

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Физико-механический институт

Работа допущена к защите  
Руководитель ОП  
\_\_\_\_\_ К.Н. Козлов  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
РАБОТА БАКАЛАВРА**

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛИЧЕСТВА ВЫЗОВОВ ОТРИСОВКИ В  
СОВРЕМЕННЫХ ГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

по направлению подготовки 01.03.02 "Прикладная математика и информатика"  
Направленность (профиль) 01.03.02\_02 "Системное программирование"

Выполнил

студент гр. 5030102/90201

В.А. Парусов

Руководитель

**доцент ВШПМиВФ,**

степень, звание

С.Ю. Беляев

Консультант

старший преподаватель, ВШПМиВФ

В.С. Чуканов

Санкт-Петербург  
2023

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО  
Физико-механический институт**

**УТВЕРЖДАЮ**

**Руководитель образовательной программы «Прикладная математика и информатика»**

**К.Н. Козлов**

**«\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ г.**

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**  
**студенту Парусову Владимиру Алексеевичу, гр. 5030102/90201**

**1. Тема работы: «Оптимизация количества вызовов отрисовки в современных графических системах»**

**2. Срок сдачи студентом законченной работы: июнь 2023 г.**

**3. Исходные данные по работе:**

**Инструментальные средства:**

- язык программирования C++
- среда разработки Visual Studio 2022
- программная библиотека для работы с видеокартой DirectX 12
- система контроля версий git

**Ключевые источники литературы:**

1. Riccio C., Lilley S. Introducing the programmable vertex pulling rendering pipeline //GPU Pro. – 2013. – Т. 4. – С. 21-37

2. Park H., Han J. H. Fast rendering of large crowds using GPU //International Conference on Entertainment Computing. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. – С. 197-202.

**4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов):**

- 1) Введение. Обоснование актуальности
- 2) Постановка задачи
- 3) Обзор существующих решений
- 4) Предлагаемое решение
- 5) Результаты и их сравнительный анализ
- 6) Заключение

**5. Дата выдачи задания 07.12.2022**

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_ С.Ю. Беляев  
(подпись)



Консультант ВКР \_\_\_\_\_ В.С. Чуканов  
(подпись)



Задание принял к исполнению

Студент \_\_\_\_\_ В.А. Парусов  
(подпись)



## **РЕФЕРАТ**

На 36 с., 30 рисунков, 1 таблицу, 2 приложения

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** INDIRECT DRAW, DIRECTX 12, PHYSICALLY BASED RENDERING, ORDER INDEPENDENT TRANSPARENCY.

Тема выпускной квалификационной работы: «Оптимизация количества вызовов отрисовки в современных графических системах»

Данная работа посвящена разработке и реализации архитектуры конвейера отрисовки трёхмерной компьютерной графики, снижающей нагрузку на центральный процессор, тем самым увеличивая объем ресурсов компьютера, доступных для разработчиков ПО.

В качестве основной демонстрационной сцены используется совокупность различных трёхмерных геометрических объектов, освещённых при помощи подхода, основанного на физической модели микрограней. Весь исходный код проекта написан на языке C++ с применением графической библиотеки DirectX 12. Средством для программирования шейдеров является HLSL.

Наиболее значимым результатом является система для вывода трёхмерных сцен, количество вызовов отрисовки в которой не зависит от числа выводимых объектов. В ходе работы был также разработан гибридный алгоритм отрисовки прозрачных объектов, который не требует их упорядочивания.

Предложенная архитектура пригодна для применения в современных графических приложениях и может быть развита в дальнейшем.

## ABSTRACT

36 pages, 30 figures, 1 tables, 2 appendices

**KEYWORDS:** INDIRECT DRAW, DIRECTX 12, PHYSICALLY BASED RENDERING, ORDER INDEPENDENT TRANSPARENCY.

The subject of the graduate qualification work is «Optimizing the number of draw calls on modern graphics systems».

The work aims to develop and implement graphics pipeline architecture, which will reduce usage of CPU and thereby increase amount of resources available to developers.

Main demonstration scene is a set of different geometric shapes, which uses physically-based lighting with microfacet model. All source code of project is written in C++ using the DirectX 12 graphics library. HLSL is used for shaders code.

The most significant result is a system for rendering three-dimentional scenes, the number of draw calls in which does not depend on the number of rendered objects. In the course of the work, a hybrid algorithm for rendering transparent objects was also developed, which does not require object sorting.

The proposed architecture is suitable for use in modern graphics applications and can be further developed to obtain more efficient results.

## СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ .....	4
ABSTRACT .....	5
СОДЕРЖАНИЕ .....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	8
ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ .....	10
1.1. Техническое задание .....	10
1.2. Ожидаемый результат .....	10
ГЛАВА 2. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ .....	10
2.1. Использование Geometry Instancing .....	10
2.2. Использование Programmable Vertex Pulling.....	13
ГЛАВА 3. ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ.....	14
3.1. Непрямая отрисовка .....	15
3.2. Общая структура .....	18
3.3. Этап Pre-pass .....	19
3.3.1. Frustum culling.....	20
3.3.2. Depth pre-pass.....	21
3.3.3. Occlusion culling.....	22
3.3.4. Построение карт теней .....	23
3.4. Этап Render pass .....	25
3.4.1. Непрозрачные объекты .....	25
3.4.2. Skybox .....	26
3.4.3. Полу-прозрачные объекты.....	27
3.5. Этап Post-process .....	31
3.5.1. Tonemapping, HDR и LDR.....	31
ГЛАВА 4. Результаты и их сравнительный анализ .....	31
4.1. Название параграфа.....	31
4.2. Название параграфа.....	31
4.3. Выводы .....	32
Заключение .....	33
Список сокращений и условных обозначений .....	34
Словарь терминов.....	35
Список использованных источников.....	36
Приложение 1. Краткие инструкции по настройке издательской системы $\text{\LaTeX}$ .....	37

Приложение 2. Некоторые дополнительные примеры .....	41
--	----

## ВВЕДЕНИЕ. ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ

В большинстве современных компьютеров установлено и одновременно используются два вида вычислительных процессоров: центральный процессор(CPU) и графический(GPU). Из-за того что они работают одновременно, а также имеют обособленную друг от друга физическую память, возникает необходимость в синхронизации и передаче данных. Эту необходимость решает программа-драйвер, которую реализуют производители графических вычислительных процессоров, предоставляя разработчикам графических приложений специальные API, такие как OpenGL, Vulkan, DirectX 11 и тд. Однако, из-за того что заранее предугадать архитектурные особенности итоговых графических приложений невозможно, программа-драйвер может добавлять дополнительные синхронизации, что приводит к ухудшению производительности, так как центральный и графический процессоры начинают работать последовательно, как представлено на рис.0.1.

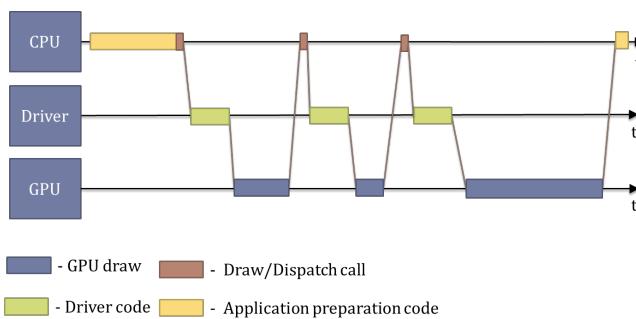


Рис.0.1. Схема работы приложения при неоптимальном драйвере DirectX 11

Во избежание подобных ситуаций, в более поздних и новых API (таких как DirectX 12 и Vulkan) задача синхронизации была снята с программы драйвера и была передана разработчику. Для этого было введено понятие “списка команд”, который разработчик мог заполнять и затем отправлять на исполнение, как показано на рис.0.2.

