

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

Факультет компьютерных систем и сетей

Кафедра ЭВМ

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА  
по дисциплине «Основы теории систем»  
на тему «Методология научного исследования системы на примере  
динамической симуляции объемного огня с помощью средств воксельной  
графики»

Выполнил  
магистрант 2 курса  
специальности ТВ и ОВ  
группы 858441 \_\_\_\_\_ А.В. Стаховский

Проверил  
ктн, доцент \_\_\_\_\_ А.К. Дадыкин

Минск 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
Общая характеристика работы . . . . .	5
Глава 1 Обзор литературных источников по динамической симуляции огня . . . . .	6
1.1 Эволюция алгоритмов симуляции огня . . . . .	6
1.1.1 Истоки. Система частиц . . . . .	6
1.1.2 Оффлайн симуляция . . . . .	7
1.1.3 Онлайн симуляция . . . . .	9
1.2 Обзор и классификация алгоритмов симуляции огня . . . . .	11
Выводы по главе 1 . . . . .	12
Список использованных источников . . . . .	13

## ВВЕДЕНИЕ

Дым и огонь могут значительно влиять на визуальное восприятие объектов сцены, а также влиять на свойства других объектов сцены. По этой причине огонь и дым являются важными составляющими во многих прикладных областях, таких как симуляция полетов, ландшафтный дизайн, анимация и киноиндустрия. В настоящее время крайне популярен жанр фэнтези, в котором зачастую фигурируют множество огненных и огнедышащих существ, таких как драконы, ифриты, птицы феникс. Для создания данных существ в видеоиграх и кино, требуется моделировать поведение огня, которому не существует аналога в реальном мире. Из-за широкого спектра художественных требований, иногда требуется, чтобы огонь вел себя как горящий газ, в других ситуациях нужно, чтобы он вел себя как горящая жидкость либо имел и вовсе фантастический вид. Часто требуется, чтобы огонь взаимодействовал с окружающими его твердыми телами, а также водой и ветром.

Художники и дизайнеры могут составить крайне детализированный визуальный концепт огня и описание его поведения, однако зачастую крайне сложно преобразовать данные идеи в соответствующие математические модели для симуляции огня в графических сценах. Анимация и визуализация данного явления сложной задачей и представляет определенный научный интерес.

Первая широко известная работа по симуляции была опубликована в 1982 году, и полученная модель была использована в фильме "Звездный путь 2: Гнев Хана" для создания сцены взрыва генезис-бомбы. С развитием вычислительной техники и активные научные исследования позволили значительно увеличить визуальное качество эффектов в кино. Современное состояние работ в данной области можно увидеть в фильме "Хоббит: Битва пяти воинств" в сцене, где Смауг сжигает пламенем Эсгарот. При создании эффектов для кинофильмов главную роль играет визуальное качество эффектов, а также гибкость и простота в настройке параметров, для моделирования огня с необходимым визуальным стилем и поведением. Скорость симуляции является вторичной, создание кадра может занимать несколько часов. Современные алгоритмы, используемые в кино позволяют создавать высокореалистичный огонь, однако применение данных алгоритмов для симуляции в режиме реального времени затруднительно. Например, в видеоиграх необходимо успевать рассчитывать и отрисовывать 60 и более кадров каждую секунду. Малое время на отрисовку кадра и необходимость взаимодействия огня с объектами окружающей среды приводят накладывают дополнительные ограничения на выбор алгоритмов симуляции.

Симуляция трехмерного огня в режиме реального времени находит свое применение в различных интерактивных приложениях. Среди интерактивных приложений, анимации огня наиболее востребованы в видеоиграх. В видео-

играх необходимость симуляции огня была с самого момента их появления, однако, всего два десятилетия назад стало возможным использовать огонь в трехмерных сценах. В компьютерной графике довольно часто требуется найти компромисс между скоростью и реализмом. В приложениях реального времени, скорости отрисовки отдается наибольший приоритет; увеличенный реализм бесполезен, если частота кадров не дотягивает до определенного уровня. Поэтому основной проблемой рендеринга в реальном времени является поиск таких алгоритмов, которые позволяют получить достаточную реалистичность, при которой частота кадров будет не менее минимального порога приемлемой частоты кадров.

Для каждого из желаемых атрибутов необходимо выбрать алгоритм, который оптимален для наших целей. Такая оптимальность зачастую приводит к созданию различных ухищрений для достижения желаемого эффекта. Основная идея в том, что если результаты визуально приемлемые, и симуляция идет достаточно быстро, практически никто не заметит особенной разницы. В этом нет никакого стыда, поскольку такие ухищрения являются частью индустрии компьютерной графики с самого ее появления.

