	<p><b>Министерство науки и высшего образования Российской Федерации</b> <b>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение</b> <b>высшего образования</b> <b>«Московский государственный технический университет</b> <b>имени Н.Э. Баумана</b> <b>(национальный исследовательский университет)»</b> <b>(МГТУ им. Н.Э. Баумана)</b></p>
---	---

ФАКУЛЬТЕТ \_\_\_\_\_ «Информатика и системы управления»

КАФЕДРА \_\_\_\_\_ «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»

## **ОТЧЕТ ПО ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКЕ**

Студент \_\_\_\_\_ Хамзина Регина Ренатовна  
*фамилия, имя, отчество*

Группа \_\_\_\_\_ ИУ7-43Б

Тип практики \_\_\_\_\_ технологическая

Название предприятия \_\_\_\_\_ МГТУ им. Н. Э. Баумана

Студент	_____	<u>Хамзина Р. Р.</u>
	<i>подпись, дата</i>	<i>фамилия, и.о.</i>

Руководитель практики	_____	<u>Куров А. В.</u>
	<i>подпись, дата</i>	<i>фамилия, и.о.</i>

Оценка \_\_\_\_\_

2021 г.

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>2</b>
<b>1 Аналитическая часть</b>	<b>3</b>
1.1 Волновой процесс . . . . .	3
1.2 Методы визуализации волн . . . . .	4
1.2.1 Процедурные методы . . . . .	4
1.2.2 Методы на основе частиц . . . . .	5
1.2.3 Методы поля высот . . . . .	7
1.3 Существующие программные обеспечения . . . . .	8
1.4 Модели волны и предмета . . . . .	9
1.4.1 Модель волны . . . . .	9
1.4.2 Модель предмета . . . . .	10
1.5 Анализ алгоритмов удаления невидимых линий и поверхностей	11
1.5.1 Алгоритм Робертса . . . . .	11
1.5.2 Алгоритм, использующий Z-буфер . . . . .	12
1.5.3 Алгоритм обратной трассировки . . . . .	13
1.6 Анализ методов закрашивания . . . . .	14
1.6.1 Простая закрашка . . . . .	14
1.6.2 Закраска по Гуро . . . . .	14
1.6.3 Закраска по Фонгу . . . . .	15
<b>Литература</b>	<b>17</b>

# Введение

Одними из областей применения компьютерной графики являются фильмы и компьютерные игры. В данных отраслях компьютерная графика решает задачи представления объектов и процессов реальной жизни. Способ визуализации предметов и действий оценивают по таким характеристикам, как реалистичность результата и время выполнения. Для повышения указанных параметров создаются новые алгоритмы и методы моделирования.

Представление жидкости - одна из наиболее распространенных моделей, которую реализуют в дизайне компьютерных игр и кинематографических спецэффектах: моделирование водоёмов, процессов смешивания и движения водных потоков [1]. Важным физическим явлением для создания водоемов является образование волн на поверхности воды [2]. Для получения более точного изображения визуализируют круговые волны, наложение волн, их прозрачность.

Поверхность воды рассматривают в системе с окружающим миром: при контакте с предметами и препятствиями. Особую сложность для моделирования представляют волны, образованные при движении объектов по воде [3].

Цель работы - разработать программное обеспечение, которое предоставляет возможность визуализации линейных волн, образованных при взаимодействии поверхности воды с движущимся твердым телом.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- проанализировать методы и алгоритмы, моделирующие волновую поверхность и предмет на воде;
- выбрать алгоритмы и структуры данных для визуализации описанной выше системы;
- реализовать выбранные алгоритмы моделирования;
- провести сравнение физических характеристик разработанной модели и реальных волн, взаимодействующих с объектом.

# 1 Аналитическая часть

## 1.1 Волновой процесс

При каком-либо внешнем воздействии на поверхность воды (ветер, движение корабля, падение камня) частицы жидкости опускаются вниз, и водная поверхность становится вогнутой. Сила тяжести или сила поверхностного натяжения стремятся вернуть частицы в состояние равновесия. При этом частицы воды переходят это положение, и поверхность воды становится выпуклой. Движение передается от одних частиц к другим. Так на водной поверхности появляются волны. Волновой процесс показан на рисунке 1.1.