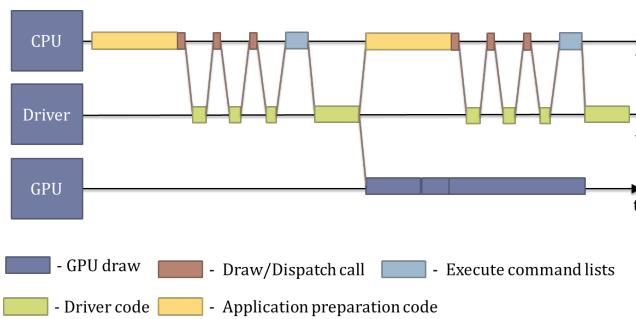


Рис.0.2. Схема работы приложения при DirectX 12

Однако несмотря на то, что данный подход даёт возможность явно управлять синхронизациями между процессорами, часть времени центрального процессора уходит на построение вышеупомянутого “списка”. Причём время построения и передачи будет зависеть от количества выводимых объектов (см. рис.0.3).

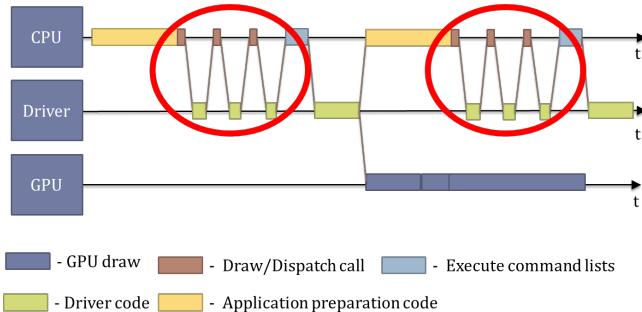


Рис.0.3. Схема работы приложения при DirectX 12, с выделенным временем на построение списка выводимых объектов

Целью работы является построение архитектуры графического приложения таким образом, чтобы время построения и передачи, а также размер “списка команд” не зависели от количества выводимых объектов (см. рис.0.4). Таким образом разработчику ПО будет предоставлено больше времени центрального процессора, а значит более трудоёмкие алгоритмы можно будет использовать для достижения желаемых результатов.

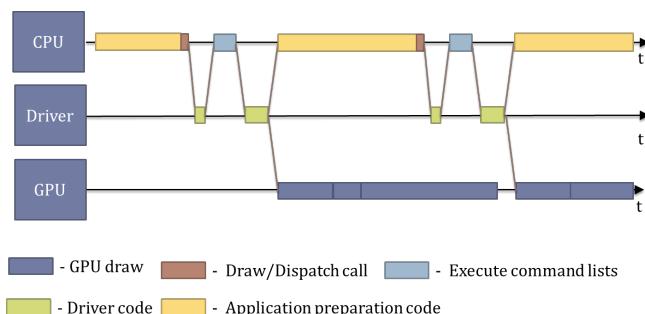


Рис.0.4. Схема работы приложения при DirectX 12 с использованием предлагаемого конвейера

## ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

### 1.1. Техническое задание

Требуется:

- разработать архитектуру графического конвейера, использующего постоянное количество вызовов отрисовки относительно количества объектов сцены
- реализовать приложение, позволяющее использовать как разработанную архитектуру, так и традиционную

### 1.2. Ожидаемый результат

Ожидаемым результатом работы является демонстрационный проект, позволяющий сравнить производительность традиционной и разработанной архитектуры на тестовой сцене. Тестовая сцена должна содержать большое число объектов разной геометрии, положения которых изменяются на каждом кадре. Помимо этого, ожидаемым результатом работы является отчёт о производительности каждой архитектуры, и их сравнительный анализ.

## ГЛАВА 2. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ

### 2.1. Использование Geometry Instancing

Рассмотрим традиционную архитектуру графического конвейера, на примере вывода только одного объекта. Тогда “список команд”, получающийся в результате работы конвейера, будет описывать алгоритм представленный на рис.2.1

### Algorithm

1. Установить формат хранения вершин
2. Установить формат соединения вершин
3. Установить программу-шейдер, в которой написан алгоритм обработки входных данных
4. Установить из какого буфера будут поступать вершины
5. Установить из какого буфера будут поступать номера вершин, для соединения
6. Установить из какого буфера брать текстуру
7. Установить преобразование объекта
8. Выполнить команду отрисовки

Рис.2.1. Примерный псевдокод алгоритма вывода одного объекта

Нетрудно заметить, что если повторить описанный выше алгоритм для большого числа различных объектов, то они отрисуются корректно, однако некоторые параметры выглядят излишними. Например, если используется только один формат хранения и соединения вершин, то нет необходимости выполнять эти(1 и 2 на рис.2.1) команды каждый раз. При рассмотрении крайнего случая, когда выводится один и тот же объект много раз, алгоритм будет выглядеть как показано на рис.2.2

### Algorithm

1. Установить формат хранения вершин
2. Установить формат соединения вершин
3. Установить программу-шейдер, в которой написан алгоритм обработки входных данных
4. Установить из какого буфера будут поступать вершины
5. Установить из какого буфера будут поступать номера вершин, для соединения
6. Установить из какого буфера брать текстуру
7. **for**  $\forall 1 \leq i \leq N$  **do**
8.     Установить преобразование объекта  $i$
9.     Выполнить команду отрисовки

Рис.2.2. Примерный псевдокод алгоритма вывода множества одинаковых объектов

Как можно заметить, количество команд в данном алгоритме, линейно зависит от количества объектов которые рисуются(7 на рис.2.2). Возникает желание уменьшить этот список, заменив многократные вызовы команд, одним вызовом, чтобы алгоритм выглядел как показано на рис.2.3

### **Algorithm**

1. Установить формат хранения вершин
2. Установить формат соединения вершин
3. Установить программу-шейдер, в которой написан алгоритм обработки входных данных
4. Установить из какого буфера будут поступать вершины
5. Установить из какого буфера будут поступать номера вершин, для соединения
6. Установить из какого буфера брать текстуру
7. Установить из какого буфера брать преобразования объектов
8. Выполнить команду отрисовки N раз

Рис.2.3. Примерный псевдокод алгоритма вывода множества одинаковых объектов при помощи Geometry Instancing

Именно поддержка такого алгоритма(рис.2.3) и называется Geometry Instancing, и его использование отрыывает большие возможности. Например в статье Park-a[6] описывается архитектура графического конвейера, позволяющего выводить большие толпы объектов, при помощи технологии Geometry Instancing (рис.2.4). Из особенностей можно отметить:

1. Все объекты имеют несколько типов геометрии, разнящиеся по уровню детализации(рис.2.5)
2. Для каждого объекта, при помощи вычислительных шейдеров, определяется уровень детализации и находится ли вообще объект в области видимости.
3. В "списке команд" находятся команды отрисовки для каждого типа геометрии, но количество раз отрисовки (для каждого типа) указывается уже исходя из работы предыдущего вычислительного шейдера.



Рис.2.4. Примеры работы приложения описанного в статье Park-a[6]

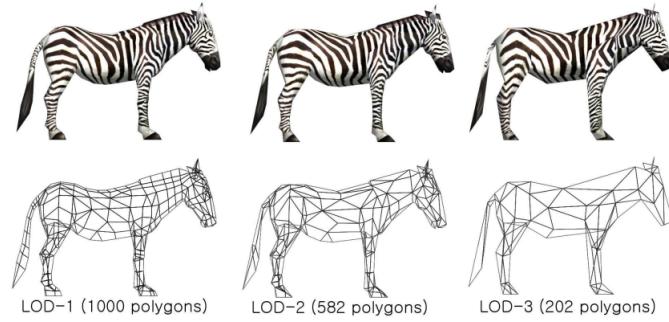


Рис.2.5. Уровни детализации, описанные в статье Park-a[6]

Основным недостатком является то, что предложенная Park-ом[6] архитектура требует добавлять в "список команд" команды отрисовки для каждого выводимого типа геометрии. В случае, если на экран выводится много разных объектов, предложенная архитектура ничем не будет отличаться от традиционной.