За последние 10 лет, значительно возросла производительность компьютеров, особенно стремительно развивались графические карты. Современное аппаратное обеспечение компьютеров, сделало возможным применение более сложных моделей, использование алгоритмов анимации и рендеринга, использование которых раньше было невозможно из-за аппаратных ограничений. В частности это активизировало интерес рендерингу с помощью воксельной графики, некоторые из алгоритмов воксельной графики были разработаны более 30 лет назад, однако, их использование было невозможно либо крайне ограничено из-за требований к оперативной памяти. В актуальных публикациях используются уравнения Навье-Стокса для вычисления скорости, плотности и температуры частиц огня. Данный метод позволяет добиться высокой реалистичности анимации, однако имеет высокую вычислительную сложность по количеству операций.

В настоящее время, разработчики игровых движков исследуют возможности использования воксельной графики для создания реалистичного тумана, дыма, огня, воды, рендеринга облаков, создают инструменты для создания воксельных сцен.

Актуальные алгоритмы анимации огня и современные алгоритмы трехмерного рендеринга являются предметом данной диссертации, цель которой – создание системы для динамической симуляции огня.

Компоненты данной системы в дальнейшем могут быть интегрированы в игровые движки, трехмерные редакторы.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Объект и предмет исследования**

*Объектом исследования* является огонь в трехмерной графике как один из элементов трехмерной сцены.

*Предметом исследования* является динамическая симуляция объемного огня в режиме реального времени, особенности использования воксельной графики для создания реалистичной симуляции.

### **Цель и задачи исследования**

*Цель исследования* — разработка системы динамической симуляции трехмерного огня с использованием средств воксельной графики.

### **Задачи исследования:**

1. Обзор и анализ научных работ по современным алгоритмам анимации огня и трехмерному рендерингу.
2. Теоретические основы динамической симуляции огня.
3. Обзор основных использованных алгоритмов.
4. Реализация системы.

### **Связь с реальным сектором экономики**

На основе разработанной системы можно сформировать модули для популярных игровых движков и графических редакторов, что обеспечит доступность системы для широкого круга лиц и позволит распространять систему на соответствующих коммерческих площадках. Полученные модули можно будет легко интегрировать в коммерческие продукты.

### **Апробация диссертации**

Результаты исследований по теме диссертации были представлены в виде доклада "Современные алгоритмы моделирования аморфных объектов" и представлены на 55-ой юбилейной научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР в 2019 году.

### **Публикация результатов исследований**

Результаты исследований были опубликованы в виде тезисов доклада на 55-ой юбилейной научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР [1]. Также на основе полученных в ходе исследований результатов была опубликована статья "Анализ современных алгоритмов симуляции огня" [2].

# ГЛАВА 1

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ДИНАМИЧЕСКОЙ СИМУЛЯЦИИ ОГНЯ

Моделирование бесформенных объектов, таких как дым, огонь, туман, дымка является предметом постоянных исследований в области компьютерной графики, поскольку данные объекты не имеют четко очерченных границ и являются мобильными по своей природе. Высокая коммерческая ценность данных эффектов в кинематографе и видеоиграх является двигателем постоянных исследований в данной области. Наибольший вызов представляет моделирование данных объектов в реальном времени, где необходимо получить максимально реалистичную симуляцию за время обновления экранного кадра (60Hz+) [3].

### 1.1 Эволюция алгоритмов симуляции огня

#### 1.1.1 Истоки. Система частиц



Рисунок 1.1.1 – Первоначальный взрыв

Пионером компьютерной симуляции огня является Reewes W. T. В 1983 году в своей работе он ввел понятие система частиц в качестве примитива для моделирования, анимации и рендеринга [4]. В фильме "Звездный путь 2: Гнев

Хана” он смоделировал так называемую ”расширяющуюся стену огня”, созданную с помощью двухуровневой системы частиц. Система частиц верхнего уровня находилась в центре взрыва генозис-бомбы, она генерировала частицы, которые в свою очередь являлись системами частиц. Эти системы частиц использовались для моделирования взрывов, при которых каждая такая система частиц вела себя как небольшой вулкан, извергающийся в сторону распространения взрывной волны и затухающий под воздействием силы гравитации. Поскольку частицы имеют дискретную природу, для достижения хороших результатов потребовалось колоссальное количество частиц. Но, поскольку моделирование в реальном времени не требовалось, это не оказалось проблемой.

