

Разработанный программный продукт синтезирует трехмерное изображение при помощи алгоритмов компьютерной графики. Программа реализована таким образом, что пользователь может добавлять новые объекты на сцену, изменять характеристики ветра и дождя, изменять положение источника света.

В ходе выполнения поставленной задачи были изучены возможности Windows Forms, получены знания в области компьютерной графики.

# Список использованной литературы

1. Методы представления дискретных данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.graphicon.ru/oldgr/ru/library/multires_rep/index.html> (дата обращения 27.06.19)

1. Полигональная сетка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%B3%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B5%D1%82%D0%BA%D0%B0> (дата обращения 27.06.19)
2. Е. А. Снижко. Компьютерная геометрия и графика [Текст], 2005. - 17 с.
3. Проблемы трассировки лучей – из будущего в реальное время. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nvworld.ru/articles/ray-tracing/3/> (дата обращения 28.06.19)
4. RayTracing – царь света и теней, Лев Дымченко [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://old.computerra.ru/206167/> (дата обращения 28.06.19)
5. Реалистичная визуализация атмосферных осадков в приложениях реального времени, В. В. Карабчевский, А.А. Лунтовская, Донецк ДонНТУ [Текст], 2015
6. K. Garg, S. K. Nayar. Photorealistic rendering of rain streaks. In ACM SIGGRAPH 2006 Papers. SIGGRAPH '06. ACM, New York, NY, 996‐ 1002 с.