## 2.2. Использование Programmable Vertex Pulling

В своей статье Ricco[7] предлагает способ избавиться от основной проблемы Geometry Instancing - отрисовки объектов с одинаковой геометрией. Для этого он предлагает сделать следующее:

1. Ввести понятие “группы” треугольников - набор из  $N$  вершин (число  $N$  задаётся на центральном процессоре).
2. Все объекты, которые требуется вывести на экран, разделяются на “группы”.
3. Все вершины всех объектов складываются в один большой буфер.
4. В вычислительном шейдере для всех объектов определяется сколько “групп” соответствуют каждому объекту, и для каждой “группы” записываются индексы вершин в буфере со всеми вершинами.

5. В “списке команд” находится лишь одна команда отрисовки, которая рисует “группу” столько раз, сколько было решено на вычислительном шейдере.

Такой подход уменьшает количество вызовов команд отрисовок до одной, что является впечатляющим результатом. Однако этот подход не лишен недостатков:

1. Несмотря на уменьшение количества команд отрисовки в “списке команд”, количество вызовов отрисовки на графическом процессоре увеличивается (из-за дробления объектов на “группы”), что может негативно сказаться на производительности.
2. Число  $N$ , используемое для задания размера “группы”, должно подбираться эмпирически. Если сделать его слишком маленьким, то число вызовов отрисовки на графическом процессоре возрастет (см п.1). Если сделать его слишком большим, то будут отрисовываться “лишние” треугольники из “группы”.
3. Буфер со всеми вершинами всех объектов создаётся с точки зрения API не как буфер для вершин, а как буфер общего назначения. Это приводит к тому, что к нему не применяются оптимизации программы-драйвера (Например способ кеширования или расположение в видеопамяти).
4. Из-за возможной фрагментации видеопамяти, буфер со всеми вершинами может не поместиться в видеопамять, несмотря на то, что объем памяти достаточен для хранения объектов по отдельности.

## **ГЛАВА 3. ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ**

Одной из основных целей данной работы было разработать графический конвейер, максимально приближенный к существующим графическим конвейерам. Таким образом будут достигнуты две цели:

1. Эксперименты, проводимые при помощи разработанной архитектуры, будут содержать те же затратные (с точки зрения производительности) места, которые имеют современные графические системы. А значит, результаты, полученные в ходе экспериментов, будут более приближены к значениям, получаемым в реальных современных графических системах

2. Будут разработаны и реализованы алгоритмы, которые можно будет использовать другим графическим системам, если они возмут за основу предлагаемую архитектуру

### **3.1. Непрямая отрисовка**

Как было уже упомянуто ранее, основным способом отправки команд на графический процессор считается сбор “списка команд” на центральном процессоре и последующая передача получившегося “списка” на графический процессор. Однако современных API добавилась возможность дополнить вышеупомянутый “список команд” дополнительным массивом команд прямо из графического процессора. Эта технология называется непрямой отрисовкой и в DirectX 12 эту технологию реализует команда ExecuteIndirect.

Для того чтобы воспользоваться командой ExecuteIndirect, ей необходимо передать следующие параметры:

1. “Сигнатуру вызова” - перечень команд которые необходимо вызвать для каждого рисуемого объекта. Обязательно должна оканчиваться командой отрисовки.
2. Буфер из видеопамяти с параметрами (которые требует сигнатура), для каждого выводимого объекта.
3. Количество отрисовываемых объектов (число или указатель на буфер из видеопамяти).

Таким образом, простейший алгоритм отрисовки любого числа объектов будет выглядеть так: (рис.3.1)

## Algorithm

1. Загрузить все объекты
2. Создать сигнатуру
3. Создать буфер (*SRVbuffer*) и сохранить в него информацию для каждого объекта (например указатель на буфер вершин)
4. Установить формат хранения вершин
5. Установить формат соединения вершин
6. Установить программу-шейдер, для отрисовки
7. **for each frame do**
  - | ExecuteIndirect(*SRVbuffer*)**

Рис.3.1. Примерный псевдокод простейшего алгоритма использующего непрямую отрисовку

Таким образом мы добились поставленной цели, и количество команд в “списке команд” при данном подходе действительно константно относительно числа объектов. Но на практике этот алгоритм будет работать хуже, чем традиционный. Причина в том, что традиционный подход позволяет заранее отбросить отрисовку части объектов, просто не добавив их в “список команд”, а данный (рис.3.1) алгоритм не даёт такой возможности. Однако, это можно было бы исправить, если буфер с параметрами (*SRVbuffer*) мог бы изменяться на каждом кадре работы приложения. Это приводит нас к следующему алгоритму (рис.3.2)

## Algorithm

1. Загрузить все объекты
2. Создать сигнатуру
3. Создать буфер (*SRVbuffer*) и сохранить в него информацию для каждого объекта (например указатель на буфер вершин)
4. Создать буфер (*UAVbuffer*), совпадающий размером с предыдущим,
5. Создать счётчик (*UAVcounter*)
6. Установить формат хранения вершин
7. Установить формат соединения вершин
8. **for each frame do**
  9. Установить программу-шейдер, для обработки команд
  10. Обнулить счётчик (*UAVcounter*)
  11. Запустить вычислительный шейдер, который скопирует из *SRVbuffer* в *UAVbuffer* параметры нужных команд и изменит *UAVcounter* на значение равное числу скопированных команд
  12. Установить программу-шейдер, для отрисовки
  13. ExecuteIndirect(*UAVbuffer*, *UAVcounter*)

Рис.3.2. Примерный псевдокод алгоритма использующего непрямую отрисовку с отбрасыванием команд

Отметим преимущества и недостатки описанного алгоритма(рис.3.2):

1. Преимущество: число вызовов отрисовки в "списке команд" всё ещё является константным, относительно числа объектов
2. Преимущество: число вызовов отрисовки на графическом процессоре не меняется(см главу 2.2)
3. Преимущество: используются стандартные буфера, а значит оптимизации программы-драйвера не перестанут работать (см главу 2.2)
4. Преимущество: нет проблем с фрагментацией (см главу 2.2)
5. Преимущество: проверки проводимые при определении “нужных” команд (см 11 на рис.3.2), будут происходить параллельно. А так как обычно графический процессор обладает большим числом вычислительных ядер, чем центральный процессор, предложенный алгоритм будет работать быстрее.
6. Недостаток: невозможно установить порядок, в котором объекты будут отрисовываться.

### 3.2. Общая структура

Большинство графических приложений имеют схожую структуру конвейера отрисовки, состоящую из 3-х этапов:

1. этап Pre-pass - выполнение задач, которые необходимо выполнить до рисования объектов на экран. Например: отбрасывание не видимых объектов, построение карт теней, предварительный подсчёт карты глубины.
2. этап Render pass - отрисовка всех объектов на кадр.
3. этап Post process - применение эффектов на получившийся кадр.