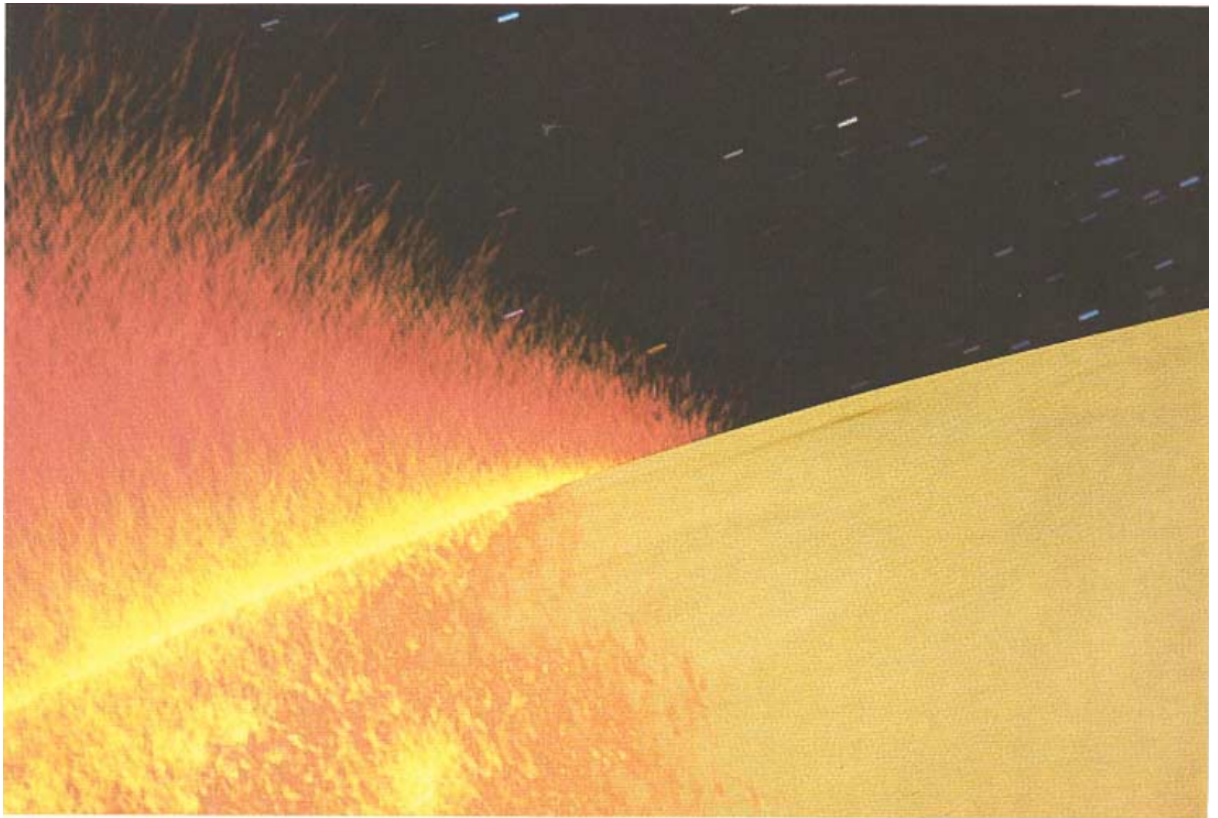


Рисунок 1.1.2 – Стена огня вот-вот поглотит камеру

### 1.1.2 Оффлайн симуляция

В данное время наибольшего успеха исследователи добились в нечувствительном к времени симуляции кинематографе. Несмотря на то, что данная работа нацелена на компьютерную графику реального времени, необходимо упомянуть несколько работ в области оффлайн симуляции, поскольку понимание основных идей, заложенных в них, позволил перенести некоторые из них в область графики реального времени.

В публикации 2002 года Nguen и его коллеги представили метод моделирования огня, полностью основанный на физико-математическом подхо-

де [5]. В симуляции использовались несжатые уравнения Навье-Стокса для горячих газов, это позволило также смоделировать эффект расширения, вызванный испарением, и эффект текучести поднимающихся дыма и сажи. Как видно на изображении, данная симуляция отличается реалистичным позиционированием и движением газообразных субстанций. Однако данный подход сложно реализовать в рендеринге реального времени, поскольку необходимо находить решение большого количества комплексных уравнений за время кадра.



Рисунок 1.1.3 – Два горящих полена находятся на земле и являются источником топлива. Бревно, лежащее поперек, еще не загорелось, поэтому пламя его обтекает

В 2008 году Horwath H. и Geiger W. представили инновационную комбинацию симуляции с помощью крупной решетки частиц и тонко настроенных визуально-ориентированных улучшений симуляции, рассчитываемых на GPU [6]. Полученные изображения имеют поразительную детализацию и могут быть легко интегрированы в кинематографические фотоснимки.