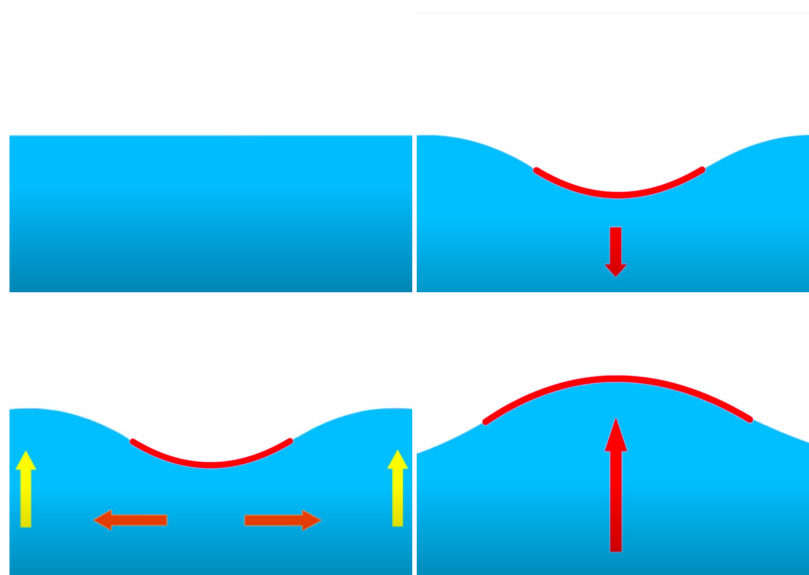


Рис. 1.1: Процесс образования волны.

Если восстановить равновесие стремится сила тяжести, то волны называются гравитационными, если сила поверхностного натяжения - капиллярными. Когда силы сопоставимы, волны называют капиллярно-гравитационными. Механизм образования волн подчиняется закону дисперсии. Дисперсия волн - это зависимость скорости распространения волн от их частоты. Именно дисперсия создает сложную картину волн, образованных телом в воде.

В зависимости от требований к результату моделирования выбирается определенный метод визуализации. Так как в центре работы дисперсионные волны, для выполнения поставленных задач необходим такой метод

моделирования, при котором выполняется дисперсионное соотношение, т. е. корректно обрабатывается взаимодействие волны и объекта.

## 1.2 Методы визуализации волн

Существует три группы методов моделирования волн:

- процедурные;
- методы на основе частиц;
- метод поля высот.

### 1.2.1 Процедурные методы

В процедурных методах для представления движения волн используются периодические функции. В ранних работах в качестве такой функции выступала циклоида [4], далее стали использовать синусоиду [5]. Наложение периодических функций, изменяющихся во времени, создает волновую поверхность. Точка на такой поверхности описывает замкнутую круговую орбиту. Для создания различных волновых эффектов изменяют параметры уравнений орбиты, например, радиус, фазовый угол.

Процедурные методы чаще всего используют при визуализации масштабных волн океана. Преимуществом процедурного моделирования является возможность точно контролировать движение волнового спектра. Недостаток данных методов - сложность получения правильного взаимодействия волн с погруженными телами и границами.

Выделяют следующие процедурные методы:

- метод, основанный на модели Герстнера. Данный метод основан на решении уравнения Эйлера для гравитационных волн. Каждая частица на водной поверхности описывает окружность вокруг положения покоя. Тогда поверхность воды - кривая, которую описывает частица, находящаяся на расстоянии от центра окружности, которая катится по направляющей, как показано на рисунке 1.2. Эту кривую называют трохоидой.