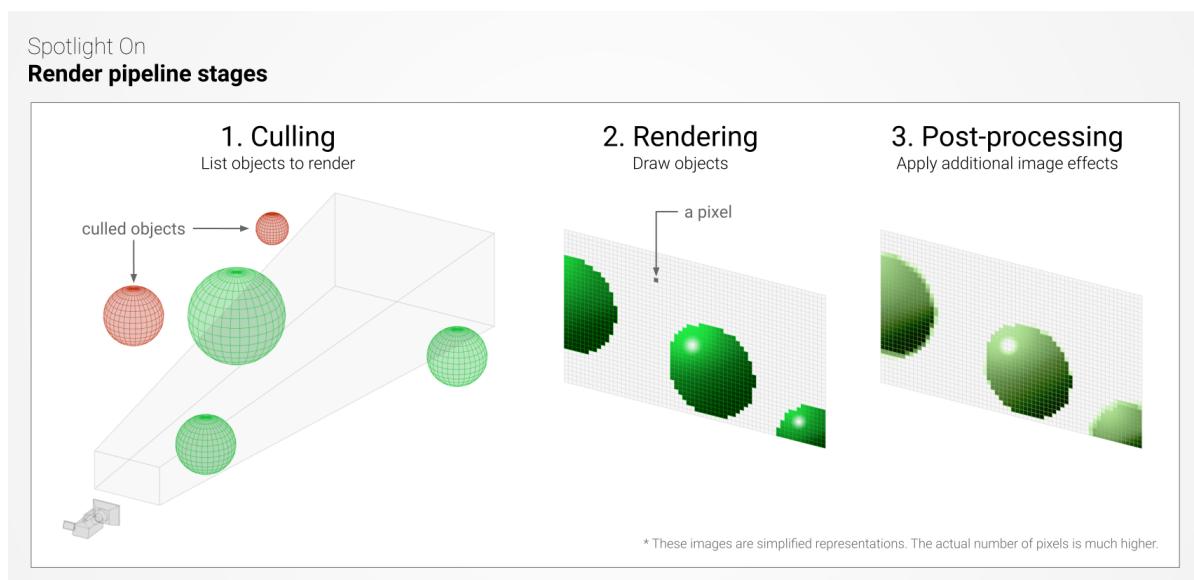


Рис.3.3. Упрощенная схема конвейера отрисовки Unity

Предлагаемый конвейер сохраняет эту структуру, несмотря на изменения в алгоритме отрисовки и требует  $11 + S$  (где  $S$  - число источников света, отбрасывающих тень) вызовов отрисовки в “списке команд”, что видно по схеме конвейера рис.3.4. Каждый этап представляет собой набор из подэтапов, где каждый подэтап решает ровно одну задачу.

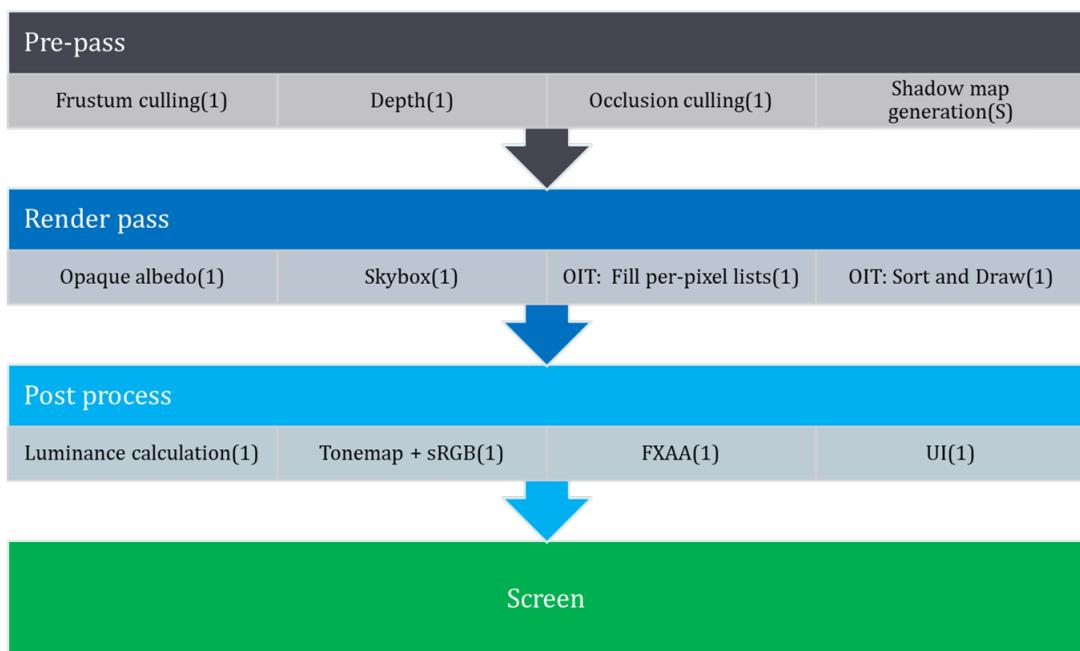


Рис.3.4. Схема предлагаемого конвейера. В скобках указано количество вызовов ExecuteIndirect.

### 3.3. Этап Pre-pass



Рис.3.5. Схема этапа Pre-pass предлагаемого конвеера.

Во время отрисовки кадра, на разных подэтапах могут требоваться команды, удовлетворяющие разным критериям. Для этого вводится несколько буферов с параметрами команд для ExecuteIndirect, каждый из которых имеет разное имя, работающее как фильтр:

1. All - буфер, в котором находятся параметры для всех объектов, присутствующих на сцене.
2. OpaqueAll - буфер, в котором находятся параметры всех непрозрачных объектов.
3. TransparentAll - буфер, в котором находятся параметры всех прозрачных объектов.
4. OpaqueFrustum - буфер, в котором находятся параметры всех непрозрачных объектов, пересекающих трапецию видимости.
5. OpaqueCulled - буфер, в котором находятся параметры всех непрозрачных объектов, видимых пользователю.

6. TransparentCulled - буфер, в котором находятся параметры всех прозрачных объектов, видимых пользователю.

Основной задачей этапа Pre-pass является заполнение всех вышеописанных буферов (кроме All). Разберём подэтапы данного этапа:

### 3.3.1. *Frustum culling*

Данный подэтап отвечает за заполнение буферов OpaqueAll, TransparentAll и OpaqueFrustum при помощи алгоритма с одноименным названием Frustum culling. Основная идея алгоритма заключается в том, чтобы для каждого объекта проверить, пересекает ли он усеченную пирамиду видимости камеры, или нет (см рис.3.6). Если объект и пирамида видимости камеры не пересекаются, то объект можно и не выводить.

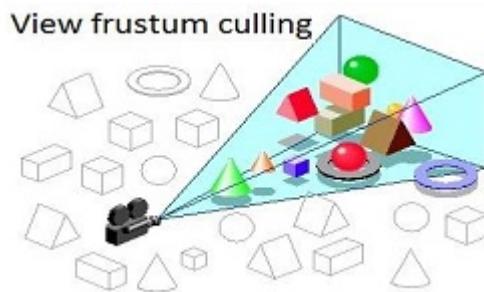
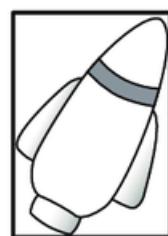


Рис.3.6. Схема работы алгоритма Frustum Culling.

Однако, зачастую, объекты представляют собой сложные невыпуклые геометрические формы, для которых считать пересечения является трудной вычислительной задачей. В связи с этим, в качестве оптимизации, для каждого объекта строится параллельный осям ограничивающий параллелепипед(см. рис.3.7), и проверяется пересечение не объектов с усечённой пирамидой видимости, а пересечение параллелепипедов и усечённой пирамиды.



AABB

Рис.3.7. Пример построения параллельного осям ограничивающего параллелепипеда в плоском случае.

Для того чтобы проверить, пересекаются ли параллелипипед и усеченная пирамида, достаточно задать уравнения плоскостей, содержащих грани усеченной пирамиды, и имеющие нормали, направленные “внутрь” пирамиды. Предположим, что плоскости задаются уравнениями 3.1, а вершины параллельного осям ограничивающего параллелепипеда задаются как 3.2.

$$A_i * x + B_i * y + C_i * z + D = 0, \forall 1 \leq i \leq 6 \quad (3.1)$$

$$x_j, y_j, z_j \forall 1 \leq j \leq 8 \quad (3.2)$$

Тогда выполнение условия 3.3 гарантирует то, что объект не попадёт в область видимости.

$$\exists i \forall j A_i * x_j + B_i * y_j + C_i * z_j + D < 0 \quad (3.3)$$

### 3.3.2. Depth pre-pass

Данный подэтап выполняет задачу построения иерархической карты глубины, используя объекты из буфера `OpaqueFrustum`.

Для начала, определим что такое карта глубины и что такое иерархическая карта глубины. *Картой глубины* называется монохромное изображение, где для каждого пикселя вместо интенсивности цвета хранится его расстояние до камеры. *Иерархической картой глубины* называется набор монохромных изображений, удовлетворяющих следующим условиям.

1. Первое изображение совпадает по размеру с картой глубины.
2. Ширина и высота каждого следующего изображения меньше ширины и высоты предыдущего в 2 раза.
3. Первое изображение совпадает с картой глубины.
4. Для каждого следующего изображения, интенсивность пикселя считается как максимум из четырёх соответствующих пикселей предыдущего.



Рис.3.8. Пример карты глубины.

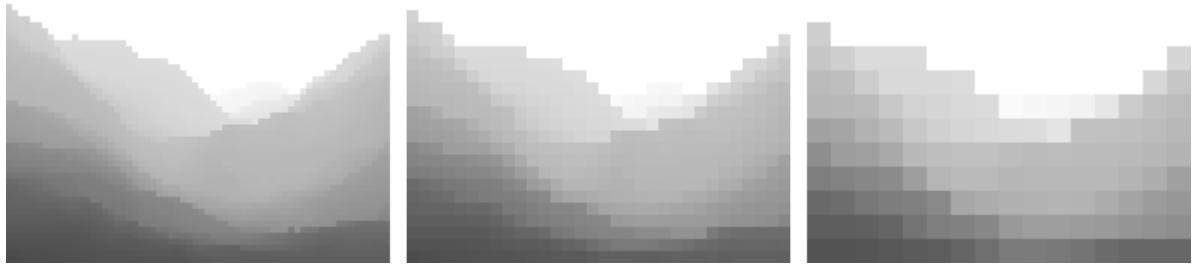


Рис.3.9. Пример иерархической карты глубины.

Построение такой карты открывает следующие преимущества:

1. Предварительный подсчёт карты глубины позволяет позднее высчитывать цвет пикселей только тех объектов, для которых глубина совпадает с глубиной в карте глубины.
2. Построенная иерархическая карты глубины позволяет применить алгоритм Occlusion culling, о котором будет сказано далее.

### *3.3.3. Occlusion culling*

Данный подэтап отвечает за заполнение буферов OpaqueCulled и TransparentCulled при помощи алгоритма Occlusion culling. Основная цель данного алгоритма заключается в отбрасывании тех объектов, которые оказываются перекрыты близлежащими объектами(см рис.3.10).

Для этого:

1. Каждый объект представляется в виде параллельного осьм ограничивающего параллелепипеда (см. главу 3.3.1)
2. Среди вершин параллелепипеда находится ближайшая, и её расстояние до камеры сохраняется.
3. Каждая вершина параллелепипеда проецируется на экран, тем самым получаются координаты пикселей, соответствующих данной вершине.

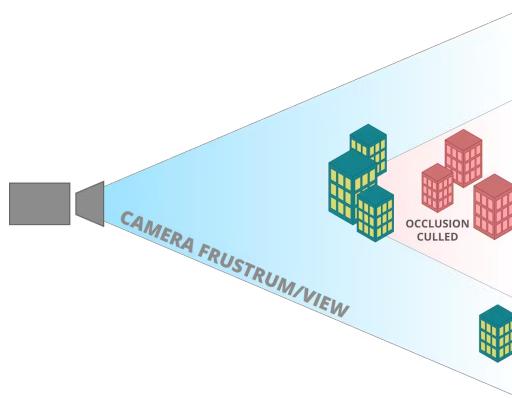


Рис.3.10. Схема работы алгоритма Occlusion culling.

4. Вокруг спроектированных вершин строится параллельный осям ограничивающий прямоугольник.
5. По размеру прямоугольника выбирается изображение из иерархической карты глубин(см. главу 3.3.2) таким образом, чтобы весь прямоугольник соответствовал одному пикслю изображения.
6. Если интенсивность, в соответствующем пикселе изображения из иерархической карты глубин, меньше, чем сохранённая глубина - то объект перекрывается другими объектами и его копировать не надо.
7. Иначе, объект может быть виден, и тогда его необходимо скопировать в соответствующий буфер.

### *3.3.4. Построение карт теней*

Данный подэтап отвечает за построение карт теней, для реализации алгоритмов затенения. Сами по себе карты теней очень похожи на “карту глубины”(см главу 3.3.2). Основное отличие заключается лишь в том, что в интенсивность записывается расстояние не от камеры до объекта, а расстояние от источника света до объекта.

При наличии карты теней, проверить находится ли точка в тени достаточно просто: необходимо лишь посчитать расстояние от точки до источника света, и если оно больше, записанного в карте теней, то в данной точке присутствует тень.

Однако в силу того, что изображение имеет конечное разрешение, при некотором приближении тени могут оказаться “блочными” как показано на рис.3.11.

Чтобы избежать этого эффекта и необходимости затрачивать большое количество памяти на тени, используется алгоритм Percentage Closure Filtering. Суть этого алгоритма заключается в том, чтобы сравнивать расстояние от точки



Рис.3.11. Пример "блочных" теней.

до источника света не с одним пикселием, а с несколькими, рядом-лежащими пикселями. При применении такого подхода, тени становятся “мягких”, как показано на рис.3.12.



Рис.3.12. Пример мягких теней.

В связи с тем, что невозможно одновременно заполнить карты теней для всех источников света на сцене, этот подэтап требует отрисовки для каждого источника света отбрасывающего тень.

### 3.4. Этап Render pass



Рис.3.13. Схема этапа Render pass предлагаемого конвеера.

На данном этапе, после всей подготовительной работы, поведённой в предыдущем этапе, происходит отрисовка объектов на кадр.

#### 3.4.1. Непрозрачные объекты

Данный подэтап отвечает за отрисовку всех непрозрачных объектов, используя буфер OpaqueCulled, карту глубины из главы 3.3.2 и карты теней из главы 3.3.4.

Для отображения объектов с учётом их материала и расположения относительно источников света используются различные модели освещения. В предлагаемой архитектуре используется алгоритм модели освещения, называемый physically based rendering.

##### 3.4.1.1. Physically based rendering

Данный алгоритм освещения использует в своей основе физическую модель микрограней. В этой физической модели поверхность любого объекта представляют собой множество идеальных зеркал, находящихся под разными углами друг к другу (см рис.3.14).

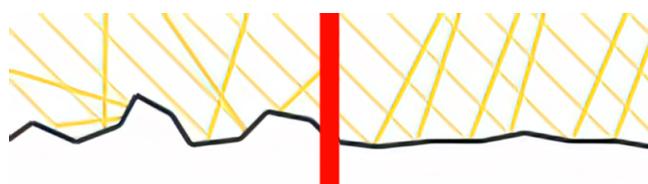


Рис.3.14. Схема физической модели микрограней. Слева - шершавая поверхность, справа - гладкая

Для понимания принципов работы алгоритма Physically based rendering необходимо рассмотреть “Основное уравнение рендеринга” 3.4, предложенное Джеймсом Каджия.

$$L_o(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + \int_{\Omega} f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i) (n_x * \omega_i) d\omega_i \quad (3.4)$$

Данное уравнение показывает, что интенсивность света в точке  $x$  по направлению  $\omega_o$  равна сумме излучаемой интенсивности( $L_e(x, \omega_o)$ ) и отраженной интенсивности, где последняя считается как интеграл по полусфере произведения интенсивности падающего света ( $L_i(x, \omega_i)$ ), двунаправленной функции отражательной способности( $f_r(x, \omega_i, \omega_o)$ ) и косинуса угла падения( $(n_x * \omega_i)$ ). Двунаправленная функция отражательной способности  $f_r$  часто называется BRDF функцией.

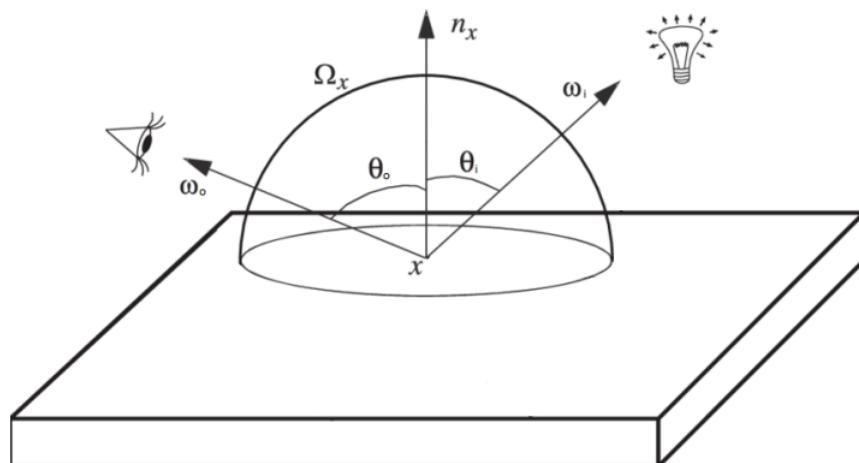


Рис.3.15. Обозначения используемые в "основном уравнении рендеринга"

В предлагаемом конвейере используется BRDF функция Кука-Торренса.

### 3.4.2. Skybox

На данном подэтапе в кадр выводится фоновое изображение, на котором изображено окружение сцены. Данный подэтап рисуется после отрисовки непрозрачных объектов, чтобы уменьшить число перерисовываемых пикселей кадра, так как фоновое изображение рисуется только в тех пикселях, не не были отрисованы объекты.

Описанное фоновое изображение представляется как 6 изображений, снятых с 6-ти направлений и расположенных в развёртке куба, как показано на рис.3.16.

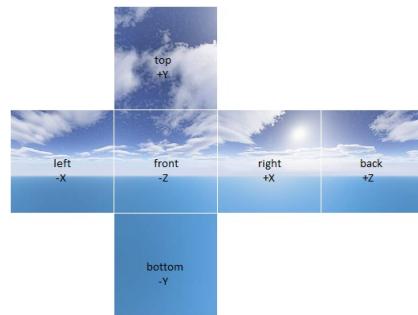


Рис.3.16. Развёртка фонового изображения

Таким образом, при необходимости вывести цвет в пикселе, в котором не были отрисованы объекты, достаточно будет посчитать направление, к которому этот пиксель находится, и взять точку, соответствующую точке на кубе, в указаном направлении(см. рис.3.17).

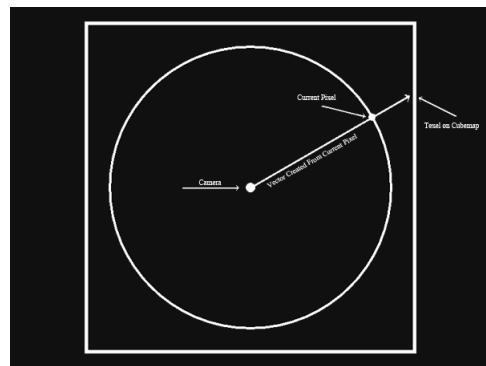


Рис.3.17. Схема работы вычисления цвета пикселя используя кубическую развертку

### 3.4.3. Полупрозрачные объекты

На данном подэтапе в кадр выводятся полупрозрачные объекты при помощи буфера TransparentCulled. Как понятно из названия, полу-прозрачные объекты отличаются от непрозрачных тем, что через них можно видеть объекты находящиеся позади. Из-за этого, нельзя воспользоваться картой глубины(см. главу 3.3.2) для отрисовки только ближайшего пикселя, что может привести к ситуации, приведённой на рис.3.18.



Рис.3.18. Пример отрисовки прозрачных объектов в неправильном порядке

Чтобы избежать изображенной ситуации, необходимо производить сортировку объектов. Тогда, если выводить объекты начиная с самого дальнего, то цвет в пикселе можно вычислять по формуле 3.5.

$$C_{new} = \alpha * C_{transparent} + (1 - \alpha) * C_{pixel} \quad (3.5)$$

Где:

1.  $C_{new}$  - новый цвет пикселя
2.  $C_{transparent}$  - цвет полученный в результате применения алгоритма освещения, для данного пикселя
3.  $C_{pixel}$  - цвет, хранящийся в данном пикселе.
4.  $\alpha$  - коэффициент прозрачности. Значение 0 обозначает абсолютно прозрачный объект, значение 1 абсолютно непрозрачный объект.

Однако предлагаемый алгоритм неявной отрисовки(см главу 3.1) не позволяет установить порядок отрисовки объектов. Из-за этого необходимо использовать особые алгоритмы отрисовки прозрачных объектов.

#### *3.4.3.1. Order Independent Transparency*

Первым из рассмотренных алгоритмов является алгоритм Order Independent Transparency with per-pixel linked lists [5]. В данном алгоритме, для каждого пикселя экрана заводится список, в каждом элементе которого хранится: цвет, глубина и коэффициент прозрачности. Далее алгоритм работает в 2 запуска отрисовки

1. Отрисовываются все полупрозрачные объекты, но результат отрисовки объекта записывается не в кадр, а добавляется в конец созданных списков.
2. На экран отрисовывается прямоугольник, покрывающий весь экран. Для каждого пикселя прямоугольника берётся соответствующий ему список и значения в этом списке сортируются по глубине. Далее, используя

отсортированный список, последовательно применим формулу 3.5 и получим формулу для итогового цвета 3.8.

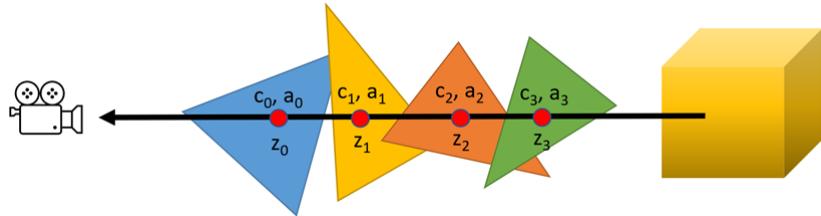


Рис.3.19. Изображение демонстрирующее первый этап работы алгоритма

$$C_{out} = C_1 \alpha_1 + \sum_{i=2}^N (C_i \alpha_i \prod_{j=1}^{i-1} (1 - \alpha_j)) + C_{opaque} \prod_{j=1}^N (1 - \alpha_j) \quad (3.6)$$

Где:

1.  $N$  - размер списка для данного пикселя
2.  $C_{out}$  - результирующий цвет пикселя
3.  $C_{opaque}$  - цвет непрозрачного объекта, полученный из пикселя кадра.
4.  $C_i$  - цвет, полученный из элемента отсортированного списка с номером  $i$ .
5.  $\alpha_i$  - коэффициент прозрачности, полученный из элемента отсортированного списка с номером  $i$ .

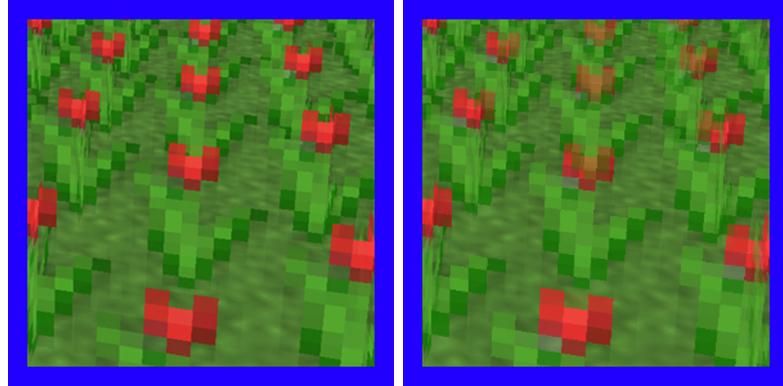
Нетрудно заметить, что благодаря переносу сортировки на второй этап, появляется возможность отрисовывать объекты на первом этапе в любом порядке. Однако время, требуемое на выполнение вышеописанной сортировки, сильно оказывается на производительности. Авторами статьи упоминается, что количество отрисовываемых кадров в секунду при использовании данного подхода, падает с 110 вплоть до 5. Это означает, что запуск отрисовки с сортировкой может занимать до 190 миллисекунд.

#### 3.4.3.2. Weighted Blended Order Independent Transparency

В 2013 году, в качестве улучшения предыдущего алгоритма, был представлен алгоритм Weighted Blended Order Independent Transparency[4]. Данный алгоритм повторяет идею предыдущего алгоритма, однако вместо сортировки и применения формулы 3.8, предлагается использовать её аппроксимацию 3.7

$$C_{out} = \frac{\sum_{i=1}^N C_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i} (1 - \prod_{i=1}^N \alpha_i) + C_{opaque} \prod_{j=1}^N (1 - \alpha_j) \quad (3.7)$$

Очевидно, что данная аппроксимация работает гораздо быстрее подхода описанного в оригинальном алгоритме. Однако, при коэффициентах  $\alpha_i$  близких к 1-це, погрешности аппроксимации становятся явно заметны человеческому глазу. Визуальное сравнение можно увидеть на рис.3.20.



a) Изображение полученное алгоритмом OIT. Время построения кадра: 6.2ms	b) Изображение полученное алгоритмом WBOIT. Время построения кадра: 1.9ms
--	--

Рис.3.20. Сравнение работы алгоритмов OIT и WBOIT

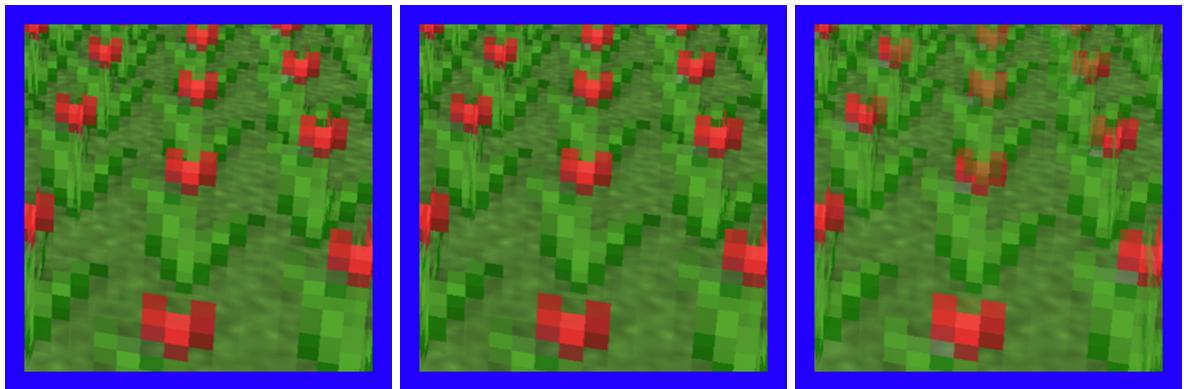
### 3.4.3.3. Hybrid Order Independent Transparency

В результате изучения описанных алгоритмов, было решено разработать новый, гибридный алгоритм, совмещающий в себе преимущества описанных алгоритмов. Как и предыдущие алгоритмы, он состоит из двух запусков отрисовки:

1. Как и в предыдущих алгоритмах, все полупрозрачные объекты отрисовываются в списки, созданные для каждого пикселя.
2. В списках для каждого пикселя, вместо сортировки всего списка, находятся  $K$  наименьших по параметру глубины, и они сортируются между собой. Затем результирующий цвет вычисляется по формуле ??

$$\begin{aligned}
 C_{out} = & C_1 \alpha_1 + \sum_{i=2}^K (C_i \alpha_i \prod_{j=1}^{i-1} (1 - \alpha_j)) + \\
 & \frac{\sum_{i=K+1}^N C_i}{\sum_{i=K+1}^N \alpha_i} (1 - \prod_{i=K+1}^N \alpha_i) \prod_{i=1}^K (1 - \alpha_i) + \\
 & C_{opaque} \prod_{j=1}^N (1 - \alpha_j)
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Как можно заметить, данный алгоритм смещивает  $N - K$  элементов списка по формуле 3.7, а затем, считая получившийся цвет, как элемент списка с номером  $K + 1$ , применяет формулу 3.8, считая что список состоит из  $K + 1$  элемента. Визуальное сравнение всех трех методов можно увидеть на рис.3.21.



а) Изображение полученное алгоритмом OIT. Время построения кадра: 6.2ms	б) Изображение полученное алгоритмом Hybrid OIT. Время построения кадра: 2.1ms	в) Изображение полученное алгоритмом WBOIT. Время построения кадра: 1.9ms
--	---	--

Рис.3.21. Сравнение работы алгоритмов OIT, WBOIT и Hybrid OIT

### 3.5. Этап Post-process

#### 3.5.1. *Tonemapping, HDR и LDR*

## ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Хорошим стилем является наличие введения к главе. Во введении может быть описана цель написания главы, а также приведена краткая структура главы.

### 4.1. Название параграфа

### 4.2. Название параграфа

Пример ссылки на литературу [1—3; 8].

### **4.3. Выводы**

Текст выводов по главе 4.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заключение (2 – 5 страниц) обязательно содержит выводы по теме работы, *конкретные предложения и рекомендации* по исследуемым вопросам. Количество общих выводов должно вытекать из количества задач, сформулированных во введении выпускной квалификационной работы.

Предложения и рекомендации должны быть органически увязаны с выводами и направлены на улучшение функционирования исследуемого объекта. При разработке предложений и рекомендаций обращается внимание на их обоснованность, реальность и практическую приемлемость.

Заключение не должно содержать новой информации, положений, выводов и т. д., которые до этого не рассматривались в выпускной квалификационной работе. Рекомендуется писать заключение в виде тезисов.

Последним абзацем в заключении можно выразить благодарность всем людям, которые помогали автору в написании ВКР.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

**DOI** Digital Object Identifier.

**WoS** Web of Science.

**BKP** Выпускная квалификационная работа.

**ТГ-объект** Текстово-графический объект.

## СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

**TeX** — язык вёрстки текста и издательская система, разработанные Дональдом Кнутом.

**LaTeX** — язык вёрстки текста и издательская система, разработанные Лэсли Лампартом как надстройка над TeX.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Автономова Н. С. Философский язык Жака Деррида. — М.: Российская политическая энциклопедия (РОССПЭН), 2011. — 510 с. — (Сер.: Российские Пропилеи).
2. Котельников И. А., Чеботаев П. З. LaTeX по-русски. — 3-е изд. — Новосибирск: Сибирский Хронограф, 2004. — 496 с. — URL: <http://www.tex.uniyar.ac.ru/doc/kotelnikovchebotaev2004b.pdf> (дата обращения: 06.03.2019).
3. Песков Н. В. Поиск информативных фрагментов описаний объектов в задачах распознавания: дис. .... канд. канд. физ.-мат. наук: 05.13.17 / Песков Николай Владимирович. — М., 2004. — 102 с.
4. McGuire M., Bavoil L. Weighted blended order-independent transparency // Journal of Computer Graphics Techniques. — 2013. — Т. 2, № 4.
5. Order independent transparency with per-pixel linked lists / P. Barta [и др.] // Budapest University of Technology and Economics. — 2011. — Т. 3.
6. Park H., Han J. Fast rendering of large crowds using GPU // Entertainment Computing-ICEC 2008: 7th International Conference, Pittsburgh, PA, USA, September 25-27, 2008. Proceedings 7. — Springer. 2009. — С. 197—202.
7. Riccio C., Lilley S. Introducing the programmable vertex pulling rendering pipeline // GPU Pro. — 2013. — Т. 4. — С. 21—37.
8. Kotelnikov I. A., Chebotaev P. Z. LaTeX in Russian. — 3rd ed. — Novosibirsk: Sibiskiy Hronograph, 2004. — 496 p. — URL: <http://www.tex.uniyar.ac.ru/doc/kotelnikovchebotaev2004b.pdf> (visited on 06.03.2019); (in Russian).
9. MiKTeX web site. — URL: <https://miktex.org/> (visited on 06.03.2019).
10. Peskov N. V. Searching for informative fragments of object descriptions in the recognition tasks: diss. .... cand. phys.-math. sci.: 05.13.17 / Peskov Nickolay Vladimirovich. — М., 2004. — 102 p. — (in Russian).
11. SPbPU photo gallery. — URL: <http://www.spbstu.ru/media/photo-gallery/> (visited on 06.03.2019).
12. TeXstudio web site. — URL: <https://www.texstudio.org/> (visited on 06.03.2019).

## Приложение 1

### Краткие инструкции по настройке издательской системы L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

В SPbPU-BCI-template автоматически выставляются необходимые настройки и в исходном тексте шаблона приведены примеры оформления текстово-графических объектов, поэтому авторам достаточно заполнить имеющийся шаблон текстом главы (статьи), не вдаваясь в детали оформления, описанные далее. Возможный «быстрый старт» оформления главы (статьи) под Windows следующий<sup>П1.1</sup>:

- A. Установка полной версии MikTeX [9]. В процессе установки лучше выставить параметр доустановки пакетов «на лету».
- B. Установка TexStudio [12].
- C. Запуск TexStudio и компиляция my\_chapter.tex с помощью команды «Build&View» (например, с помощью двойной зелёной стрелки в верхней панели). Иногда, для достижения нужного результата необходимо несколько раз скомпилировать документ.
- D. В случае, если не отобразилась библиография, можно
  - воспользоваться командой Tools → Commands → Biber, затем запустив Build&View;
  - настроить автоматическое включение библиографии в настройках Options → Configure TexStudio → Build → Build&View (оставить по умолчанию, если сборка происходит слишком долго): txs:///pdflatex | txs:///biber | txs:///pdflatex | txs:///pdflatex | txs:///view-pdf.

В случае возникновения ошибок, попробуйте скомпилировать документ до последних действий или внимательно ознакомьтесь с описанием проблемы в log-файле. Бывает полезным переход (по подсказке TexStudio) в нужную строку в pdf-файле или запрос с текстом ошибке в поисковиках. Наиболее вероятной проблемой при первой компиляции может быть отсутствие какого-либо установленного пакета L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

В случае корректной работы настройки «установка на лету» все дополнительные пакеты будут скачиваться и устанавливаться в автоматическом режиме. Если доустановка пакетов осуществляется медленно (несколько пакетов за один запуск

---

<sup>П1.1</sup>Внимание! Пример оформления подстрочной ссылки (сноски).

компилятора), то можно попробовать установить их в ручном режиме следующим образом:

1. Запустите программу: меню → все программы → MikTeX → Maintenance (Admin) → MiKTeX Package Manager (Admin).
2. Пользуясь поиском, убедитесь, что нужный пакет присутствует, но не установлен (если пакет отсутствует воспользуйтесь сначала MiKTeX Update (Admin)).
3. Выделив строку с пакетом (возможно выбрать несколько или вообще все неустановленные пакеты), выполните установку Tools → Install или с помощью контекстного меню.
4. После завершения установки запустите программу MiKTeX Settings (Admin).
5. Обновите базу данных имен файлов Refresh FNDB.

Для проверки текста статьи на русском языке полезно также воспользоваться настройками Options → Configure TexStudio → Language Checking → Default Language. Если русский язык «ru\_RU» не будет доступен в меню выбора, то необходимо вначале выполнить Import Dictionary, скачав из интернета любой русскоязычный словарь.

Далее приведены формулы (П1.2), (П1.1), рис.П1.2, рис.П1.1, табл.П1.2, табл.П1.1.

$$\pi \approx 3,141. \quad (\text{П1.1})$$



Рис.П1.1. Вид на гидробашню СПбПУ [11]

Таблица П1.1

Представление данных для сквозного примера по ВКР [10]

$G$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$K$
$g_1$	0	1	1	0	1
$g_2$	1	2	0	1	1
$g_3$	0	1	0	1	1
$g_4$	1	2	1	0	2
$g_5$	1	1	0	1	2
$g_6$	1	1	1	2	2

## П1.1. Параграф приложения

### П1.1.1. Название подпараграфа

Название подпараграфа оформляется с помощью команды `\subsection{...}`.

Использование подподпараграфов в основной части крайне не рекомендуется.

#### П1.1.1.1. Название подподпараграфа

$$\pi \approx 3,141. \quad (\text{П1.2})$$



Рис.П1.2. Вид на гидробашню СПбПУ [11]

Таблица П1.2

Представление данных для сквозного примера по ВКР [10]

$G$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$K$
$g_1$	0	1	1	0	1
$g_2$	1	2	0	1	1
$g_3$	0	1	0	1	1
$g_4$	1	2	1	0	2
$g_5$	1	1	0	1	2
$g_6$	1	1	1	2	2

## Приложение 2

### Некоторые дополнительные примеры

В приложении<sup>П2.1</sup> приведены формулы (П2.2), (П2.1), рис.П2.2, рис.П2.1, табл.П2.2, табл.П2.1

$$\pi \approx 3,141. \quad (\text{П2.1})$$



Рис.П2.1. Вид на гидробашню СПбПУ [11]

Таблица П2.1

Представление данных для сквозного примера по ВКР [10]

$G$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$K$
$g_1$	0	1	1	0	1
$g_2$	1	2	0	1	1
$g_3$	0	1	0	1	1
$g_4$	1	2	1	0	2
$g_5$	1	1	0	1	2
$g_6$	1	1	1	2	2

---

<sup>П2.1</sup>Внимание! Пример оформления подстрочной ссылки (сноски).

## П2.1. Подраздел приложения

$$\pi \approx 3,141. \quad (\text{П2.2})$$



Рис.П2.2. Вид на гидробашню СПбПУ [11]

Таблица П2.2

Представление данных для сквозного примера по ВКР [10]

$G$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$K$
$g_1$	0	1	1	0	1
$g_2$	1	2	0	1	1
$g_3$	0	1	0	1	1
$g_4$	1	2	1	0	2
$g_5$	1	1	0	1	2
$g_6$	1	1	1	2	2