Данная техника улучшения симуляции использует особенности и ограничения зрительного восприятия, а также особенности концентрации внимания зрителя. Множество независимых GPU используются для быстрого увеличения качества изображения, что позволяет достичь очень высокого разрешения.





Рисунок 1.1.4 – Три различных кадра симуляции огня. Быстро движущийся огненный шар с искрами. Извивающийся костер. Плотная стена дыма и огня.



(а) Огонь создан с помощью пререндеренного ядра битмапа, которое окружают светящиеся анимированные в реальном времени частицы



(в) Объемный факел, созданный из непрозрачных полигонов

Рисунок 1.1.5 – Скриншоты из Quake (1996) [7]

### 1.1.3 Онлайн симуляция

Трехмерный огонь, моделируемый в реальном времени, находит свое применение в интерактивных приложениях. Среди интерактивных приложений можно выделить компьютерные игры, в которых необходимость показывать взрывы появилась практически с самого момента их появления. Компьютерные игры являются основными потребителями графических компьютерных анимаций огня. Однако это стало возможным лишь пару десятилетий назад. С тех пор скорость аппаратного обеспечения для рендеринга время росла экспоненциально, открывая возможности для все более и более детализированных эффектов. К сожалению, поскольку игры зачастую являются проприетарными по своей природе, литературных источников по алгоритмам, используемых в играх крайне мало. Компания NVIDIA представила в 2014 году систему NVIDIA FlameWorks. Данная система позволяет добавлять реалистичный огонь, дым и эффекты взрывов в игры. Данная система совмещает передовую симуляцию жидкостей на основе решетки вместе с эффективной системой объемного рендеринга, все оптимизировано для работы в реальном времени. Все вычисления выполняются на GPU с помощью DirectX 11 [9].

Из опубликованных работ по симуляции огня в режиме реального вре-



Рисунок 1.1.6 – Far Cry 2 (2008) [8]. На момент своего выхода в игре была наиболее реалистичная симуляция степных пожаров



Рисунок 1.1.7 – Демонстрация работы NVIDIA FlameWorks

мени можно выделить работу [10]. В данной работе представлена система, которая предназначена для использования 3d-художниками. Пользователь может задать форму пламени на различных этапах в виде рисунка, система производит расчет промежуточных кадров и позволяет экспортировать результаты для рендеринга в графических редакторах. Данный метод использует в качестве модели частицы, рендеринг осуществляется с помощью сплайнов. Данный алгоритм развивает идеи, предложенные ранее в [11].

В работах [12], описывается симуляция огня с помощью вокселей. Данный метод позволяет достичь высокий уровень взаимодействия огня с окружающей средой и объектами. Данный метод позволяет реализовать уничтожение огнем объектов из определенных материалов. Недостатком данного метода яв-

ляется необходимость использования большого количества памяти для хранения данных о вокселях.



Рисунок 1.1.8 – Воксельное пламя из [12]

## 1.2 Обзор и классификация алгоритмов симуляции огня

Различные методы применяемые при симуляции огня можно условно разделить на следующие группы:

- текстурный маппинг;
- система частиц;
- физико-математические методы;
- клеточные автоматы;
- томографическая реконструкция и др.

В работе [13] представлен различных техник для создания реалистичной симуляции огня. В данной работе проанализировано несколько техник симуляции огня, включая симуляцию с помощью вокселей и симуляцию с помощью стабильных флюидов. Приведено кратное описание каждой техники, с описанием их преимуществ и недостатков.

В 2011 году ZhaoHui W., Zhong Z. и Wei W. представили статью [14], в которой проанализировали современные алгоритмы симуляции реалистичного огня. Ими был проведен анализ наиболее популярных методов по следующим критериям:

- применимость в реальном времени;
- степень реалистичности;
- пространственно-временная сложность;
- конфигурируемость;
- интерактивность.

Результаты данного исследования можно увидеть в таблице ниже.

Таблица 1.2.1 – Сравнение производительности различных методов симуляции огня

	Real-time	Realistic	Spatio-temporal complexity	Editability	Interactivity
Texture mapping	High	Low	Low	Low	No
Particle system	Inversely with particles count	Medium	Proportional to particles count	Random large and difficult to control	Medium
Mathematical physics-based	Low	High(physical consistency)	High	Parameter control	High
Cellular automation	Inversely proportional to the complexity of combined requirements	Have certain realistic	Cell simple but the combined complex	Modium	Limited
Tomographic reconstruction	No	High(visual consistency)	Data acquisition and processing complex	No	No

### Выводы по главе 1:

1. При выборе алгоритма для динамической симуляции необходимо найти баланс между реалистичностью симуляции и скоростью симуляции. Частота кадров не должна падать ниже заданного минимального уровня.