Используя лагранжевую систему отсчета находят все необходимые для визуализации параметры волн [4];

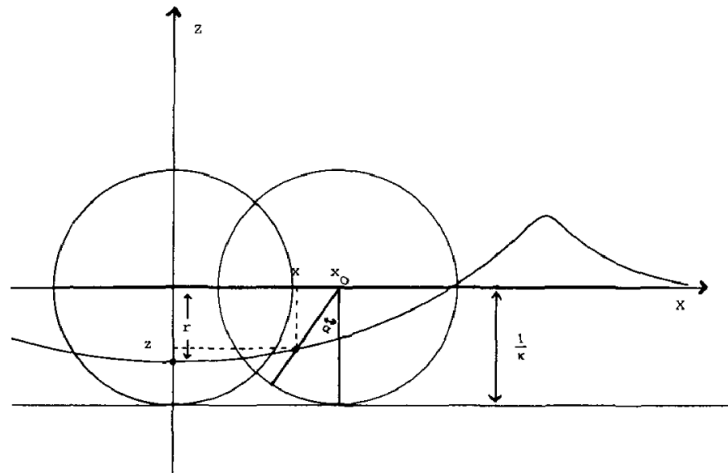


Рис. 1.2: Поверхность воды представлена трохоидой.

- спектральные подходы. В данных подходах поверхность океана - поле высот, которое имеет спектр, соответствующий значениям реальной волновой поверхности. Генерируются синусоидальные волны, которые приближенно соответствуют реальным волнам. Если рассматривать функцию представления волны в частотной области, то можно добиться получения трохоид [5][6].

### 1.2.2 Методы на основе частиц

В следующих методах моделирования волновой поверхности вода представляется как система частиц. Частицы движутся в соответствии с законами механики и обладают физическими величинами, т. е. задана функция. В определенный момент времени при помощи интерполяции можно получить значение этой функции в произвольной точке.

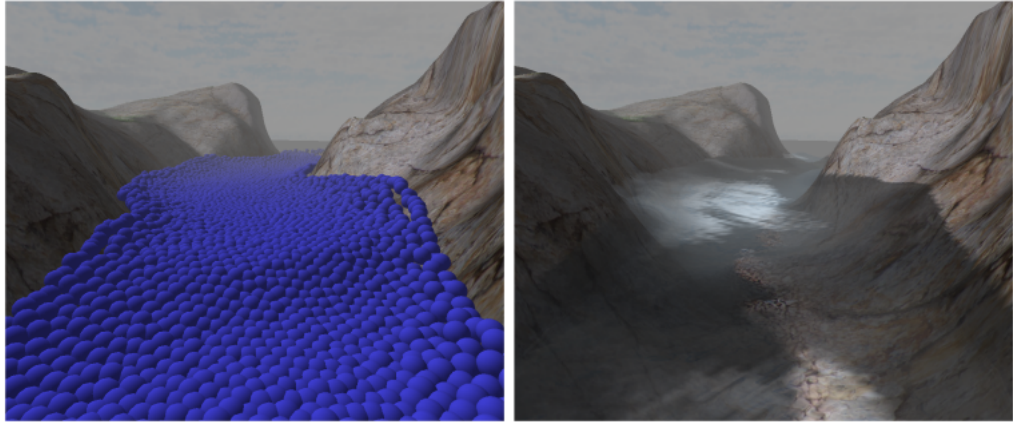


Рис. 1.3: Поверхность воды представляется частицами (левый часть рисунка) и отображается в реальном времени (правая часть рисунка).

Для создания реалистичного изображения необходимо большое количество частиц, поэтому данные методы используются при визуализации небольшого количества воды с неизвестной границей.

Наиболее распространённые методы на основе частиц:

- гидродинамика сглаженных частиц (SPH). Метод SPH состоит из двух шагов: интерполяции объемов частиц в произвольных положениях и аппроксимации пространственных производных. При интерполяции используется сглаживающая функция, называемая ядром, которая является кубическим сплайном. На результат интерполяции оказывают влияние только соседние точки, поэтому необходим поиск только соседних частиц. Так как частицы свободно перемещаются и перемешиваются в пространстве, встает необходимость эффективного решения задачи поиска соседних частиц. Тогда пространство разделяют на ячейки и суммируют по соседним ячейкам. Для большого объема жидкости данный метод создает нереалистичную поверхность [7];
- полунеявный метод движущихся частиц (MPS). Полунеявный метод движущихся частиц основывается на методе расчета движения жидкости Лагранжа. Уравнения движения жидкости дискретизируются с использованием движущихся частиц и их взаимодействий. Далее в методе MPS решается уравнение Навье-Стокса. При использовании данного метода существует возможность добавлять и удалять расчетные

точки во время моделирования, поэтому метод является адаптивным. Одной из главных проблем данного метода является создание точных границ при контакте жидкости с твердым предметом или другой жидкостью [8].

### 1.2.3 Метод поля высот

В случаях, когда визуализировать необходимо только поверхность воды, а не весь объем водоема, рассматривают волновое уравнение. Волновая поверхность представляется в виде двумерной функции - поля высот [9].

Такое упрощение обладает важным преимуществом - снижением вычислительных затрат, что означает повышение скорости моделирования. Кроме того метод поля высот гибко обрабатывает препятствия. Но при такой модели в каждой точке поверхности известно только одно значение высоты, как это показано на рисунке 1.4. Это означает одинаковую скорость распространения всех волн, так, невозможно создать обрушивающиеся волны.

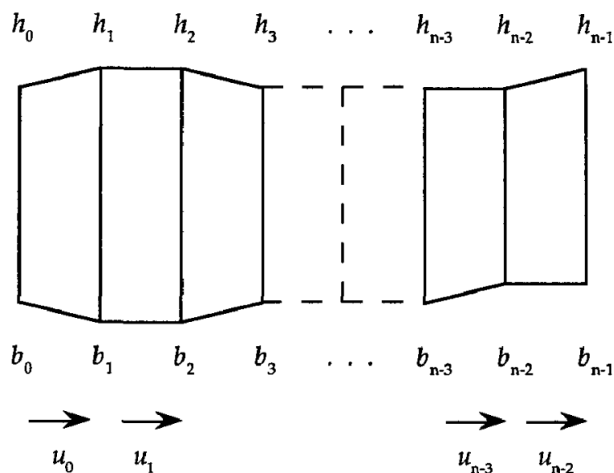


Рис. 1.4: Двумерное представление поверхности воды полями высот  $h$  с горизонтальной скоростью  $u$  и дна значениями  $b$ .

Комбинация методов поля высот и методов, основанных на частицах, позволяет обходить недостатки отдельных и создавать различные эффекты [10][11].



# Вывод

Процедурные методы и методы на основе частиц имеют сложности при работе с твердыми телами. Метод поля высот корректно обрабатывает взаимодействие с объектом, причем с более высокой скоростью моделирования. Недостатки метода поля высот не имеют значения при решении выбранной задачи. Моделирование волн будет реализовано при помощи метода поля высот.

## 1.3 Существующие программные обеспечения

Одним из самых популярных программных обеспечений для работы с трехмерной компьютерной графикой является Blender [12]. Для моделирования жидкости, в том числе и волн, в Blender существует физическая среда с открытым исходным кодом - Mantaflow [13]. Данный фреймворк может использоваться с графическим интерфейсом или без него в любой операционной системе. В этом программном продукте реализованы моделирование на основе уравнений Эйлера, гибкие системы частиц, моделирование жидкостей при помощи решателя FLIP, различные эффекты для жидкости, например, поверхностная турбулентность и вейвлет (небольшая рябь). На рисунке 1.5 показано моделирование гибкой системы частиц.

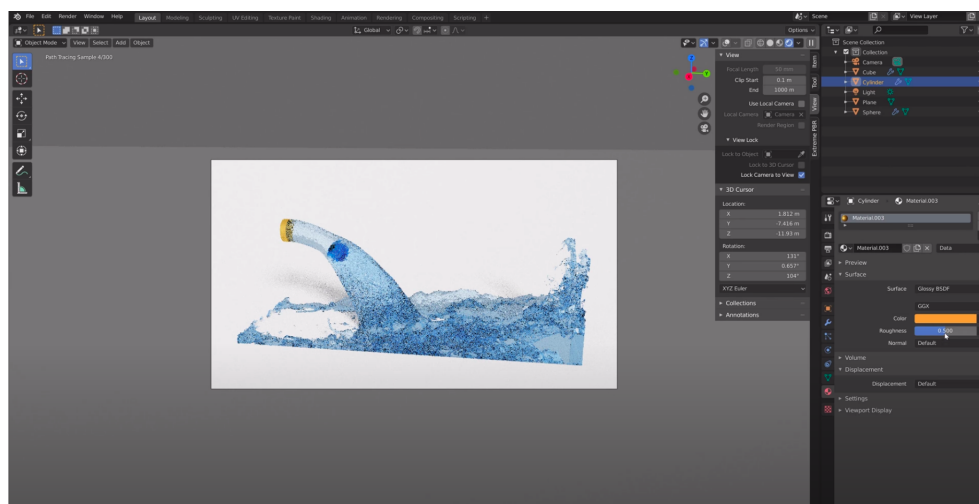


Рис. 1.5: Моделирование жидкости в среде Mantaflow в Blender.

В коммерческих и научных проектах используются CFD пакеты. Например, FLOW-3D [14] представляет набор инструментов для моделирования жидкостей, с целью исследования динамики их движения. Данный пакет позволяет моделировать линейные и нелинейные распространяющиеся поверхностные волны на основе метода конечных объемов. Для визуализации результатов используется программа визуализации FlowSight, как показано на рисунке 1.6.

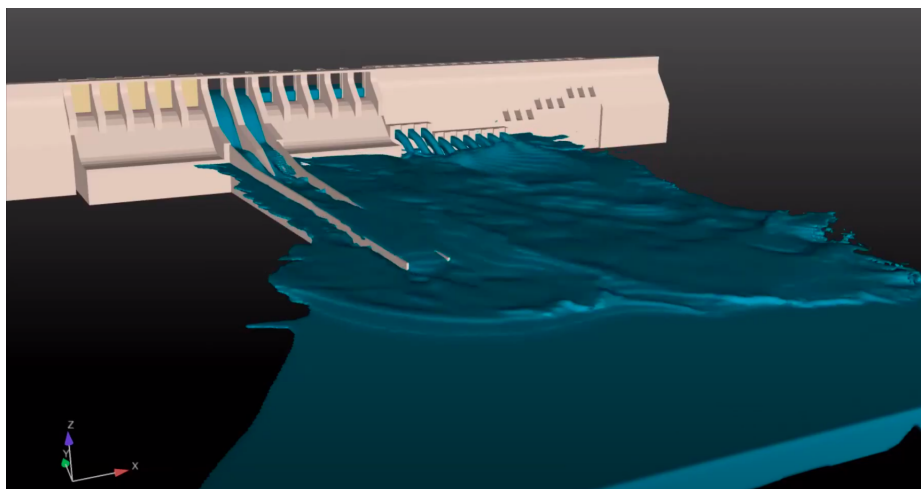


Рис. 1.6: Моделирование волн при помощи пакета FLOW-3D.

## 1.4 Модели волны и предмета

### 1.4.1 Модель волны

Геометрически волна состоит из следующих элементов, показанных на рисунке 1.7:

- гребень - множество точек волны с максимальным положительным отклонением от состояния равновесия;
- подошва - множество точек волны с наибольшим отрицательным отклонением от состояния равновесия.

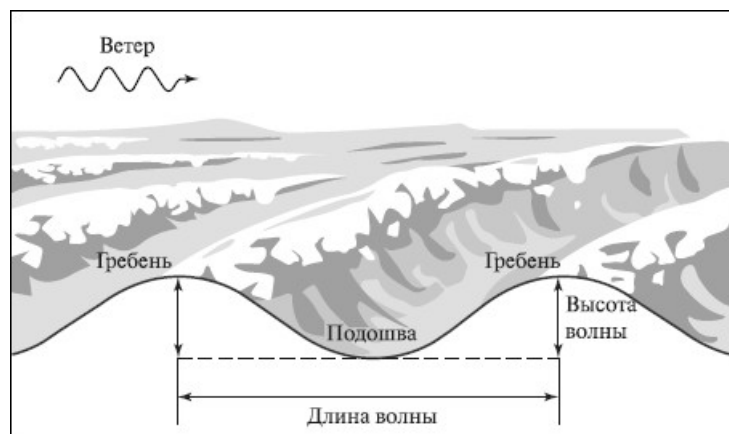


Рис. 1.7: Геометрическое строение волны.

Кроме того волна обладает следующими параметрами:

- высота - вертикальное расстояние от подошвы до гребня;
- длина - горизонтальное расстояние от гребня до гребня;
- период - временной интервал между прибытием последовательных гребней;
- скорость распространения (фазовая скорость).

Высота и длина волны указаны на рисунке 1.7.

По математическому описанию волны бывают линейные и нелинейные. Линейные волны обладают небольшой амплитудой, и их свойства описываются волновым уравнением для идеальной субстанции. Нелинейные волны обладают большой амплитудой, что изменяет математическую модель. Так как в центре рассмотрения дисперсионные волны, они обладают линейностью. Модель волны будет основываться на теории волн Эйри (линейной волновой теории) [15].

## 1.4.2 Модель предмета

В центре рассматриваемой системы движения дисперсионных волн, которые образованы в результате контакта поверхности воды с предметом. Для правильной обработки отражения волн от твердых тел важны параметры

только той части предмета, которая касается воды. В связи с этим нет необходимости рассматривать объект детально. Поэтому для его представления требуется такой параметр, как проекция на поверхность воды.

## 1.5 Анализ алгоритмов удаления невидимых линий и поверхностей

Для выбора подходящего алгоритма удаления невидимых линий и поверхностей необходимо рассмотреть существующие алгоритмы. Главными требованиями при выборе будут скорость работы и отсутствие ограничений к работе с объектами сцены.

### 1.5.1 Алгоритм Робертса

Алгоритм Робертса работает в объектном пространстве, кроме того работает только с выпуклыми телами. Если тело изначально является не выпуклым, то нужно его разбить на выпуклые составляющие.

Данный алгоритм состоит из следующих основных этапов:

- подготовка исходных данных;
- удаление линий, экранируемых самим телом;
- удаление линий, экранируемых другими телами.

Плюсы:

- высокая точность вычислений.

Минусы:

- рост числа трудоемкости алгоритма, как квадрата числа объектов;
- работа только с выпуклыми телами.

## 1.5.2 Алгоритм, использующий Z-буфер

Алгоритм Z-буфера решает задачу в пространстве изображений.

В данном алгоритме рассматривается два буфера. Буфер кадра (регенерации) используется для заполнения атрибутов (интенсивности) каждого пикселя в пространстве изображения. В Z-буфер (буфер глубины) можно помещать информацию о координате  $z$  для каждого пикселя.

Для начала необходимо подготовить буферы. Для этого в Z-буфер заносятся максимально возможные значения  $z$ , а буфер кадра заполняется значениями пикселя, который описывает фон. Также нужно каждый многоугольник преобразовать в растровую форму и записать в буфер кадра. Сам процесс работы заключается в сравнении глубины каждого нового пикселя, который нужно занести в буфер кадра, с глубиной того пикселя, который уже занесён в Z-буфер. В зависимости от сравнения принимается решение, нужно ли заносить новый пиксель в буфер кадра и, если нужно, также корректируется Z-буфер (в него нужно занести глубину нового пикселя).

Плюсы:

- произвольная сложность сцены;
- поскольку размеры изображения ограничены размером экрана дисплея, трудоемкость алгоритма зависит линейно от числа рассматриваемых поверхностей;
- элементы сцены заносятся в буфер кадра в произвольном порядке, поэтому в данном алгоритме не тратится время на выполнение сортировок.

Минусы:

- большой объем требуемой памяти;
- трудоемкость устранения лестничного эффекта;
- трудности реализации эффектов прозрачности.

### 1.5.3 Алгоритм обратной трассировки

Алгоритм обратной трассировки лучей отслеживает лучи в обратном направлении (от наблюдателя к объекту). Считается, что наблюдатель расположен на положительной полуоси  $z$  в бесконечности, поэтому все световые лучи параллельны оси  $z$ . В ходе работы испускаются лучи от наблюдателя и ищутся пересечения луча и всех объектов сцены. В результате, пересечение с максимальным значением  $z$  является видимой частью поверхности, и атрибуты данного объекта используются для определения характеристик пикселя, через центр которого проходит данный световой луч.

Эффективность процедуры определения пересечений луча с поверхностью объекта оказывает самое большое влияние на эффективность всего алгоритма. Чтобы избавиться от ненужного поиска пересечений было придумано искать пересечение луча с объемной оболочкой рассматриваемого объекта. Под оболочкой понимается некоторый простой объект, внутрь которого можно поместить рассматриваемый объект, к примеру параллелепипед или сферу.

В дальнейшем при рассмотрении пересечения луча и объемной оболочкой рассматриваемого объекта, если такого пересечения нет, то и соответственно пересечения луча и самого рассматриваемого объекта нет, и наоборот, пересечение найдено, то возможно, есть пересечение луча и рассматриваемого объекта.

Для расчета эффектов освещения сцены проводятся вторичные лучи от точек пересечения ко всем источникам света. Если на пути этих лучей встречается непрозрачное тело, значит данная точка находится в тени, иначе он влияет на освещение данной точки. Также для получения более реалистичного изображения сцены, нужно учитывать вклады отраженных и преломленных лучей.

Плюсы:

- возможность использования алгоритма в параллельных вычислительных системах.

Минусы:

- производительность алгоритма.

## Вывод

Для удаления невидимых линий и поверхностей выбран алгоритм Z-буфера, так как обладает важными преимуществами - высокой скоростью работы и произвольной сложностью сцены.

## 1.6 Анализ методов закрашивания

Методы закрашивания используются для затенения полигонов (или поверхностей, аппроксимированных полигонами) в условиях некоторой сцены, имеющей источники освещения.

### 1.6.1 Простая закрашка

Одной из самых простых моделей освещения является модель Ламберта. Она учитывает только идеальное диффузное отражение света от тела. Считается, что свет падающий в точку, одинаково рассеивается по всем направлениям полупространства. Таким образом, освещенность в точке определяется только плотностью света в точке поверхности, а она линейно зависит от косинуса угла падения. При этом положение наблюдателя не имеет значение, т.к. диффузно отраженный свет рассеивается равномерно по всем направлениям.

Большим недостатком данной модели является то, что согласно приведенной выше формуле, все точки грани будут иметь одинаковую интенсивность.

### 1.6.2 Закраска по Гуро

Данный алгоритм предполагает следующие шаги:

- вычисление векторов нормалей к каждой грани;
- вычисление векторов нормали к каждой вершине грани путем усреднения нормалей к граням;

- вычисление интенсивности в вершинах грани;
- интерполяция интенсивности вдоль ребер грани;
- линейная интерполяция интенсивности вдоль сканирующей строки.

Плюсы:

- хорошо сочетается с диффузным отражением;
- изображение получается более реалистичным.

Минусы:

- данный метод интерполяции обеспечивает лишь непрерывность значений интенсивности вдоль границ многоугольников, но не обеспечивает непрерывность изменения интенсивности.

### 1.6.3 Закраска по Фонгу

При такой закрашке, в отличие от метода Гуро, вдоль сканирующей строки интерполируется значение вектора нормали, а не интенсивности.

Шаги алгоритма:

- вычисление векторов нормалей в каждой грани.
- вычисление векторов нормали к каждой вершине грани.
- интерполяция векторов нормалей вдоль ребер грани.
- линейная интерполяция векторов нормалей вдоль сканирующей строки.
- вычисление интенсивности в очередной точке сканирующей строки.

Плюсы:

- можно достичь лучшей локальной аппроксимации кривизны поверхности.

Минусы:

- ресурсоемкость;
- вычислительная сложность.



## Вывод

Для закрашивания выбран алгоритм Гуро, так как данный алгоритм обладает важным преимуществом - высокой реалистичностью изображения.

## Вывод

В данном разделе были формально описаны модели волны и предметы, были рассмотрены алгоритмы удаления невидимых линий и поверхностей, методы закрашивания поверхностей. В качестве алгоритма моделирования дисперсионных волн был выбран метод поля высот, в качестве алгоритма удаления невидимых линий и поверхностей был выбран алгоритм z-буфера, в качестве метода закрашивания был выбран алгоритм закрашки Гуро.

# Литература

- [1] Efficient Simulation of Large Bodies of Water by Coupling Two and Three Dimensional Techniques [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://graphics.pixar.com/library/TwoDThreeDWaterSim/paper.pdf> (дата обращения 17.09.2021).
- [2] A Survey of Ocean Simulation and Rendering Techniques in Computer Graphics [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00587242> (дата обращения 17.09.2021).
- [3] Dispersion Kernels for Water Wave Simulation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://graphics.pixar.com/library/DispersionKernels/paper.pdf> (дата обращения: 12.09.2021).
- [4] A Simple Model of Ocean Waves [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.iro.umontreal.ca/poulin/fournier/papers/p75-fournier.pdf> (дата обращения: 23.09.2021).
- [5] A Survey of Ocean Simulation and Rendering Techniques in Computer Graphics [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.math.tecnico.ulisboa.pt/~jnatar/ficcao/ocean.pdf> (дата обращения: 23.09.2021).
- [6] Interactive Water Surfaces [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://people.cs.clemson.edu/jtessen/reports/papers\\_files/Interactive\\_Water\\_Surfaces.pdf](https://people.cs.clemson.edu/jtessen/reports/papers_files/Interactive_Water_Surfaces.pdf) (дата обращения: 23.09.2021).
- [7] SPH Fluids in Computer Graphics [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/286443419\\_SPH\\_Fluids\\_in\\_Computer\\_Graphics\\_Eurographics\\_State-of-the-art\\_report](https://www.researchgate.net/publication/286443419_SPH_Fluids_in_Computer_Graphics_Eurographics_State-of-the-art_report) (дата обращения: 23.09.2021).
- [8] Particle-Based Simulation of Fluids [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/2924177\\_Particle-Based\\_Simulation\\_of\\_Fluids](https://www.researchgate.net/publication/2924177_Particle-Based_Simulation_of_Fluids) (дата обращения: 23.09.2021).
- [9] Rapid, Stable Fluid Dynamics for Computer Graphics [Электронный ресурс]. Режим доступа:

[https://www.researchgate.net/publication/220721601\\_Stable\\_Fluid\\_Dynamics\\_for\\_Comput](https://www.researchgate.net/publication/220721601_Stable_Fluid_Dynamics_for_Comput)  
(дата обращения: 23.09.2021).

- [10] SPH Based Shallow Water Simulation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://matthias-research.github.io/pages/publications/SPHShallow.pdf> (дата обращения: 23.09.2021).
- [11] Real-time Simulation of Large Bodies of Water with Small Scale Details [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://matthias-research.github.io/pages/publications/hfFluid.pdf> (дата обращения: 23.09.2021).
- [12] Blender. Режим доступа: <https://www.blender.org/> (дата обращения: 04.10.2021).
- [13] Mantaflow. Режим доступа: <http://mantaflow.com/> (дата обращения: 04.10.2021).
- [14] FLOW-3D. Режим доступа: <https://www.flow3d.com/modeling-capabilities/waves/> (дата обращения: 04.10.2021).
- [15] G. Airy. Tides and Waves. 1849.