2. Моделирование огня с помощью системы частиц до сих пор является наиболее популярным методом, который позволяет обеспечить средний уровень реалистичности, но при небольшом количестве частиц обеспечивает высокую скорость симуляции. Данный метод будет использован для моделирования частиц в рамках диссертации.

3. Для расчета параметров анимации огня в диссертации будут использованы уравнения Навье-Стокса, поскольку они позволяют получить крайне реалистичную анимацию. Для борьбы с высокой сложностью расчетов в дальнейшем будет выбран оптимальный числовой метод, который позволит получить решение с достаточной точностью, сохранив при этом приемлемую частоту кадров.

4. В качестве примитива для рендеринга в разрабатываемой системе будут использованы воксели. Воксельная графика позволяет получить визуально реалистичное изображение, также упроститься реализация взаимодействия огня с окружающими объектами. Для уменьшения требований к аппаратным ресурсам будут использованы оптимизационные алгоритмы, которые позволят уменьшить количество примитивов для отрисовки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Стаховский, А.В. Современные алгоритмы моделирования аморфных объектов [Текст] / А.В. Стаховский / БГУИР. — 55-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. — [Б. м. : б. и.], 2019. — Апрель. — С. 63.
- [2] Стаховский, А.В. Анализ современных алгоритмов симуляции огня [Текст] / А.В. Стаховский // Молодой ученый. — 2019. — Ноябрь. — № 47. — С. 100–105.
- [3] Gillies, Duncan Fyfe. Third Year and MSc Interactive Computer Graphics Course [Text] / Duncan Fyfe Gillies. — [S. l. : s. n.].
- [4] Particle systems — a technique for modeling a class of fuzzy objects [Text]. — Detroit, Michigan : [s. n.], 1983. — July. — Proceedings of the 10th annual conference on computer graphics and interactive techniques.
- [5] Physically Based Modeling and Animation of Fire [Text]. — San Antonio, Texas : [s. n.], 2002. — July. — Proceedings of the 29th annual conference on computer graphics and interactive techniques.
- [6] Stock, Mark. Smoke Water Fire [Text] / Mark Stock // ACM SIGGRAPH 2008 Art Gallery. — SIGGRAPH '08. — New York, NY, USA : ACM, 2008. — P. 102–102. — Access mode: <http://doi.acm.org/10.1145/1400385.1400457>.
- [7] de Kruijf, Marc. firestarter – A Real-Time Fire Simulator [Text] : Master's thesis / Marc de Kruijf ; Computer Science Capstone. — [S. l. : s. n.].
- [8] Стала ли Far Cry лучше? История серии - Блоги - блоги геймеров, игровые блоги, создать блог, вести блог про игры [Электронный ресурс]. — 2018. — Режим доступа: [https://www.playground.ru/blogs/far\\_cry\\_new\\_dawn/stala\\_li\\_far\\_cry\\_luchshe\\_istoriya\\_serii-339049/](https://www.playground.ru/blogs/far_cry_new_dawn/stala_li_far_cry_luchshe_istoriya_serii-339049/).
- [9] Green, Simon. NVIDIA FlameWorks: Real-time Fire Simulation [Text] / Simon Green // ACM SIGGRAPH 2014 Computer Animation Festival. — SIGGRAPH '14. — New York, NY, USA : ACM, 2014. — P. 1–1. — Access mode: <http://doi.acm.org/10.1145/2633956.2658828>.
- [10] Hladký, Jozef. Fire Simulation in 3D Computer Animation with Turbulence Dynamics including Fire Separation and Profile Modeling [Text] / Jozef Hladký, Roman Ďurikovič // International Journal of Networking and Computing. — 2018. — 07. — Vol. 8. — P. 186–204.
- [11] Vanzine, Y. Realistic Real-Time Rendering of Fire in a Production System : Feasibility Study [Text] / Y. Vanzine. — [S. l. : s. n.], 2007.
- [12] Voxels on Fire [Text] / Ye Zhao, Xiaoming Wei, Zhe Fan [et al.] // IEEE Visualization. — [S. l. : s. n.], 2003.
- [13] Beaudoin, Philippe. Realistic and Controllable Fire Simulation. [Text] / Philippe Beaudoin, Sébastien Paquet, Pierre Poulin. — [S. l. : s. n.], 2001. — 01. — P. 159–166.



[14] Realistic Fire Simulation: A Survey [Text]. — [S. l. : s. n.], 2011. — 12th International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics.