

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	8
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	9
ВВЕДЕНИЕ	10
1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ	12
1.1. Модели распространения лесных пожаров	12
1.1.1 Модель распространения пожара на основе сетчатого представления деревьев	12
1.1.2 Модель распространения пожара на основе многомодульного представления деревьев	14
1.1.3 Модель распространения пожара на основе ограниченного представления деревьев	16
1.2 Модели динамического поведения ветвей дерева	19
1.2.1 Динамика ветвей на основе гибких стержней	19
1.2.2 Динамика ветвей на основе сочленений	20
1.3 Модели теплопередачи для распространения лесных пожаров	22
1.3.1 Модель теплопередачи на основе жидкостного решателя Эйлера-Лагранжа	22
2. РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ	27
2.1. Разработка модели растительности	27
2.1.1. Разработка алгоритма генерации моделей растительности	27
2.1.2. Разработка методологии для модели растительности	33
2.2. Разработка модели распространения лесных пожаров	34
2.2.1. Разработка алгоритма теплопередачи для модулей деревьев	35
2.2.2. Разработка методологии для модели распространения лесных пожаров	37
3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ	40
3.1. Выбор инструментария	40
3.2. Реализация алгоритма генерации моделей растительности	41
3.3. Реализация алгоритма распространения лесных пожаров	45
3.3.1. Реализация алгоритма теплопередачи на основе жидкостного решателя Эйлера-Лагранжа	45
3.3.2. Реализация алгоритма теплопередачи для модулей деревьев	49

3.4. Вывод критериев оценки модели	51
3.4.1. Критерии оценки производительности модели	51
3.4.2. Критерии оценки функциональности модели	52
4. ТЕСТИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕШЕНИЯ	53
4.1. Оценка производительности разработанной модели	53
4.1.1. Оценка производительности модели без учета физики растительности	53
4.1.2. Оценка производительности модели с учетом физики растительности	56
4.2. Оценка функциональности разработанной модели	60
4.3. Анализ результатов	62
4.4. Потенциал для улучшений	64
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	66

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

CPU – Central processing unit

GPU – Graphics processing unit

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Мезомасштабный – термин, обозначающий варьируемую степень детализации моделей растительности.

Инстанционный рендеринг – метод компьютерной графики, позволяющий эффективно отображать множество объектов, повторно используя один и тот же экземпляр объекта.

Жидкостный решатель – алгоритм, используемый для моделирования поведения жидкостей (вода, огонь, газ и другие) в заданной виртуальной среде.

ВВЕДЕНИЕ

С возросшим вниманием к исследованиям на тему прогнозирования исходов лесных пожаров появилась группа исследований, занимающихся разработкой трехмерных моделей лесных пожаров. Основная задача подобных моделей детально визуализировать процессы, происходящие во время лесных пожаров.

Одни модели сосредоточены на воспроизведении физики растительности, что позволяет деревьям реалистично реагировать на внешние воздействия. К числу таких воздействий можно отнести покачивание ветвей дерева на ветру, деформация структуры дерева в процессе горения и другие. Но зачастую подобные модели не ориентированы на воспроизведение полноценных лесных пожаров, поскольку существенно теряют в производительности при обработке детализированного леса.

Другие модели позволяют воспроизводить распространения огня для большого количества растительности в масштабах леса, но из-за тех или иных упрощений физические особенности деревьев игнорируются. Это существенно сказывается на возможностях использования данных моделей, ведь в таком случае физика растительности реализована либо по некоторому заданному сценарию, либо не реализована вовсе.

Так, даже с учётом существенного прогресса в данной области, совмещение моделирования физики растительности с полноценной моделью распространения лесных пожаров для использования в приложениях реального времени остается актуальной проблемой.

Целью работы является разработка модели распространения лесных пожаров, способной работать с множеством экземпляров растительности, обладающих физической формой, в режиме реального времени.

Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

- анализ существующих моделей распространения лесных пожаров;
- анализ существующих моделей реализации физики растительности;

- разработка модели распространения лесных пожаров на основе мезомасштабного представления растительности с учётом физики растительности;

- анализ полученных результатов.

Ключевыми метриками для оценки полученного решения будут служить время вычислений для оценки производительности разработанной модели распространения лесного пожара и минимальный набор физических действий, которое поддерживает разработанное представлением растительности.

Научная новизна данной работы заключается в том, что вводится новый способ представления растительности, который удачно комбинирует мезомасштабный (многомодульный) подход и способ расположения вдоль траектории кривых Безье. Первый обеспечивает переменный уровень детализации растительности за счет добавления или удаления модулей. Второе позволяет удобно приближать исходную геометрию дерева и распределять модули вдоль заданной траектории. На базе данного представления строится физическое форма растительности.

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ

В данном разделе представлен анализ основных элементов, необходимых для реализации заданной трёхмерной модели распространения лесных пожаров.

1.1. Модели распространения лесных пожаров

Для того, чтобы получить основные представления о моделировании трехмерных лесных пожаров, а также подчеркнуть наиболее удачные решения для отдельных составляющих будущей модели, необходимо проанализировать ряд существующих решений.

1.1.1 Модель распространения пожара на основе сетчатого представления деревьев

Авторы работы [1] задались целью создать биологически правдоподобную, но в то же время относительно эффективную с точки зрения вычислений модель горения деревьев.

На рисунке 1 представлена схема работы их системы. Модель дерева преобразуется в набор связанных частиц (a). На поверхности полигональной сетки моделируется возгорание (b), которое соединяется с правдоподобной моделью горения для ботанических деревьев (цвет указывает температуру) (c). В процессе пожара происходят сложные геометрические деформации (d).

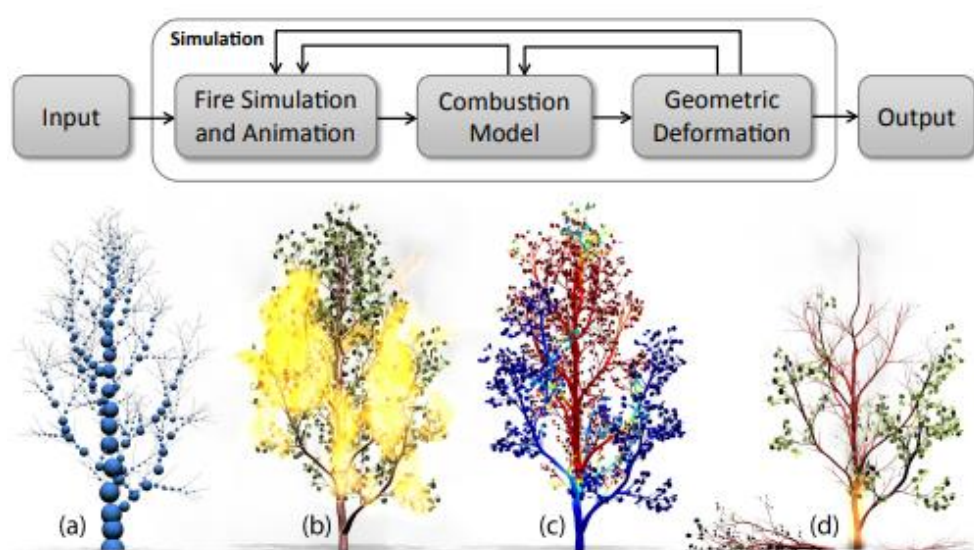


Рисунок 1 – Обзор модели горения на основе физики частиц и полигональной сетки [1]

Отличительной чертой данной работы является модель сжигания древесины, которая способна описывать такие явления, как испарение влаги, образование слоя обугливания и восстановление первичного сырья.

Важно отметить, что модель горения основана на дискретном представлении геометрии ответвления. Используется многоугольная сетка поверхности, где каждый элемент поверхности (треугольник) представляет объемную часть ответвления, которая может быть определена как набор точек, прослеженных непрерывной проекцией каждой точки поверхности на ближайшую точку на оси ответвления (рисунок 2).

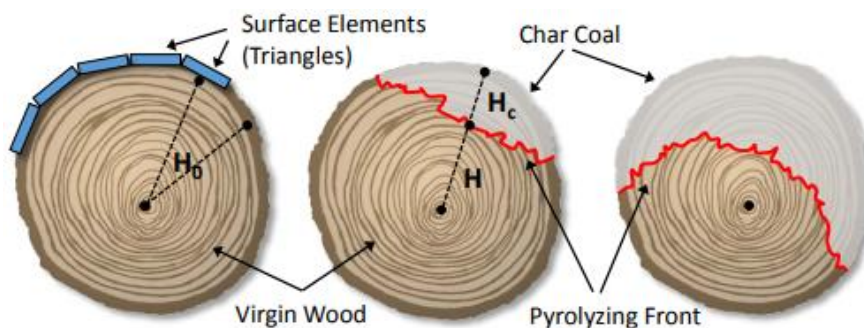


Рисунок 2 - Поперечное сечение ветви [1]

Каждый элемент поверхности связан с информацией об общей массе нижележащего объема ветки, температуре поверхности в этом месте, содержании воды, толщине возможного слоя обугливания H_c , толщине первичного дерева H и площади движущегося внутрь фронта пиролиза. Пространственный перенос информации между элементами происходит только в терминах теплопередачи по дереву или в окружающем воздухе.

Главным преимуществом данного подхода является его сравнимая реалистичность, которая была подтверждена экспериментально. Дерево моделируется как чувствительные к окружающей среде частицы, которые допускают правдоподобные движения ветвей в поле ветра из-за использования модели стержней Коссера. Более того, каждая частица связана с физическими и биологическими характеристиками, определяющими реакцию на имитацию пожара. В свою очередь, полигональная сетка ответвлений динамически

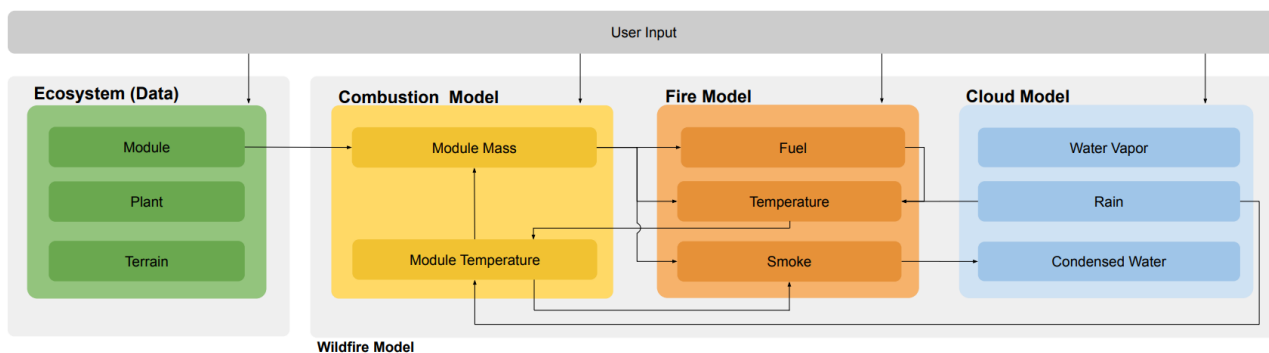
обновляется в соответствии с изменениями атрибутов частиц, распространяя тепло по поверхности дерева и постепенно деформируя его геометрию. Это заставляет ветви сгибаться, ломаться и в конечном итоге падать на землю.

Поскольку данный подход является по сути первой попыткой совместного моделирования корректного поведения ботанических деревьев и сжигания древесины биологически правдоподобным способом, он не лишён недостатков. Возможно, сгорание одиночного дерева можно назвать воспроизводимым в режиме реально времени, но симуляция распространения пожара для небольшой группы деревьев запускается только в интерактивном режиме.

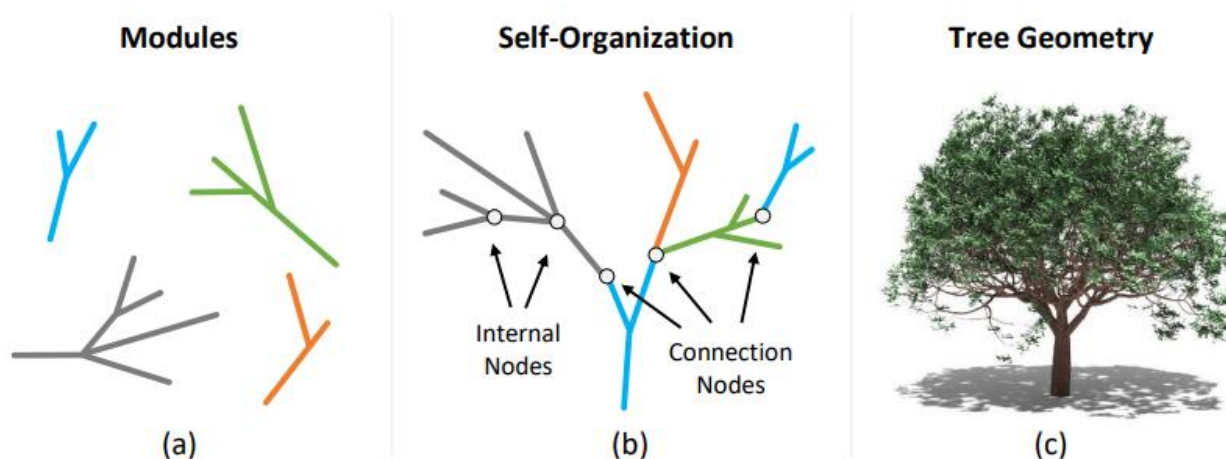
1.1.2 Модель распространения пожара на основе многомодульного представления деревьев

В статье [2] авторы представили модель распространения лесного пожара с упором на подробную модульную геометрию растительности наряду с физически правдоподобной гидродинамикой.

На рисунке 3 представлена схема работы их системы. Модель лесного пожара выражает форму растения с помощью модулей ветвей дерева. Рельеф поверхности представлен сеткой поверхности. Вместе это составляет входных данные для процесса пиролиза в ветвях деревьев. Этот процесс освобождает топливо, температуру и дым, которые описываются уравнениями переноса в модели пожара. Кроме того, моделируется круговорот жидкости в атмосфере, которая связана с моделью горения, что позволяет фиксировать обратную связь между сгоранием древесины, распространением огня и образованием облаков.



Отличительной чертой данного подхода является использование мезомасштабного представления растительности, которое использует модули ветвей для представления деревьев (рисунок 4). Каждое растение есть комбинация модулей (а). Модули способны адаптироваться посредством самоорганизации во время развития экосистемы и повторно используются на одном и том же растении и во всей экосистеме (б). После определения графа ветвей создается окончательная геометрия дерева (с).



Каждое дерево представлено в виде единого ствола цилиндрической формы, масса которого соответствует массе всего дерева в мезомасштабном представлении. В частности, высота ствола соответствует высоте дерева в

мезомасштабном представлении, а диаметр ствола регулируется таким образом, чтобы масса ствола равнялась сумме масс модулей дерева.

Важным преимуществом данной модели, которое выделяет её на фоне остальных подходов, является определение процесса горения древесины для отдельных модулей ветвей. Данное упрощение позволяет задать уровень детализации деревьев, что, в свою очередь, позволяет выбрать подходящую степень достоверности моделирования лесного пожара. Более того, вычисление процесса горения на уровне модулей и свойство самоподобия ветвей позволяют одновременно эффективно обрабатывать большие коллекции растений.

Также данная модель позволяет моделировать возгорание большой группы деревьев с хорошей степенью детализации в режиме реального времени с возможностью влиять на процесс распространения огня.

Важным недостатком данной модели является способ представления моделей деревьев. Деревья собираются на базе заранее предустановленного набора модулей, что затрудняет возможность корректировки полученной геометрии деревьев. Эффективное отображение моделей деревьев так же жестко привязано к данному набору, что приводит к зависимости между используемым набором модулей и производительностью.

Стоит отметить, что полученные модели деревьев являются неподвижными объектами, которые никак не реагируют на окружающие физические воздействия.

1.1.3 Модель распространения пожара на основе ограниченного представления деревьев

Абсолютно иной подход к трехмерному распространению пожара представили авторы работы [3]. В своем подходе они сделали ставку на упрощенное представление дерева, свойства конечного автомата и эффективное пространственное распределение деревьев.

На рисунке 5 представлена структура их работы, которая состоит из трех основных частей: взаимодействие деревьев, моделирование распространения лесных пожаров и факторы окружающей среды.

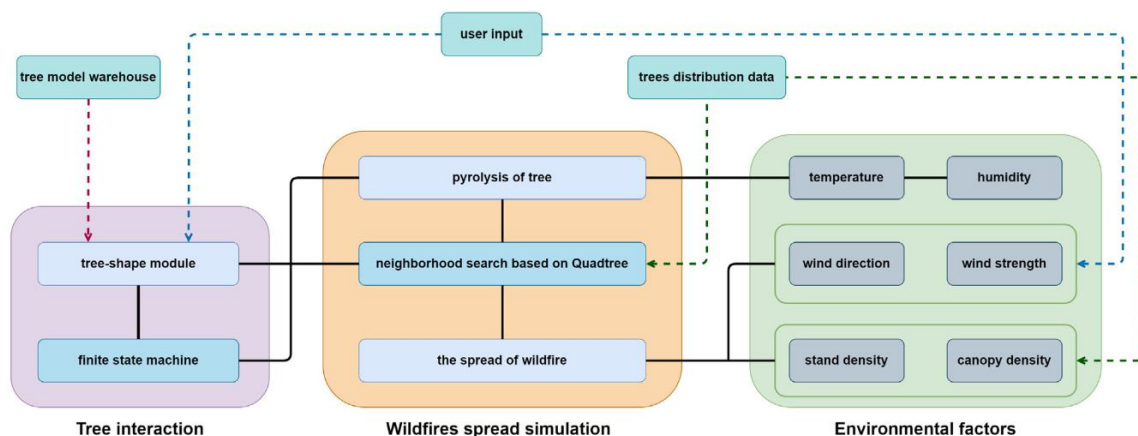


Рисунок 5 – Обзор модели на основе свободного дерева квадрантов и свойств конечного автомата [3]

У данного подхода можно выделить несколько отличительных черт, выделяющих его на фоне остальных трехмерных симуляций распространения пожара.

Во-первых, модуль в форме дерева вводится как средство взаимодействия между деревьями. Опираясь на свойства конечного автомата (Finite State Machine), жизненный цикл модуля от генерации до разрушения определяется такими состояниями как: равновесие, нагрев, пиролиз, охлаждение и разрушение. Повышение температуры окружающей среды заставляет модуль в форме дерева непрерывно менять своё состояние, тем самым провоцируя близлежащие модули на распространение лесного пожара.

Во-вторых, для хранения данных о распределении деревьев на местности предлагается использовать свободное дерево квадрантов (Loose Quadtree), которое позволяет динамически извлекать из хранилища модули в форме дерева в реальном времени для симуляции распространения огня по экосистеме. Это сделано во избежание потери производительности симуляции, если бы эти деревья были сгенерированы и расположены на местности заранее.

Главным достоинством данного подхода является его производительность. Помимо упрощений, описанных выше, существенный вклад в рост производительности вносит альтернативный подход к построению модулей в

форме дерева со сферическими или столбчатыми ограничивающими рамками (рисунок 6).

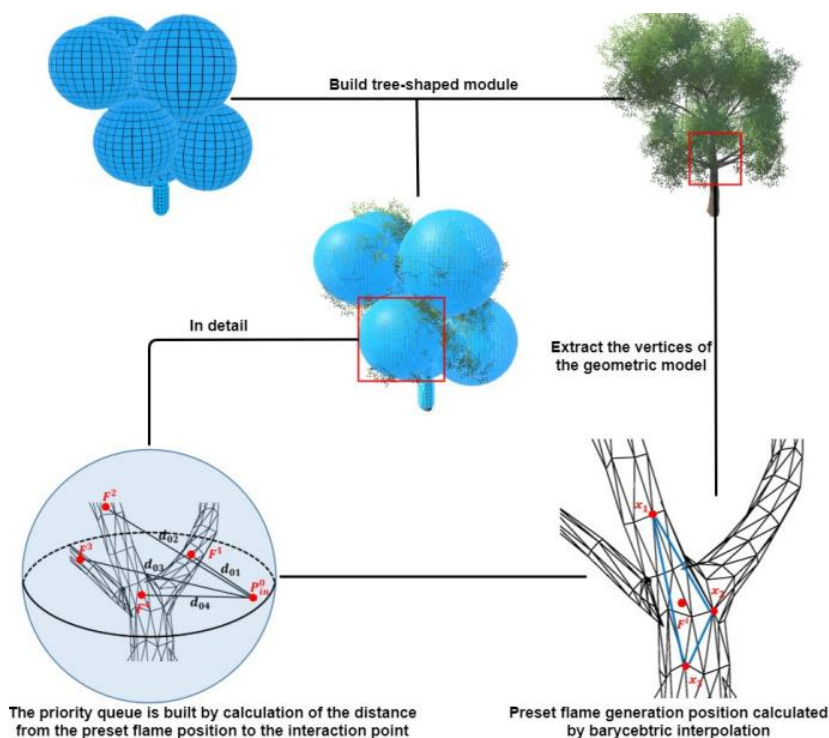


Рисунок 6 – Представление растительности через сферические или столбчатые ограничивающие рамки [3]

Из альтернативного подхода к представлению дерева исходит и главный недостаток данной модели распространения лесного пожара. Исходная модель дерева используется только для визуализации дерева до и после пожара. Все основные действия происходят через ограничивающие модули, которые грубо упрощают заданную геометрию, представляя её частями как некоторый объём от исходного дерева. Более того, общий процесс теплообмена с воздухом не моделируется. Теплообмен между деревьями осуществляется только при непосредственном контакте модулей. Также, каждый отдельный модуль располагает ограниченным числом заранее предустановленных точек генерации пламени, которые лишь имитируют процесс распространения пламени для отдельного дерева.

1.2 Модели динамического поведения ветвей дерева

Важной составляющей трехмерных моделей распространения лесных пожаров является моделирование правдоподобной динамики ветвей дерева [4]. Реализация данного механизма позволит деревьям проявлять физически корректное поведение. Рассмотренные модели распространения лесных пожаров не предоставляют эффективного способа моделирования динамики ветвей дерева, поэтому необходимо разобрать сторонние решения.

1.2.1 Динамика ветвей на основе гибких стержней

Одним из вариантов может быть использование концепции стержней Коссера, которая уже применялась для моделирования динамики дерева на уровне ветвей в работе [1].

Модель Коссера описывает упругие стержни, способные подвергаться различным формам деформации, таким как растяжение, сдвиг, изгиб и кручение [5]. Стержень моделируется как плавная кривая $r(s): [s_0, s_1] \rightarrow R^3$, называемая осевой линией. Для описания степеней свободы изгиба и кручения к каждой точке центральной линии прикрепляется ортонормированная структура с базисом $\{d_1(s), d_2(s), d_3(s)\}$. В дальнейшем векторы d_i обозначаются как директора. Первый и второй директора охватывают поперечное сечение стержня, а третий директор является нормальным поперечным сечением (рисунок 7).

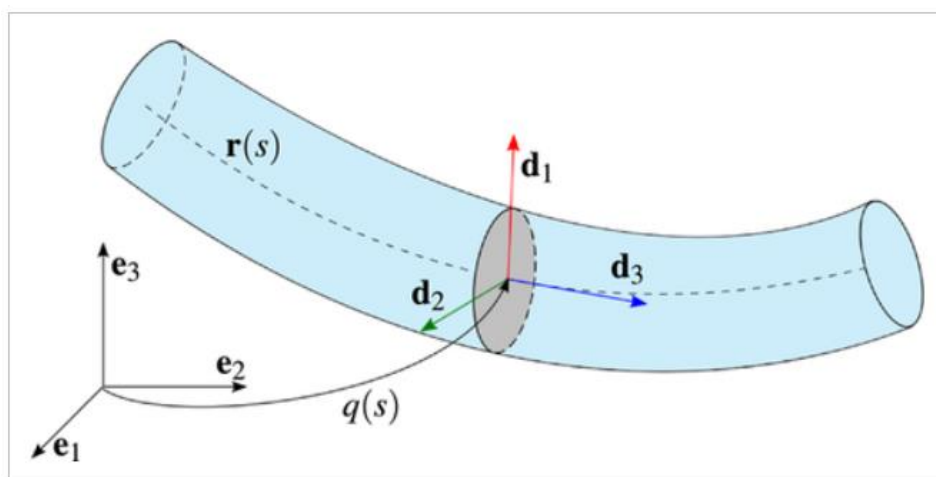


Рисунок 7 – Геометрия непрерывного стержня Коссера [6]

Директора могут быть параметризованы с помощью кватерниона вращения $q(s)$, который вычисляет директора путем вращения системы отсчета, которая изначально параллельна базису мировых координат $\{e_1, e_2, e_3\}$. Каркас, натянутый директорами исходной стержневой конфигурации, называется материальным каркасом.

Авторы работы [6] адаптировали данную концепцию в рамках позиционно-ориентированной динамики (Position Based Dynamics), предоставляющая надежный и эффективный подход к моделированию изменения положения связанных наборов вершин [8]. Взяв за основу расширение позиционно-ориентированной динамики (Extended Position Based Dynamics), они устранили нефизическое влияние количества итераций и размера временного шага, что позволило корректно моделировать поведение деревьев.

Немного другим путем пошли авторы статьи [8]. Взяв за основу классический итерационный решатель позиционной динамики, они улучшили вычисление начальных предположений, которые необходимы для симуляции поведения стержня. За место прямых вычислений, использующих в качестве входных данных результаты предыдущих итераций, ими было предложено использовать предсказания графовой сети (Graph Learning).

Преимуществом использования концепции стержней Коссера в комбинации с позиционно-ориентированной динамикой является численная стабильность и производительность методов, а также правдоподобность получаемых результатов. Более того, такие методы позволяют избежать многих сложных понятий теории упругости, что делает их особенно подходящими для компьютерных игр [9].

1.2.2 Динамика ветвей на основе сочленений

Перспективной представляется работа авторов [10], которые исключили из расчетов возможность точного моделирования очень гибких соединений. Данная условность не препятствует моделированию динамики древовидных модулей, поскольку их угловые смещения относительно малы для каждого сустава, а

крупномасштабный изгиб достигается за счет накопительного эффекта многих суставов.

Отличительной чертой данного подхода можно назвать использование модели сочлененного твердого тела с поворотными пружинами настолько жесткими, насколько необходимо для динамики деревьев (рисунок 8). Дерево моделируется как совокупность сочлененных твердых тел. Зеленые кружки обозначают точечные соединения между телами, а красная стрелка указывает силу, приложенную к крайне правому твердому телу из-за веса маленького существа [10].

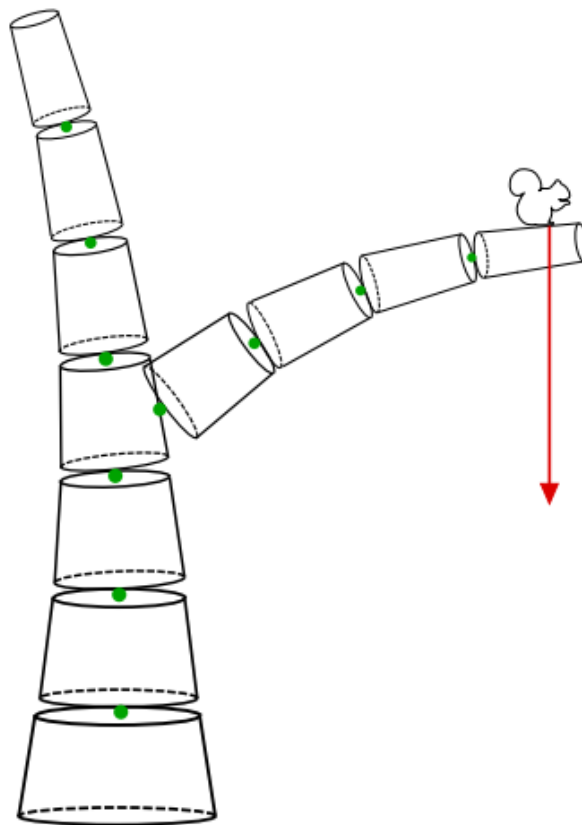


Рисунок 8 – Дерево как совокупность сочлененных твёрдых тел [10]

Также важно отметить, что листья здесь представлены тонкой треугольной призмой, что позволяет аппроксимировать их как треугольники для взаимодействия с ветром. Они включены в состав сочлененных твердых тел дерева и накопленная сила и крутящий момент (из-за силы тяжести, ветра или возможных столкновений) могут иметь значительное влияние на движение

ветви. Более того, листья способны отделяться от родительских ветвей при превышении порогового значения крутящего момента. В этом случае, для них моделируется особое поведение в соответствии с полем ветра.

Преимуществом данного подхода является прежде всего его производительность. Метод надежно и эффективно использует только один временной шаг для визуализации кадра, что позволяет выполнять моделирование высоко детализированных деревьев в режиме реального времени при частоте в 30 Гц.

Недостатком данного подхода является то, что между деревьями и ветром отсутствует двусторонняя связь, а любое из представленных деревьев выглядит визуально очень бедно по сравнению с современными моделями, сделанными при помощи сбора данных или с использованием компьютерного зрения.

1.3 Модели теплопередачи для распространения лесных пожаров

Для полноценного распространения лесного пожара необходим алгоритм теплопередачи, который бы обеспечивал физически корректное и эффективное с точки зрения производительности распределение тепла в заданном объеме воздуха. Рассмотренные ранее модели распространения лесных пожаров располагают либо не подходящим решением [1], либо очень сложными решением [2], либо данное решение отсутствует вовсе [3].

Из ряда сторонних существующих решений можно выделить одно наиболее численно стабильное и относительно эффективное с точки зрения производительности [11].

1.3.1 Модель теплопередачи на основе жидкостного решателя Эйлера-Лагранжа

Данный решатель был впервые представлен автором статьи [12], в которой он описал стабильные подходы к разрешению таких этапов симуляции жидкости как диффузия и адвекция, используя гибридный подход на основе сетки Эйлера и методы решения Лагранжа для частиц. Основой решателя является моделирование поля плотности жидкости, которое движется с заданной

скоростью по пространству сетки. С помощью поля плотности возможно представлять и другие атрибуты жидкости, например как температура [13].

Задача заложенного внутри решателя алгоритма дать пользователю возможность добавлять атрибуты жидкости в сетку, обеспечить равномерное распределение атрибутов жидкости в пространстве, упростить перемещение атрибутов жидкости в пространстве под действием поля скорости, а также гарантировать несжимаемость жидкости для каждой ячейке сетки.

На первом шаге алгоритма пользователь задает исходное состояние сетки, то есть назначает значения избранных атрибутов каждой ячейке сетки. Так, в рамках теплопередачи можно задать начальную температуру окружения и начальную скорость ветра.

На втором шаге алгоритма выполняется термин источник, а именно добавление определяемого пользователем количества атрибута жидкости в ячейку сетки. Данный источник может работать самостоятельно или находится под управлением пользователя.

На третьем шаге выполняется термин диффузия, а именно постепенное превращение значений атрибутов ячеек в среднее значение атрибутов окружающих ячеек (рисунок 9). Прямое решение предполагает интерполяцию между текущим значением атрибута в ячейке и средним значением атрибутов окружающих ячеек, но данный подход дает нестабильный результат из-за неконтролируемости величины распределяемого атрибута. Решение данной проблемы было найдено в итерационном приближении такого будущего значения атрибута ячейки, которое при перематке назад во времени приводило бы к текущему значению атрибута. Таким образом, полученное будущее значение атрибута никогда не превысит среднее значение атрибутов окружающих ячеек.

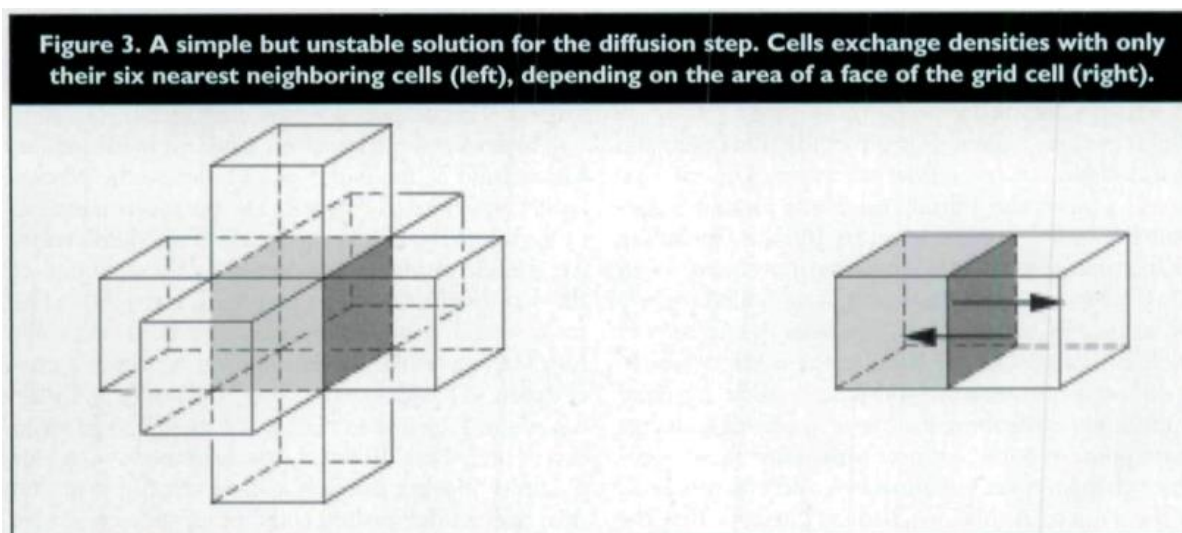


Рисунок 9 – В процессе диффузии ячейка жидкости обменивается атрибутами с соседними ячейками [13]

На четвертом шаге выполняется термин адвекция, а именно перемещение атрибутов через жидкость в соответствии с её скоростью (рисунок 10). Прямое решение предполагает перемещение текущего значения атрибута ячейки вдоль вектора скорости ячейки и распределение значения данного атрибута между ячейками в точке попадания. Данное решение является не совсем удобным, поскольку в одну и ту же точку могут попасть несколько атрибутов для распределения. Более эффективный подход предлагает проследовать по вектору скорости в обратном направлении, чтобы выяснить откуда будет взят будущий атрибут ячейки. Значение такого атрибута вычисляется через интерполяцию между окружающими ячейками в точке попадания. Таким образом для каждой ячейки требуется всего одного вычисление.

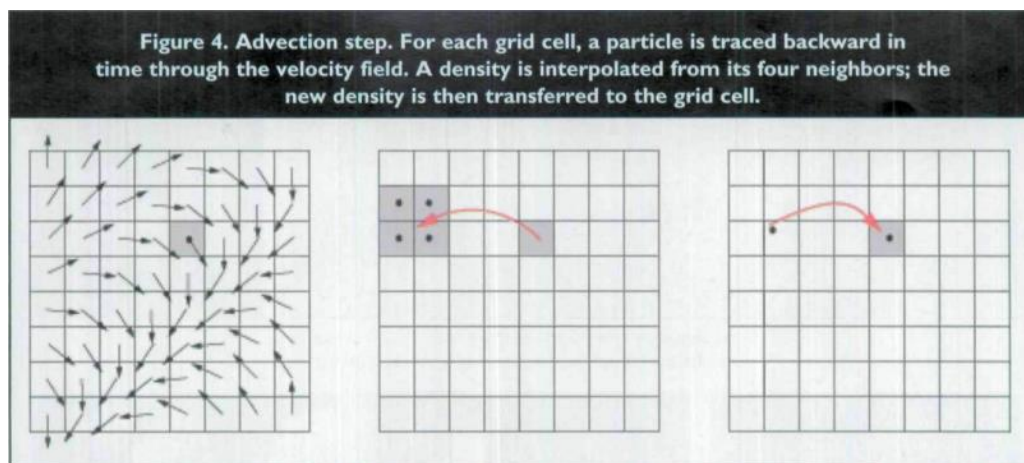


Рисунок 10 – В процессе адвекции для каждой ячейки вычисляется новое значение атрибутов путём интерполяции между ячейками, полученным при движении в обратном направлении [13]

Прежде чем перейти к пятому шагу стоит отметить следующее. Для любого векторного поля характерны завихрения и расхождения. Завихрения характерны для жидкости из-за турбулентности, а вот расхождения порождают ситуацию, при которой атрибуты жидкости появляются из ниоткуда или исчезают в никуда. Поскольку воздух в большинстве случаев является несжимаемой жидкостью наличие расхождений невозможно и должно быть разрешено. Для этого и существует последний шаг алгоритма.

На пятом шаге алгоритма выполняется очистка поля скоростей от расхождений. Выполняется это с опорой на теорему разложений Гельмгольца, которая гласит что всякое векторное поле есть сумма двух векторных полей (рисунок 11). Одно из полей свободно от расхождений, а второй поле свободно от завихрений. Соответственно, для решения проблемы нужно вычесть из исходного поля скоростей свободное от завихрений поле. Для этого сначала вычисляется величина расхождений в ячейках путём вычитаний соответствующих скоростей соседних ячеек. Это позволяет узнать разницу между тем количеством жидкости, которое поступает в ячейку, и тем количеством жидкости, которые выходит из ячейки. Данное значение всегда должно быть равно нулю, в противном случае наблюдается расхождение. Затем на базе полученных значений расхождений итерационно приближается давление в

каждой ячейки как сумма давлений окружающих ячеек за вычетом значения расхождения в данной точке. Это позволяет получить свободное от завихрения поле скорости, которое затем вычитается из текущего поля скорости, тем самым текущее поле скорости преобразуется к свободному от расхождений.

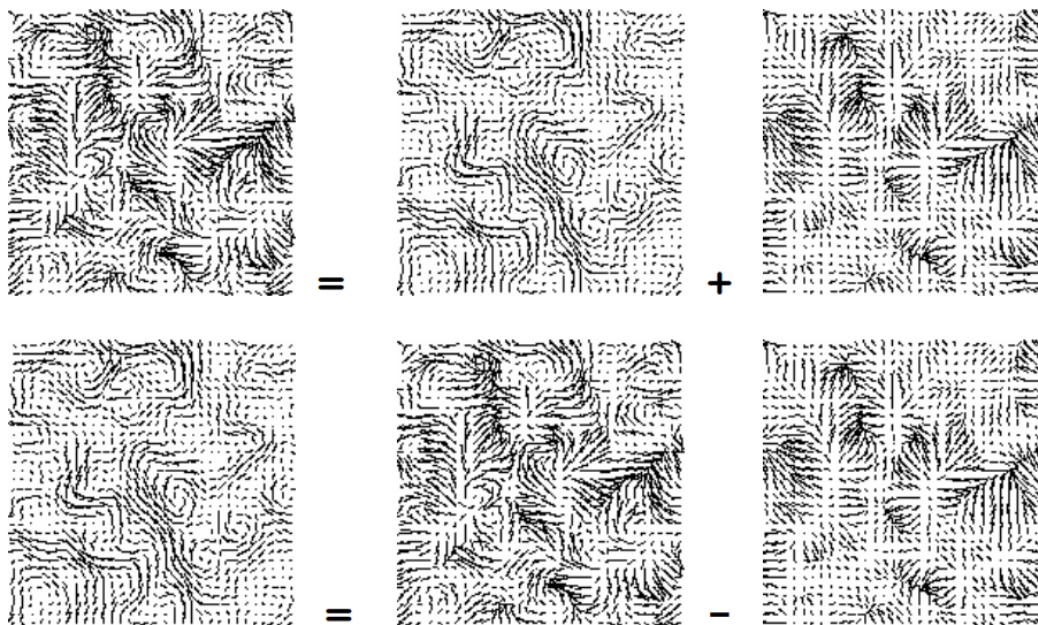


Рисунок 11 – Каждое векторное поле есть сумма свободного от завихрений и свободного от расхождений векторных полей [11]

2. РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

Для реализации трехмерной модели распространения лесных пожаров необходимо разработать модель растительности и модель теплопередачи.

Первая модель предполагает разработку особого представления растительности на основе мезомасштабного (многомодульного) подхода [2] и кривых Безье. Это позволяет создавать экземпляры моделей растительности с заданной степенью точности и детализации. Для возможности создания данных экземпляров был разработан алгоритм генерации растительности.

Вторая модель предполагает реализацию алгоритма решателя жидкости Эйлера-Лагранжа и разработку алгоритма, задающего основную логику теплопередачи между модулями дерева и окружением, а именно чтений данных из решателя жидкости, выполнение операций по генерации тепла горящими модулями деревьев, отправка данных в решатель жидкости.

2.1. Разработка модели растительности

При разработке модели растительности наибольшее внимание уделялось двум основным факторам, напрямую влияющих на качество моделирование лесного пожара, а именно:

- качество представления геометрии растительности;
- качество представления динамики растительности.

Далее идёт непосредственное рассмотрение алгоритма генерации моделей растительности.

2.1.1. Разработка алгоритма генерации моделей растительности

Разработанный алгоритм является интерактивным конструктором, находящимся под частичным управлением пользователя. Ручное управление предполагает регулировку степени детализации дерева, а также внесение изменений в характеристики его составных частей. Под управлением алгоритма находится непосредственно сам процесс генерации внешнего вида дерева, а также его функционального представления.

Схема алгоритма представлена на рисунке 12.

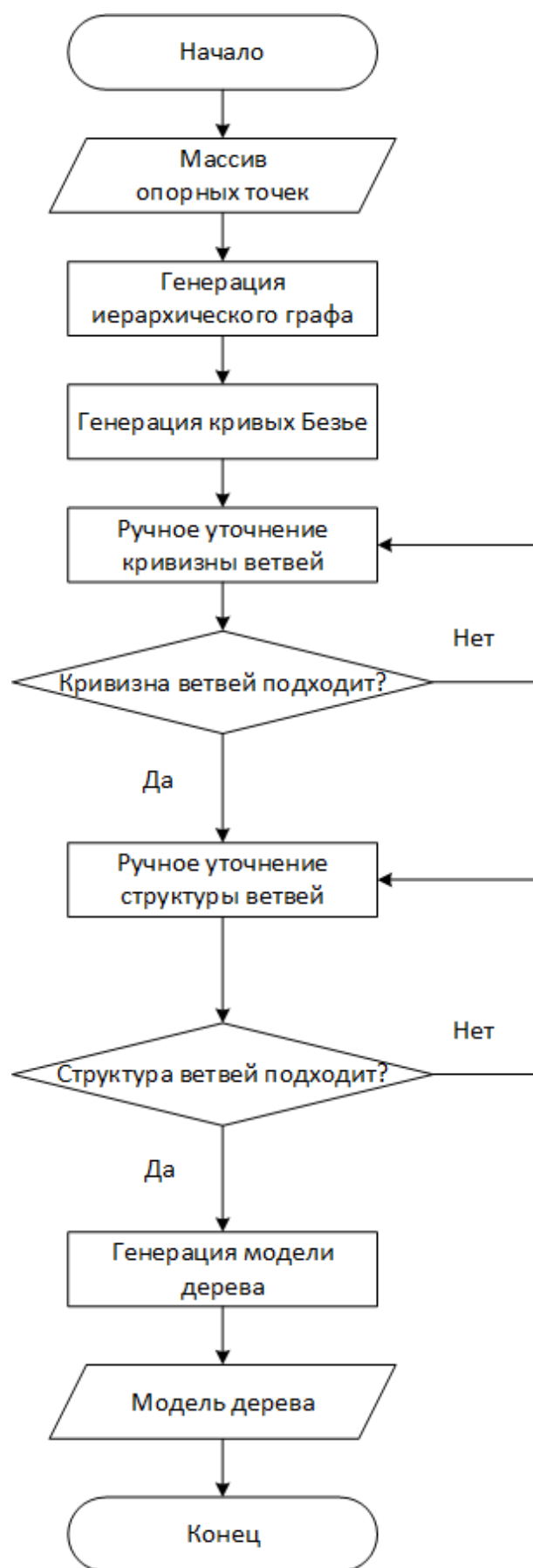


Рисунок 12 – Схема алгоритма генерации функционального многомодульного представления растительности

Необходимо разобрать каждый шаг алгоритма по отдельности.

На первом шаге алгоритма пользователь подает на вход иерархию точек, связанных между собой по принципу родитель-потомок. Данные точки должны представлять из себя начало и конец каждой ветви интересующего дерева, в том числе за ветвь дерева считается и его ствол. Данные точки будем называть опорными. Алгоритм обрабатывает данный массив точек и генерирует промежуточное представление дерева в виде древовидного графа.

Схема с пояснениями представлена на рисунке 13.

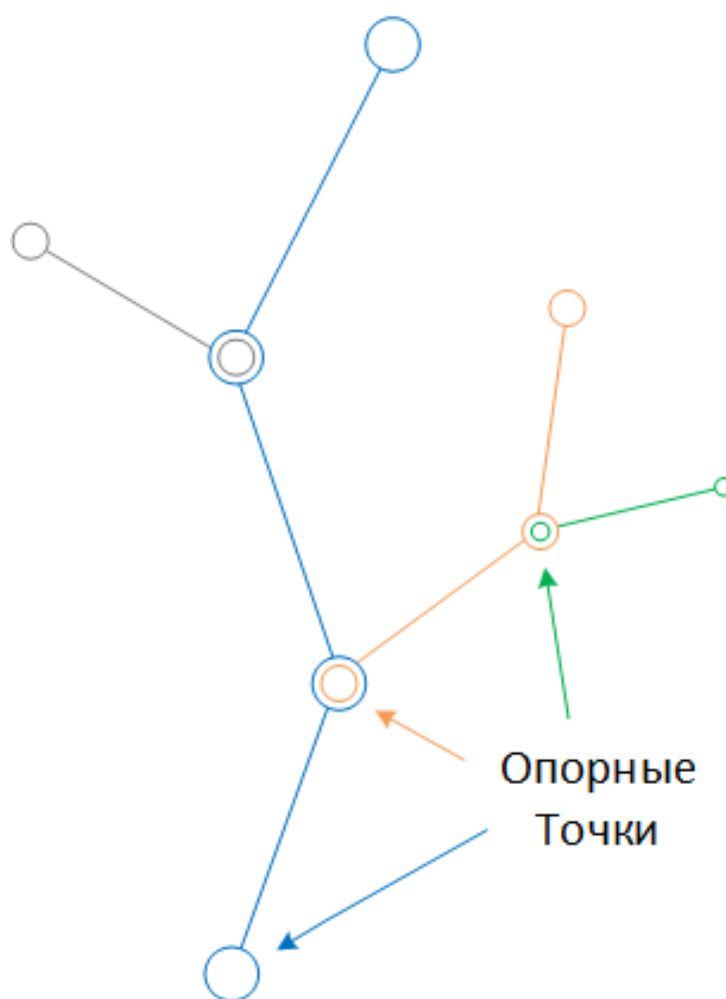


Рисунок 13 – Промежуточное представление дерева в виде графа с опорными точками, обозначающими начало и конец каждой ветви дерева

На втором шаге алгоритм преобразует данное представление дерева в более гибкое в плане настройки его составных частей. Осуществляется это с помощью генерации кривых Безье между связанными опорными точками.

Отныне каждая опорная точка хранит в себе информацию о своём расположении на данной кривой, а также о радиусе ветви в данной точки кривой. Предполагается, что на данном этапе пользователь в ручном режиме задаст наклоны кривых Безье таким образом, чтобы они наиболее точно описывали кривизну интересующего дерева.

Схема с пояснениями представлена на рисунке 14.

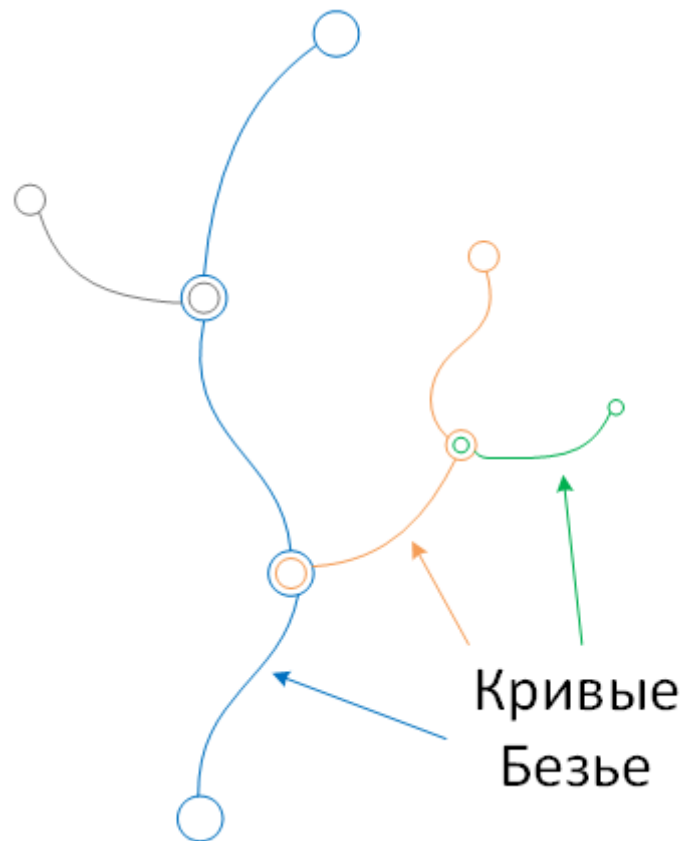


Рисунок 14 – Ручное уточнение геометрии интересующего дерева на основе кривых Безье

На третьем шаге алгоритма пользователю предлагается выбрать степень детализации дерева через добавление дополнительных точек на кривые Безье. Будем называть их точками приближения. Так же как и опорные точки они будут хранить в себе информацию о своей позиции на конкретной кривой Безье, а также радиус ветви, которую они уточняют. Добавляя все большее количество точек, пользователь все ближе приближает будущее многомодульное представление к геометрии интересующего дерева.

Схема с пояснениями представлена на рисунке 15.

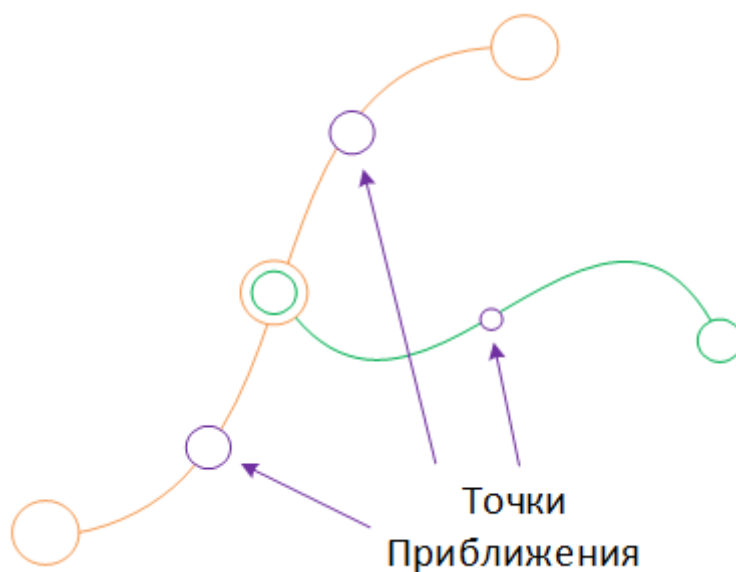


Рисунок 15 – Точки приближения на кривой Безье приближают многомодульное представление к интересующей геометрии дерева

На четвертом шаге осуществляется непосредственно сама генерация многомодульного представления дерева на основе ранее собранного графа. Данная процедура состоит из двух этапов, алгоритм действий который рассмотрим ниже.

Схема с пояснениями представлена на рисунке 16.

Последовательно опишем действия алгоритма генерации на каждом из этапов.

На первом этапе генерации осуществляется заполнение основной информации, необходимой для корректного графического отображения собранной модели дерева. Все кривые Безье удаляются. Если опорная точка потомка пересекается с точкой приближения родителя, то она удаляется. Также если опорная точка не имеет родителя, то она так же удаляется. В каждую точку заносится информация о позиции и повороте модуля на основании средней дистанции и направления между соседними точками. Также заносится информация о высоте модуля равная половине расстоянию между соседними точками. Толщина модуля ставится равной радиусу соответствующей ветви.

На втором этапе генерации осуществляется построение функциональной модели дерева, необходимого для корректного моделирования динамики деревьев. Важность последнего отмечается авторами статей [14] и [10]. Осуществляется генерация физических оболочек для каждого модуля. На основании данных о высоте и ширине модуля рассчитывается их физические параметры. Все точки на графе становятся некоторыми объектами, каждый из которых имеет физическую оболочку, смещенную вниз по данным о положении и повороте модуля. С опорой на иерархическую структуру данные объекты последовательно связываются друг с другом с помощью физических соединений. Иерархическая структура графа потомок-родителя удаляется.

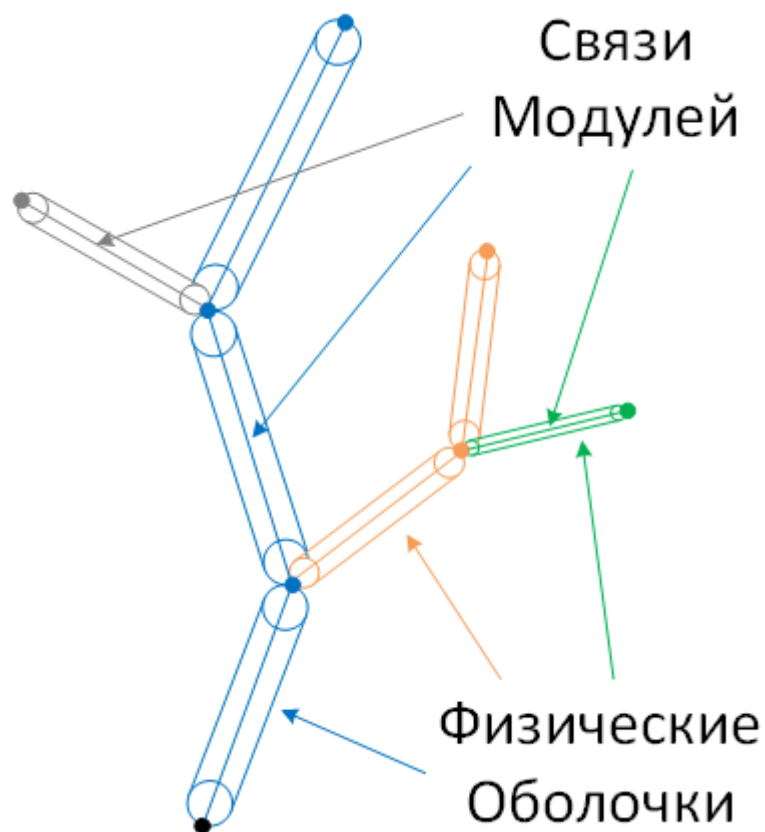


Рисунок 16 – Функциональное многомодульное представление дерева для реализации правдоподобного физического поведения

На пятом шаге алгоритма пользователь получаем модель дерева нужной степени визуальной достоверности с правдоподобной структурой физического поведения.

2.1.2. Разработка методологии для модели растительности

Раскроем основную методологию, связанную с предложенной моделью генерации растительности.

2.1.2.1. Расчёт основных характеристик модулей

Каждая составляющая ветки и ствола дерева являются модулями, которые эффективней всего представлять в виде цилиндров [2] длины l и радиуса r . Площадь боковой поверхности модуля можно вычислить как

$$A_{module} = 2\pi rl, \quad (1)$$

объём модуля можно вычислить как

$$V_{module} = \pi r^2 h, \quad (2)$$

массу модуля можно вычислить как

$$M_{module} = \rho_{wood} V_{module}, \quad (3)$$

где ρ_{wood} – плотность древесины.

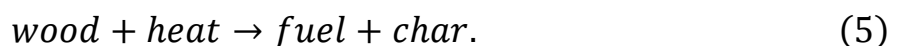
Поскольку характеристики модуля активно изменяются в процессе горения, следует уточнить, что его длина остается постоянной, а вот радиус необходимо обновлять в соответствии с текущей массой

$$r_{mod} = \sqrt{\frac{M_{module}}{\pi l \rho_{wood}}}. \quad (4)$$

Из приведенных формул следует необходимость описать изменения характеристик модулей, происходящие во время горения.

2.1.2.2. Расчёт характеристик модулей во время горения

Опираясь на материалы статьи [16], можно сказать, что во время горения древесина разменивает собственную массу на топливо для поддержания процесса горения с образованием слоя обугливания. Для удобства восприятия запишем это процесс в следующем виде:



Опираясь на материалы статьи [1], скорости изменения массы модуля в процессе горения можно описать уравнением, которое имеет следующий вид

$$\frac{dM}{dt} + k(T_M)cA = 0, \quad (6)$$

где k – скорость реакции, зависящая от температуры модуля T_M ; c – толщина слоя обугливания ветви; A – площадь пиролизного фронта.

Опираясь на материалы статьи [1], скорость реакции горения модуля можно так же описать уравнением, которое имеет следующий вид

$$k(T) = \eta \cdot \begin{cases} 0 & T_M < T_0, \\ S\left(\frac{T_M - T_0}{T_1 - T_0}\right) & T_0 \leq T \leq T_1, \\ 1 & T_M > T_1 \end{cases} \quad (7)$$

где η – коэффициент скорости реакции; $S(x) = 3x^2 - 2x^3$ – сигмовидная функция, гладко интерполирующее текущее значение температуры от 0 до 1 между значениями $T_0 = 150$ °C и $T_1 = 450$ °C.

Коэффициент скорости реакции η в данном случае существует для того, чтобы учесть влияние ветра на скорость реакции. Опираясь на материалы статьи [2], вклад данного коэффициента можно описать уравнением, которое имеет следующий вид

$$\eta(u) = (\eta_{max} - 1)S\left(\frac{u}{u_{ref}}\right) + 1, \quad (8)$$

где u – скорость ветра, при нулевом значении которого выход функции составит $\eta = 1$, а для предельной скорости ветра $u_{ref} = 15$ м/с выход функции составит $\eta = \eta_{max} = 2$ кг / (с м²), когда достигается максимальное ускорение скорости реакции.

2.2. Разработка модели распространения лесных пожаров

В данном пойдет речь о разработке алгоритма, который в комбинации с жидкостным решателем Эйлера-Лагранжа будет реализовывать модель распространения лесных пожаров, а именно моделировать теплопередачу.

2.2.1. Разработка алгоритма теплопередачи для модулей деревьев

Основная задача данного алгоритма разрешить теплопередачу между модулем дерева и окружающей средой, а также между самими модулями.

На первом этапе разрешается внутренний теплообмен, то есть теплопередача от модуля к модулю. Осуществляется это путем прохода по иерархии модулей в рамках дерева сверху-вниз. Тем самым достигается накопительный эффект теплопередачи и тепло распределяется между модулями равномерно.

На втором этапе рассчитывается насколько много модуль потеряет массы в зависимости от окружающей температуры. Если температура окружения достаточно высока, то модуль начнет терять массу и генерировать тепло. При достижении модулем температуры воспламенения (около 250 градусов Цельсия) температура окружающего воздуха больше не оказывает влияния и модуль продолжает гореть самостоятельно пока не достигнет критической массы (примерно 20 процентов от исходной массы), при которой процесс горения завершается.

На третьем этапе предполагается решение внешнего теплообмена, то есть между модулем и окружающей средой. Делается это из соображения о том, что всякая система стремится к тепловому балансу. Поэтому если модуль нагрет сильнее окружающей среды, то он отдает часть своего тепла окружающей среде. Этот же механизм работает и в обратную сторону.

Схема алгоритма представлена на рисунке 17.

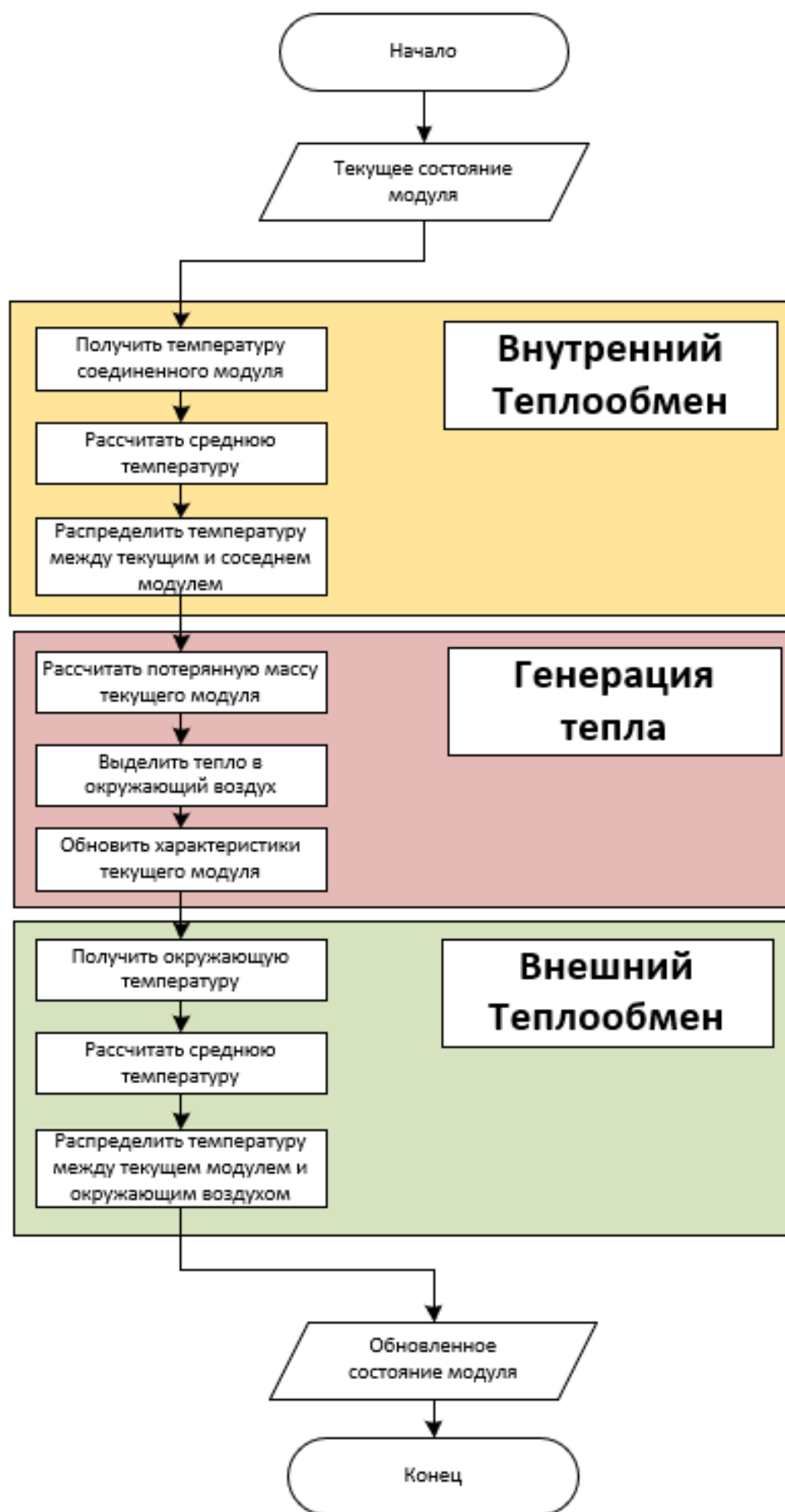


Рисунок 17 – Схема алгоритма моделирования теплопередачи между модулями и решателем

2.2.2. Разработка методологии для модели распространения лесных пожаров

Раскроем основную методологию, связанную с предложенной моделью распространения лесного пожара.

Ветер описывается как зависящее от времени векторное поле скорости

$$u: (x, t) \rightarrow u(x, t), \quad (9)$$

которое для заданного положения $x \in R^3$ и времени $t \in R^{\geq 0}$ возвращает соответствующую локальный поток, описывающий скорость ветра.

Температура окружающей среды описывается как зависящее от времени скалярное поле

$$T: (x, t) \rightarrow T(x, t), \quad (10)$$

которое для заданного положения $x \in R^3$ и времени $t \in R^{\geq 0}$ возвращает соответствующую локальную температуру.

Поведение поля ветра во процессе моделирования теплопередачи описывается соответствующим уравнением Навье-Стокса, которое имеет следующий вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)u + \nu \nabla^2 u + f, \quad (11)$$

где ν – коэффициентом динамической вязкости воздуха; f – термин, описывающий влияние внешних сил на скорость ветра.

Для поля ветра также обязательно выполняется закон сохранения массы, который имеет следующий вид:

$$\nabla u = 0 \quad (12)$$

Поведение поля температуры во процессе моделирование теплопередачи также описывается соответствующим уравнением Навье-Стокса, которое имеет следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)T + \alpha \nabla^2 T + b_T(T_M - T) - \tau \frac{dM}{dt} + S, \quad (13)$$

где α – коэффициент диффузии поля температуры; b_T – коэффициент теплопередачи между полем температуры и модулем; τ – коэффициент

количества температуры, выделяемой в процессе горения дерева; S – термин, описывающий влияние некоторого источника тепла.

Изменение температуры модуля можно описать следующим образом:

$$\frac{\partial T_M}{\partial t} = \alpha_M \nabla^2 T_M + b_M (T - T_M), \quad (14)$$

где α_M – коэффициент диффузии между модулями; b_M – коэффициент теплопередачи между модулем и полем температуры.

Важно выделить основные параметры, используемые в текущей модели распространения лесных пожаров. Установленные параметры модели представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры модели распространения лесных пожаров

Параметр	Описание	Значение	Единица измерения
1	2	3	4
τ	Количество тепла, выделяемого в процесс горения	50000	$1 \text{ } ^\circ\text{C кг}^{-1}$
α_M	Коэффициент внутренней диффузии модулей	0.0001	$1 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$
b_M	Коэффициент теплопередачи между модулем и полем температуры	0.001	1 с^{-1}
b_T	Коэффициент теплопередачи между полем температуры и модулем	0.01	1 с^{-1}

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
α	Коэффициент диффузии поля температуры	0.001	$1 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$
ν	Коэффициент диффузии поля скорости	0.001	$1 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$
ρ	Плотность дерева	800	1 кг м^{-3}

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ

В данном разделе представлена практическая реализация решения проблемы.

3.1. Выбор инструментария

В качестве платформы для реализации модели распространения лесных пожаров было принято решение использовать возможности современных игровых движков:

- Unreal Engine 5 [16];
- Unity 5 [17].

Игровой движок Unreal Engine 5 является мощным инструментом для создания высокопроизводительных приложений реального времени. Он располагает чрезвычайно мощным и гибким функционалом почти под любые задачи, но из-за этого существует достаточно высокий порог входа на использование основных инструментов для построения пространства для моделирования. На фоне этого игровой движок Unity 5 кажется более ограниченным, но на деле предоставляет достаточно удобный инструментарий для быстрого прототипирования и отладки. Также как и Unreal Engine 5 движок Unity 5 обладает всем базовыми инструментами для реализации высокопроизводительных приложений реального времени хоть и с некоторыми ограничениями.

В связи с этим окончательный выбор был сделан в пользу игрового движка Unity 5 для реализации модели распространения лесных пожаров.

Также был важен вопрос выбора архитектуры для реализации модели, а именно выбор осуществлялся между объектно-ориентированным подходом и дата-ориентированным подходом. Оба предложенных подхода обладают своими достоинствами и недостатками. Объектно-ориентированный подход понятен большинству потенциальных пользователей, а значит и модифицировать приложение, написанное на базе данного подхода, намного удобнее и быстрее. Но оно существенно проигрывает конкуренту в производительности из-за особенностей реализации и абстракциях. Дата-ориентированный же подход

существенно выигрывает в производительности из-за особенностей работы с данными. Но это же и создает проблему. Писать специализированный код, например, для высокопроизводительного моделирования, для неподготовленного пользователя будет достаточно тяжело, поскольку необходимо учитывать особенности шаблона проектирования.

Без всяких сомнений оба подхода имеют право на жизнь, но выбор был сделан в пользу объектно-ориентированного подхода.

3.2. Реализация алгоритма генерации моделей растительности

Опираясь на алгоритм изложенный во второй главе с опорой на инструментальный игровой движок Unity 5 была разработана модель генерации растительности.

На первом шаге алгоритма входные данные лучше всего представлять иерархией игровых объектов (Game Object), каждый из которых обозначает опорную точку. Графом же в данном случае является сама иерархия игровых объектов (Hierarchy), которую возможно сортировать в нужном порядке, а также итерироваться в коде.

Вид иерархии представлен на рисунке 18.



Рисунок 18 – Иерархия отсортированных опорных точек

На втором шаге алгоритма необходимо между имеющимися игровыми объектами расположить представления кривых Безье. Для этого был написан соответствующий компонент (Component), который хранит сгенерированные точки кривой Безье в массиве. Реализованное представление кривых Безье лишено недостатков математической формулировки, а именно того, что модули на концах кривой при скручивании кривой уплотняются, оставаясь на одинаковом расстоянии друг от друга только ближе к центру кривой.

Вид редактора кривых Безье представлен на рисунке 19.

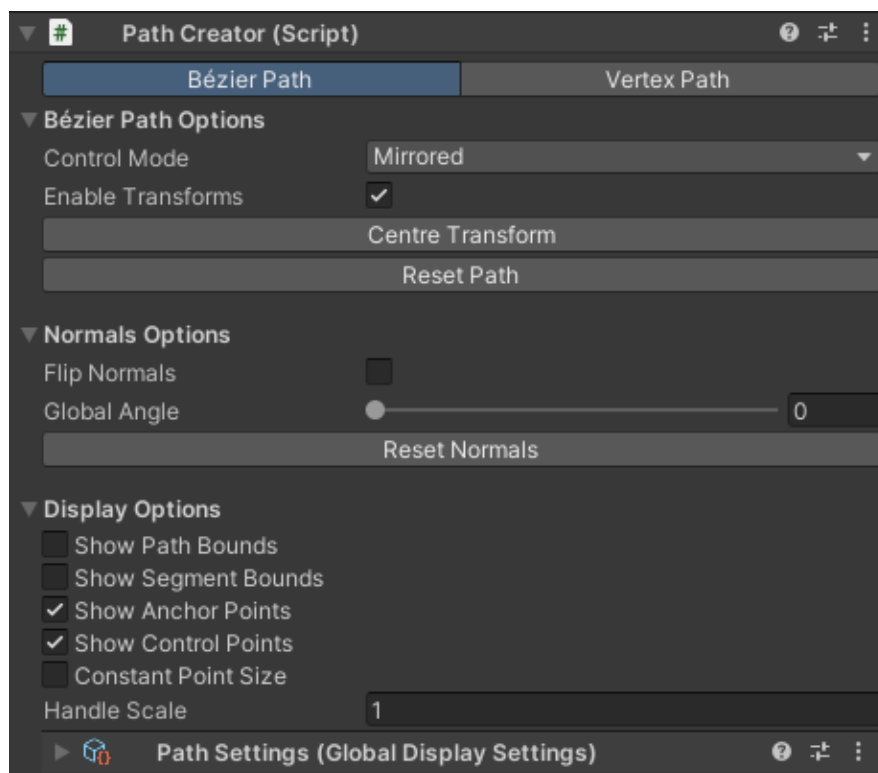


Рисунок 19 – Редактор генератора кривых Безье

На третьем шаге алгоритма предполагается реализация механизма детализации ствола и ветвей дерева по сгенерированным кривым Безье. Для этого был разработан отдельный компонент, отвечающий за добавление точек приближения, которые тоже будут являться игровыми объектами. Также данный компонент добавляет удобства генерации представления каждой ветви в режиме редактирования. Пользователю предоставляется возможность выбрать начальный и конечный радиусы ветви, чтобы все точки приближения между

заданными опорными точками подстроились под заданный диапазон значений автоматически. Более того, предусмотрен режим предпросмотра будущей модели сгенерированного дерева.

Вид редактора создаваемой модели дерева представлен на рисунке 20.

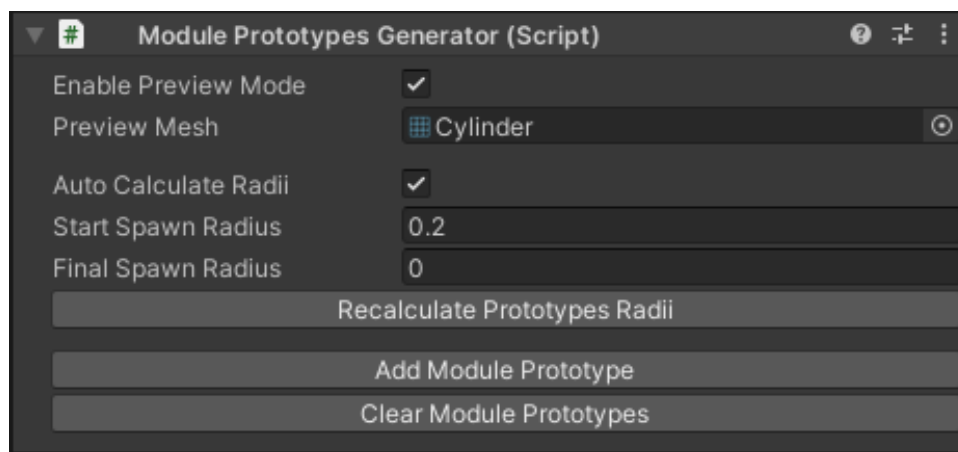


Рисунок 20 – Редактор генератора точек приближения

Вид окна предпросмотра модели дерева представлен на рисунке 21.

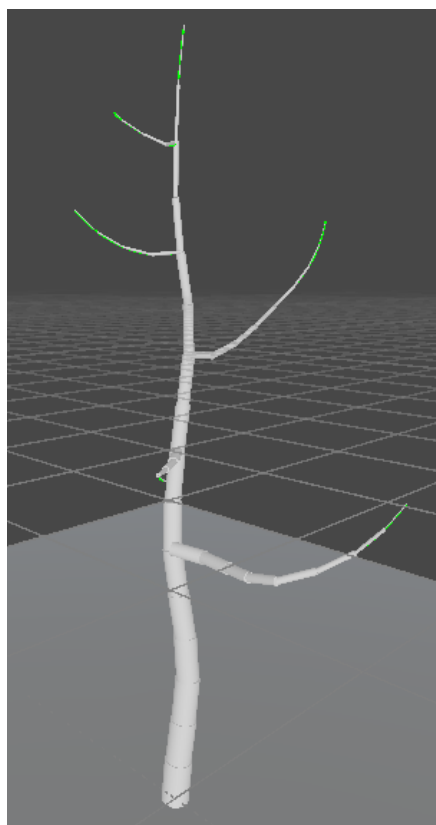


Рисунок 21 – Предпросмотр сгенерированной модели

На четвертом шаге генерации осуществляется непосредственно сам процесс генерации функционального многомодульного представления дерева. В качестве физической оболочки модуля здесь выступает твёрдое тело (Rigidbody) и капсульный коллайдер (Colliders). Оба данных компонента в полной мере обеспечивают правдоподобное физическое поведение. Для связки модулей между собой используется фиксированное соединение (Fixed Joint), которое в комбинации с накопительным эффектом сгиба последовательности скрепленных модулей из статьи [10] дает правдоподобное поведения модулей под действием внешних сил.

Вид сгенерированного функционального многомодульного представления дерева представлен на рисунке 22.

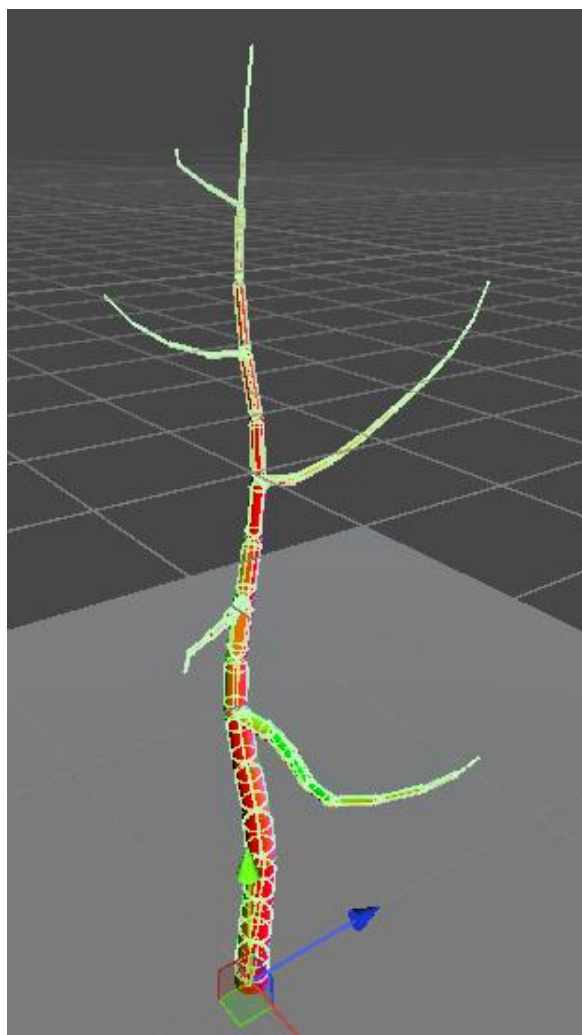


Рисунок 22 – Сгенерированное функциональное многомодульное представление дерева

3.3. Реализация алгоритма распространения лесных пожаров

В данном разделе представлена реализация модели распространения лесных пожаров, для которой было реализовано два алгоритма для моделирования теплопередачи. Реализация алгоритма жидкостного решателя Эйлера-Лагранжа необходима для моделирования теплопередачи между объемом воздуха и модулями деревьев. Реализация разработанного алгоритма теплопередачи для модулей существует для того, чтобы смоделировать горения модулей деревьев, а также для передачи данных о пожаре в жидкостный решатель Эйлера-Лагранжа.

3.3.1. Реализация алгоритма теплопередачи на основе жидкостного решателя Эйлера-Лагранжа

Данный алгоритм предполагает проведение множества операций на сетке фиксированного размера, поэтому лучше всего будет адаптировать все заданные вычисления на стороне видеокарты с использованием вычислительных шейдеров (Compute Shader) и объемных текстур (Texture 3D), а также текстур отрисовки (Render Texture), способных обновлять данные внутри себя в режиме реального времени.

В качестве пространства для проведения вычислений динамики жидкости была создана сетка, заключенная в некоторый ограничивающий объем, являющийся примитивом куба и задающий пространство решений.

Вид ограничивающего объема представлен на рисунке 23.

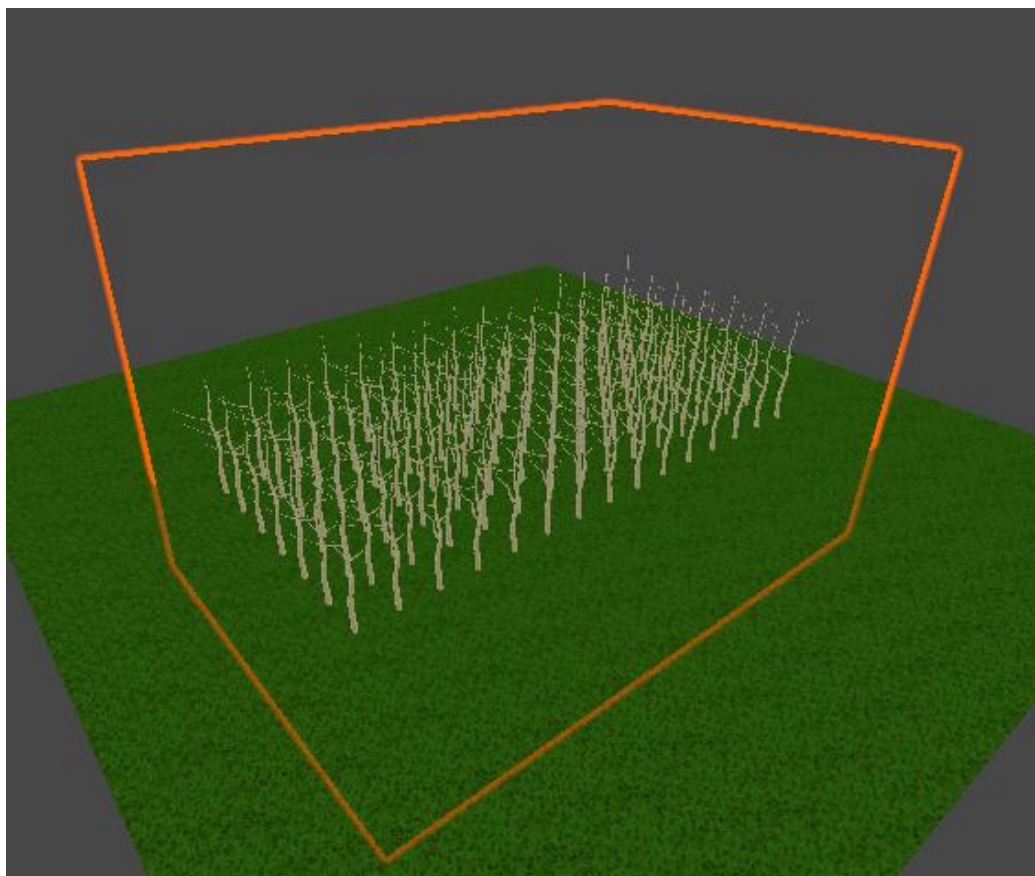


Рисунок 23 – Ограничивающий объем куба как эффективное вычислительное пространство жидкостного решателя Эйлера-Лагранжа

Рассмотрим реализацию основных терминов уравнения Навье-Стокса, описывающих изменения скалярного поля температуры и векторного поля скорости со временем.

3.3.1.1. Реализация термина источник

Лесной пожар не может возникнуть или поддерживаться без воздействия некоторого чрезвычайно сильно нагретого объекта, перешедшего в устойчивое состояние горения. Чтобы такой объект мог существовать был реализован термин источник, который активно генерирует и отдаёт тепло в окружающее пространство.

Пример реализации термина источник можно увидеть на рисунке 24. В рамках данной работы основным источником тепла являются модули деревьев, а управляемым пользователем источником тепла является факел.



Рисунок 24 – Факел как источник тепла поджигает дерево (вид с включенным отображением сетки)

3.3.1.2. Реализация термина диффузия

Отдельно взятая ячейки ограничивающего объёма стремится выровнять свою температуру с температурой окружающих ячеек путём теплообмена. Данное явление обусловлено диффузией вещества, которое не зависит от скорости распространения жидкости в объёме. На теплообмене между связанными ячейками воздуха строится аналогичный процесс между несвязанными объектами внутри объёма, обменивающимися теплом через сетку ограничивающего объёма.

Пример реализации термина диффузия можно увидеть на рисунке 25. Так, горящая ветка дерева передает тепло окружающему воздуху, то есть сетке. На сетке данная ветка воспринимается как источник тепла, который необходимо распространить по сетке через диффузию. Модули дерева, которые находятся рядом, считывают информацию о температуре окружающего воздуха и

нагреваются до тех пор, пока не загорятся и не смогут самостоятельно поддерживать температуру горения.

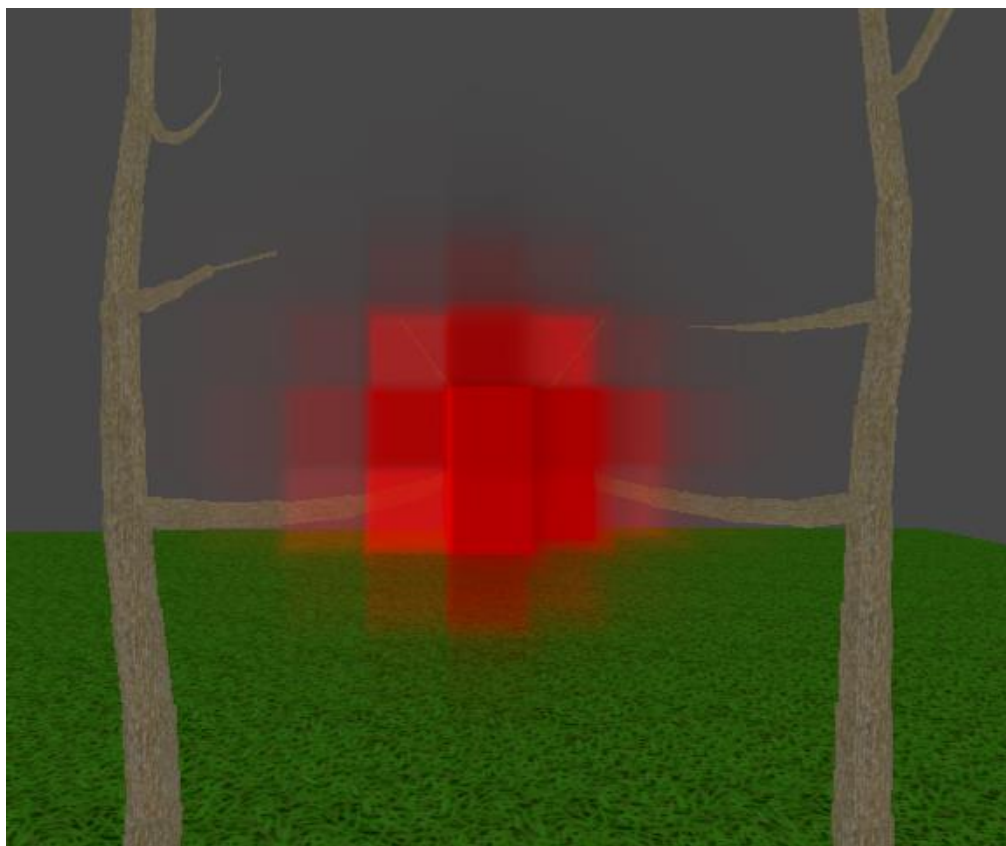


Рисунок 25 – Тепло стремится равномерно распределиться в пространстве (вид с включенным отображением сетки)

3.3.1.3. Реализация термина адвекция

Под действием внешних сил скорость движения жидкости изменяется, а следовательно изменяется и распределение атрибутов в пространстве. Для моделирования подобного эффекта был реализован термин адвекция и дополнительные термины, необходимые для поддержания стабильности жидкостного решателя.

Пример реализации термина адвекция можно увидеть на рисунке 26. Горящее дерево справа под действием сильного ветра смещает своё температурное поле в сторону левого дерева, тем самым передавая часть температуры вдоль направления ветра и нагревая соседнее дерево.

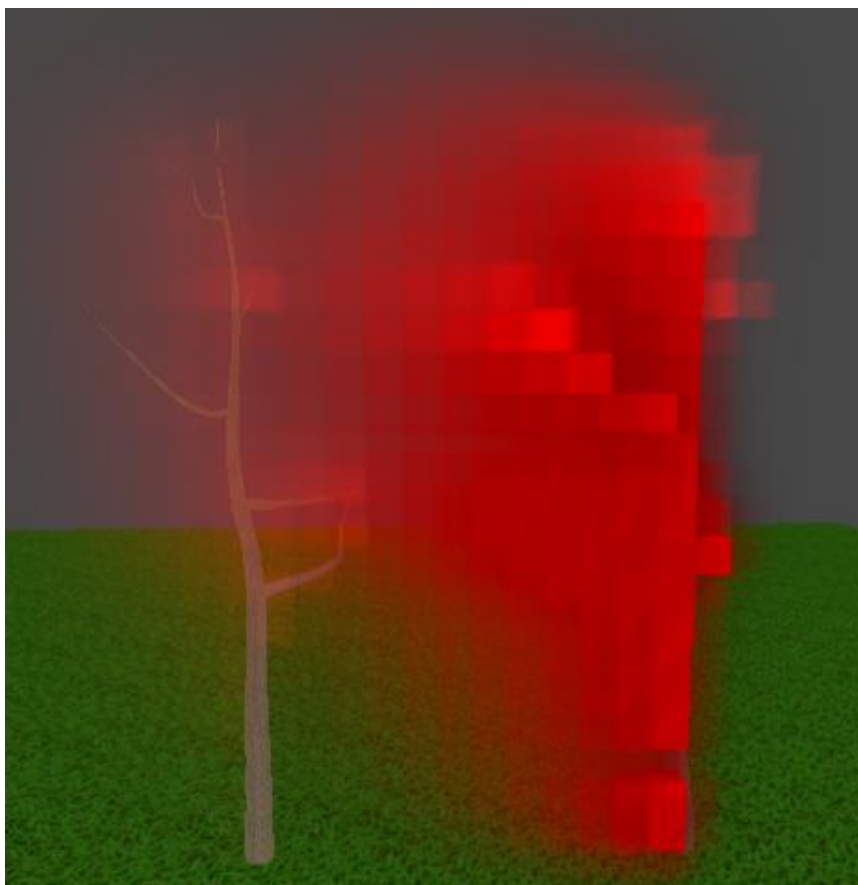


Рисунок 26 – Перемещение тепла вдоль направления сильного (вид с включенным отображением сетки)

3.3.2. Реализация алгоритма теплопередачи для модулей деревьев

Рассматриваемый алгоритм предполагает серьезную работу с вычислительными ресурсами, поскольку частично выполняется на стороне центрального процессора, особенно если нужно обновлять параметры модулей.

Задача данного алгоритма максимально эффективно работать в рамках заданных ограничений, обоснованных тем, что физическая симуляция моделей деревьев, а также обработка операций с параметрами модулей осуществляется на центральном процессоре. Операции, требующие получения неуправляемых данных модулей, например, для отправки этих данных на видеокарте, выполняются параллельно с помощью системы заданий (Job).

Существует отдельный класс, чья роль состоит в том, чтобы хранить заранее сохраненные данные о всех существующих модулях и их компонентов. Доступ к элементам данного класса имеют все системы.

Важно отметить особое представление сгенерированного дерева, ведь оно не обладает никакими компонентами для отрисовки. За место этого используется механизм инстанционного рендеринга (Instanced Rendering), который добавляет на сцену множество цилиндров с одинаковой геометрией по позициям модулей, тем самым эффективно снижая нагрузку на отрисовку деревьев.

В общем виде алгоритм можно разбить на следующие основные шаги:

1) Получение данных о текущем состоянии сетки, а именно данных о окружающей температуре и текущей скорости ветра для каждого модуля. Данный этап выполняется как фоновый процесс в асинхронном режиме и передает данные с GPU на CPU.

2) Чтение данных о окружающей скорости для каждого модуля, расчёт и применение силы к их физическим компонентам. Таким образом, реализуется динамика растительности и деревья реагируют на изменяющийся поток ветра.

3) Чтение данные о окружающей температуре для каждого модуля и осуществление действий связанных с распределением температуры в рамках модулей.

4) Реализация внутренней диффузии дерева. Осуществляется проход по иерархии сверху-вниз, в процессе которого для каждого модуля находится сосед и между ними усредняется и распределяется температура с коэффициентом диффузии дерева.

5) Реализация процесса горения. Опираясь на текущую температуру модуля, рассчитывается потерянная масса модуля в процессе горения. Данная величина увеличивается на коэффициент теплопередачи между модулем и воздухом и полученное значение отдается окружающему воздуху.

6) Реализация баланса между температурой модуля и окружающей температурой. Принимается положение о том, что всякая система стремится к балансу, поэтому температура модуля и температура окружающего воздуха должны стремиться к среднему значению. Принимаются коэффициенты теплопередачи для ситуаций воздух-модуль и модуль-воздух.

7) Сбор данных о выделенном в окружающий воздух температуре и передача их на сетку, то есть перенос данных с CPU на GPU.

8) Вызов основных этапов жидкостного решателя, таких как занесение данных о влиянии источников, распределение атрибутов в пространстве за счет диффузии, перенос атрибутов в пространстве за счет адвекции, обеспечение несжимаемости жидкости через корректировку поля скорости.

3.4. Вывод критериев оценки модели

Чтобы сделать выводы о результативности разработанной модели необходимо обратиться к предыдущим работам по данной теме и вывести общие критерии оценивания.

3.4.1. Критерии оценки производительности модели

В качестве опорного материала для вывода критериев оценки производительности модели возьмём работу [2]. В таблице 2 представлены избранные результаты моделирования из данной работы.

Таблица 2 – Избранные результаты работы модели распространения лесных пожаров на основе мезомасштабного подхода [2]

Разрешение сетки, м.	Шаг сетки, м.	Количество деревьев, шт.	Количество модулей, шт.	Время вычисления, мс.
112 × 64 × 128	2	3400	12200	16
64 × 64 × 48	1	78	5000	4

Из предложенных критериев наиболее общими можно назвать следующие:

- 1) Разрешение – масштаб сцены в метрах кубических.
- 2) Δx – единичный равномерный масштаб сетки в метрах.
- 3) n – общее количество деревьев в сцене в штуках.

4) N – общее количество составных элементов деревьев в сцене в штуках.

5) CT – время вычислений на каждое прямое интегрирование в миллисекундах.

Указанные критерии являются универсальными и хорошо подходят для оценки производительности разработанной модели распространения лесных пожаров.

3.4.2. Критерии оценки функциональности модели

Для оценки функциональности модели возможно учесть множество особенностей, которое может проявлять модель растительности с реализованной динамикой ветвей.

Так, авторы статьи [14] реализовали дерево способное физически корректно реагировать на изменяющееся поле ветра, а также на окружающие препятствия.

С другой стороны, посмотрели авторы статьи [1] и сосредоточились на возможности дерева физически корректно разрушаться под действием огня, постепенно ослабляя связи между составными частями дерева и в конечном счёте падая на землю.

Что не мало важно, авторы статьи [2] предоставили алгоритм генерации растительности, способный генерировать множество различных форм растительности из ограниченного набора составных частей.

Указанные возможности можно считать как критерии оценки функциональности разработанного представления растительности, которое является основным элементом разработанной модели распространения лесных пожаров.

4. ТЕСТИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕШЕНИЯ

В данном разделе приведено описание экспериментов и результаты их проведения.

4.1. Оценка производительности разработанной модели

Для получения результатов экспериментов воспользуемся интегрированной в движок Unity средой аналитики (Unity Profiler). Проводится серия экспериментов для замера производительности симуляции с точки зрения установленных критериев.

Замеры производительности осуществлялись на конфигурации системы, представленной в таблице 3.

Таблица 3 – Конфигурация системы для проведения экспериментов

Устройство	Конфигурация
Центральный процессор	Ryzen 5 3600
Оперативная память	16 ГБ
Графический процессор	Radeon RX 5700
Видеопамять	8 ГБ
Операционная система	Windows 10

4.1.1. Оценка производительности модели без учета физики растительности

Проведем эксперимент для того, чтобы выявить как разработанная модель справляется с обработкой большого массива леса. Делается это для того, чтобы сравнить результаты с опорной статьей [2]. Для этого необходимо отключить физику растительности, поскольку она выполняется на стороне CPU и отнимает много ресурсов.

Для данного эксперимента используется большая сцена леса, вид которой изображен на рисунке 27.

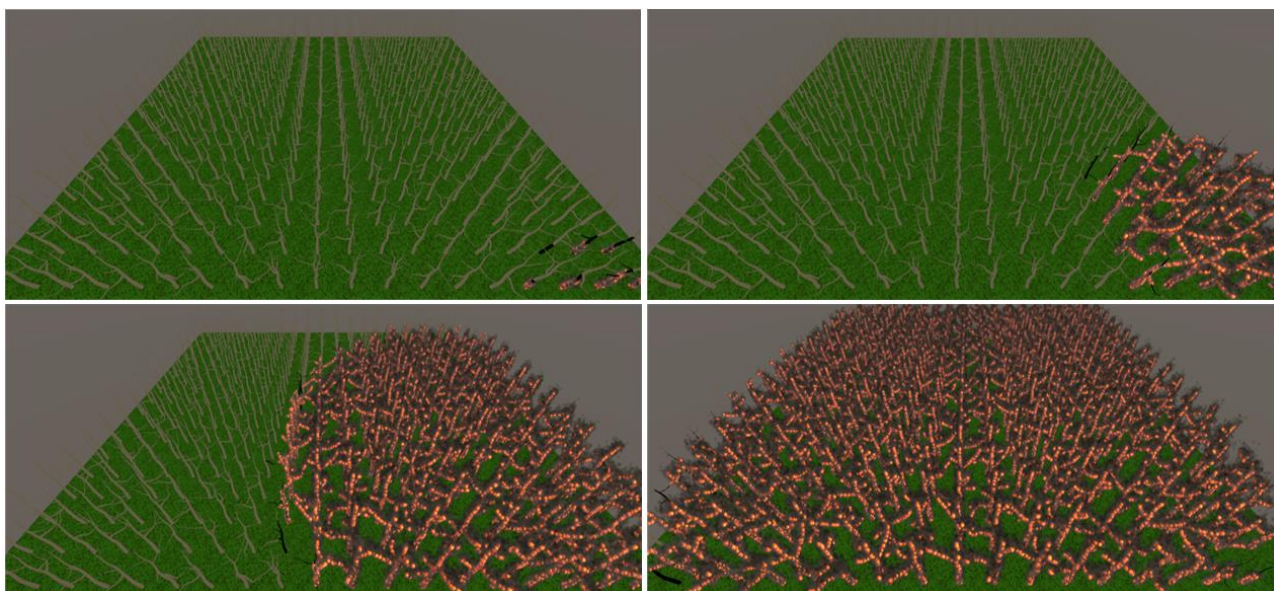


Рисунок 27 – Большая сцена леса для оценки производительности модели распространения лесных пожаров без учета физики растительности

Из окна средства аналитики на рисунке 28 видно, что время выполнения модели распространения лесных пожаров постоянно и выполняется примерно за 8 миллисекунд для 12000 модулей при шаге сетки 2 метра с включенной физикой растительности. Поскольку данный алгоритм выполняется в цикле физических обновлений, иногда происходят скачки времени выполнения из-за того, что алгоритм вызывается более 1 раза за кадр.

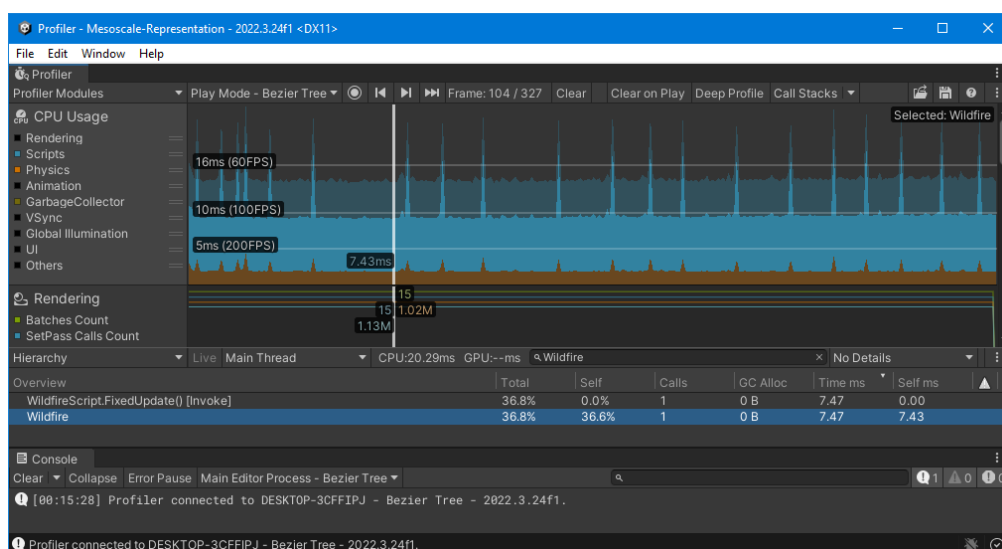


Рисунок 28 – Время выполнения модели распространения лесных пожаров при 12000 модулях при шаге сетки 2 метра с отключенной физикой растительности

Также важно учитывать время выполнения операции чтения данных из решателя жидкости. Из окна средства аналитики на рисунке 29 видно, что время выполнения данной операции постоянна и составляет около 1 миллисекунды. Важно отметить, что данная операция вызывается по готовности результатов, а значит не каждый кадр.

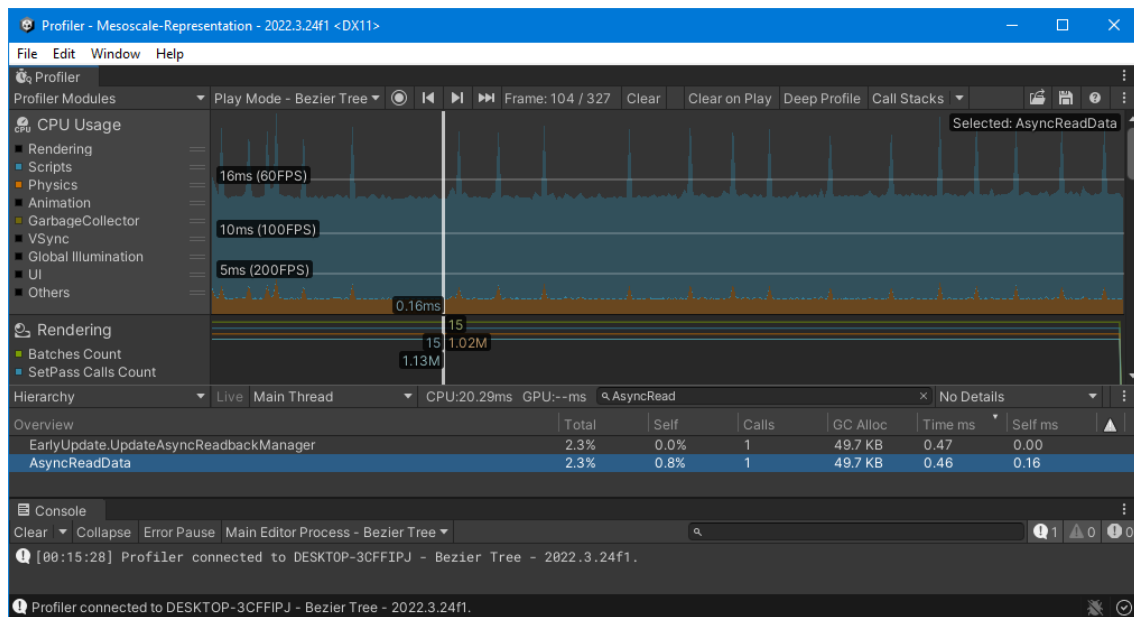


Рисунок 29 – Время выполнения операции чтения данных из решателя жидкости при 12000 модулях при шаге сетки 2 метра с отключенной физикой растительности

Другой немаловажной составляющей является отображение модулей, которое осуществляет с использованием механизма инстанционного рендеринга. Для этого каждый кадр вычисляется матрица положений, поворота и размерности для каждого модуля, который необходимо отобразить. Из окна средства аналитики на рисунке 30 видно, что время выполнения данной операции постоянна и составляет около 5 миллисекунд

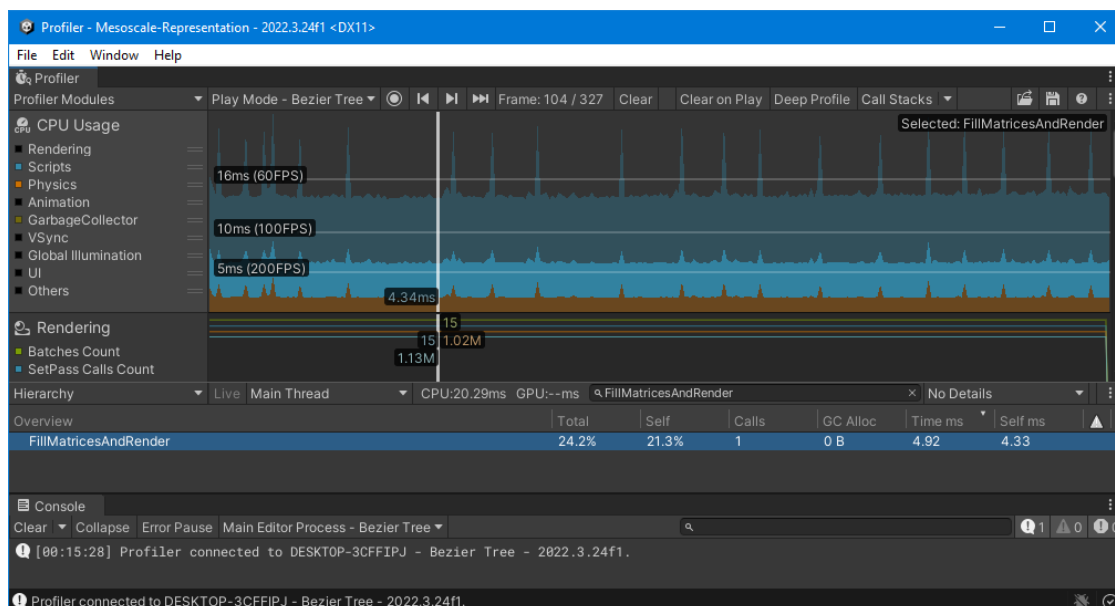


Рисунок 30 – Время выполнения операции отображения модулей при 12000 модулях при шаге сетки 2 метра с отключенной физикой раздельности

Из данного эксперимента можно сделать вывод, что разработанная модель не уступает опорной модели по производительности, но с условием отключенной физики растительности.

4.1.2. Оценка производительности модели с учетом физики растительности

Проведем эксперимент для оценки производительности модели с включённой физикой растительности. Большинство статей, реализующие данный функционал [1], существенно теряют в производительности при моделировании леса.

Для данного эксперимента используется относительно небольшая сцена леса, вид которой изображен на рисунке 31.

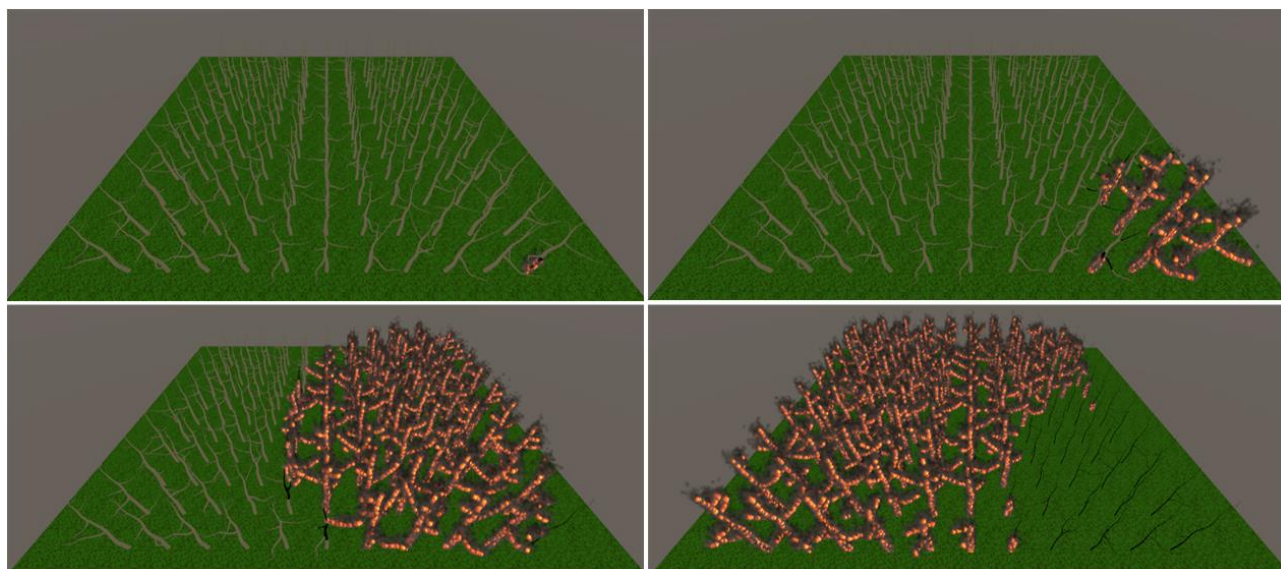


Рисунок 31 – Небольшая сцена леса для оценки производительности модели распространения лесных пожаров с учетом физики растительности

Из окна средства аналитики на рисунке 32 видно, что время выполнения модели распространения лесных пожаров постоянно и выполняется примерно за 6 миллисекунд для 6000 модулей при шаге сетки 1 метр с включенной физикой растительности. Здесь же видно, что из-за загруженности цикла физических обновлений модель иногда не успевает выполняться и происходит провалы во времени выполнения.

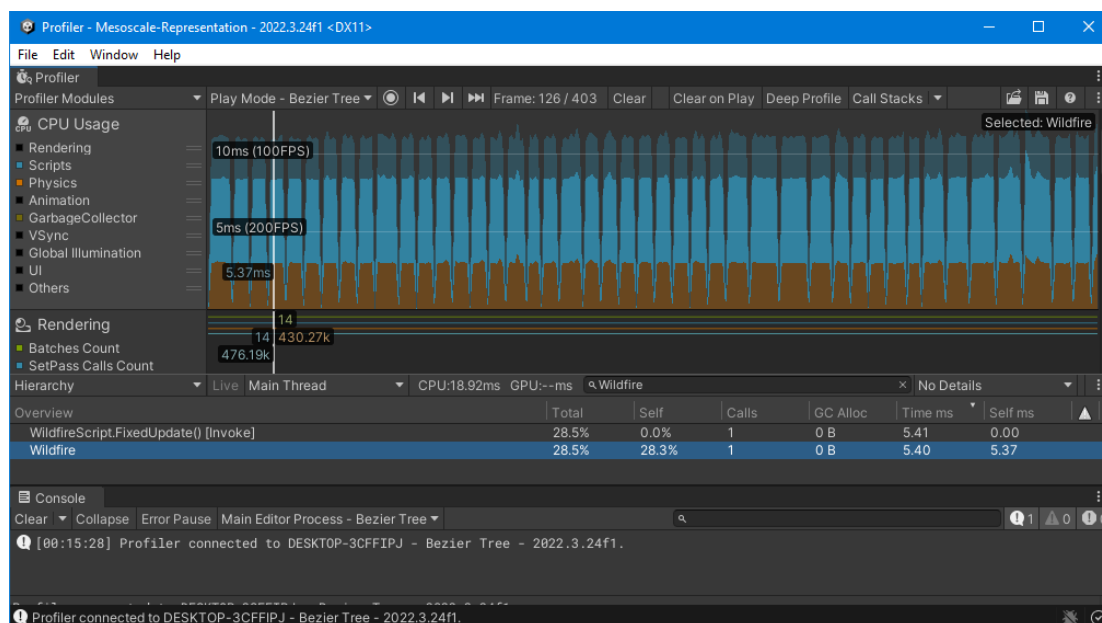


Рисунок 32 – Время выполнения модели распространения лесных пожаров при 6000 модулях при шаге сетки 1 метр с включенной физикой растительности

Из окна средства аналитики на рисунке 33 видно, что время выполнения физики растительности постоянно и выполняется примерно за 5 миллисекунд при 6000 активных физических объектов, находящихся под действием внешних физических сил.

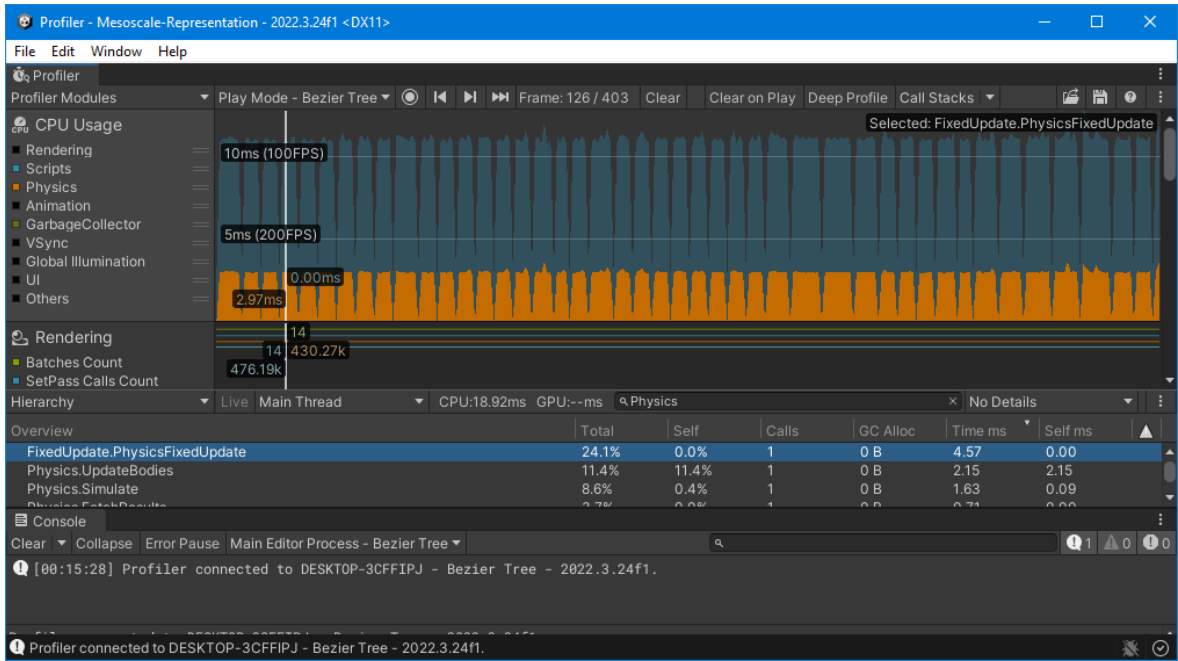


Рисунок 33 – Время выполнения физики растительности при 6000 модулях при шаге сетки 1 метр с включенной физикой растительности

Также следует проверить время выполнения чтения данных из решателя жидкости. Из окна средства аналитики на рисунке 34 видно, что время выполнения данной операции остается постоянной и по-прежнему составляет меньше 1 миллисекунды.

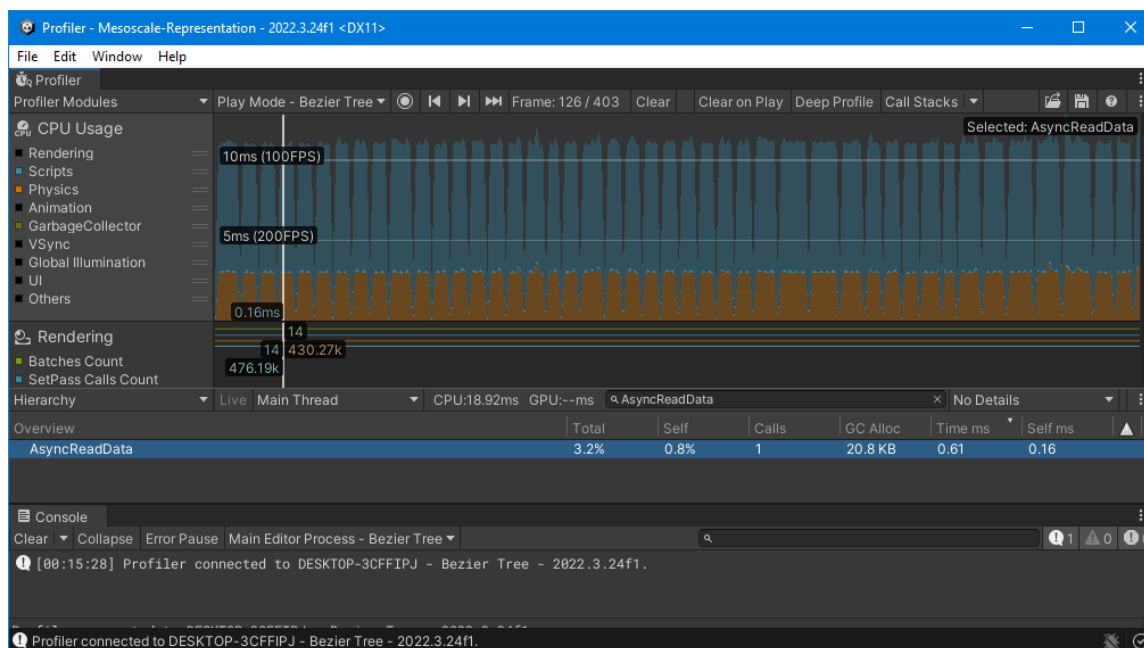


Рисунок 34 – Время выполнения операции чтения данных из решателя жидкости при 6000 модулях при шаге сетки 1 метр с включенной физикой растительности

Также стоит проверить время выполнения операции отображения модулей. Из окна средства аналитики на рисунке 35 видно, что время выполнения данной операции постоянна и составляет около 2 миллисекунд.

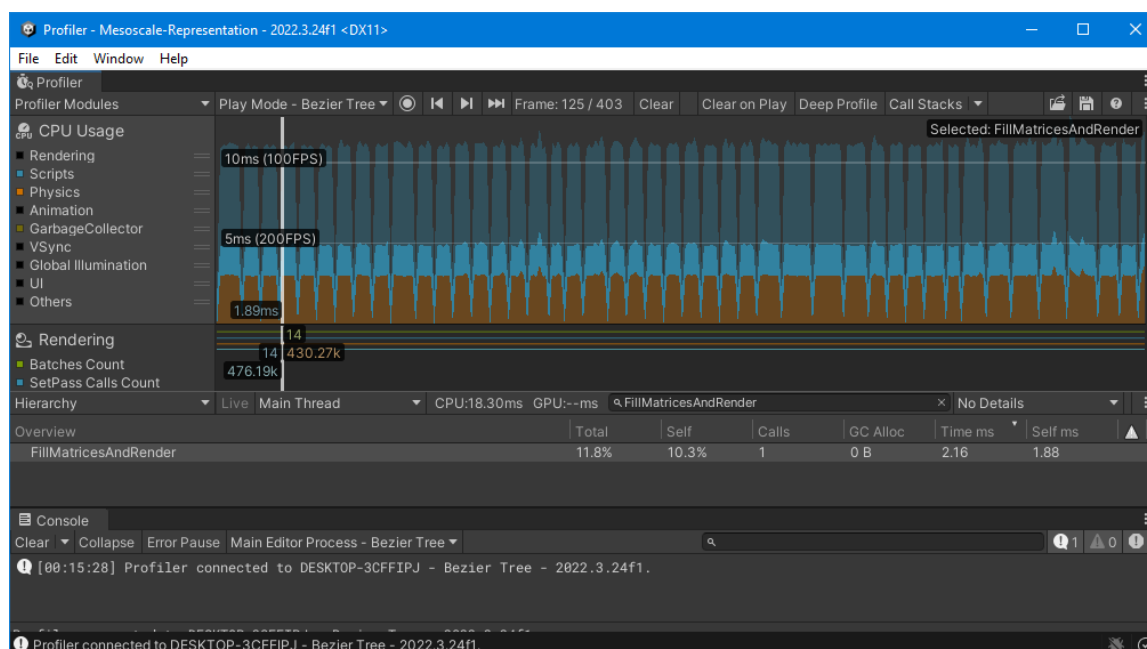


Рисунок 35 – Время выполнения операции отображения модулей при 6000 модулях при шаге сетки 1 метр с включенной физикой растительности

Из данного эксперимента можно сделать вывод, что модель хоть и потеряла в производительности при включении физики растительности, но всё равно способна работать с существенно большим числом деревьев в масштабе леса, чем аналогичные модели.

4.2. Оценка функциональности разработанной модели

Одной из отличительных особенностей данной модели распространения лесных пожаров от множества других является разработанное для неё представление растительности. Комбинируя в себе переменную детализацию за счет многомодульного подхода и возможности приближения исходной геометрии за счет интерполяции по траектории кривых Безье, данное представление может быть чрезвычайно полезно для генерации различных видов растительности. Более того, был описан подход к преобразованию статичного представление в динамическое (функциональное) представление. Это позволяет модели дерева физически корректно реагировать на внешние силы, а также менять свою структуру под действием этих сил.

Проведем серию экспериментов для разбора возможностей данного представления растительности.

Так, были полученные различные модели деревьев, такие как граб, береза и осина. Эти деревья отличаются своей плотностью, а значит и их физическое поведение будет отличаться. Модели сгенерированных деревьев представлены на рисунке 36.

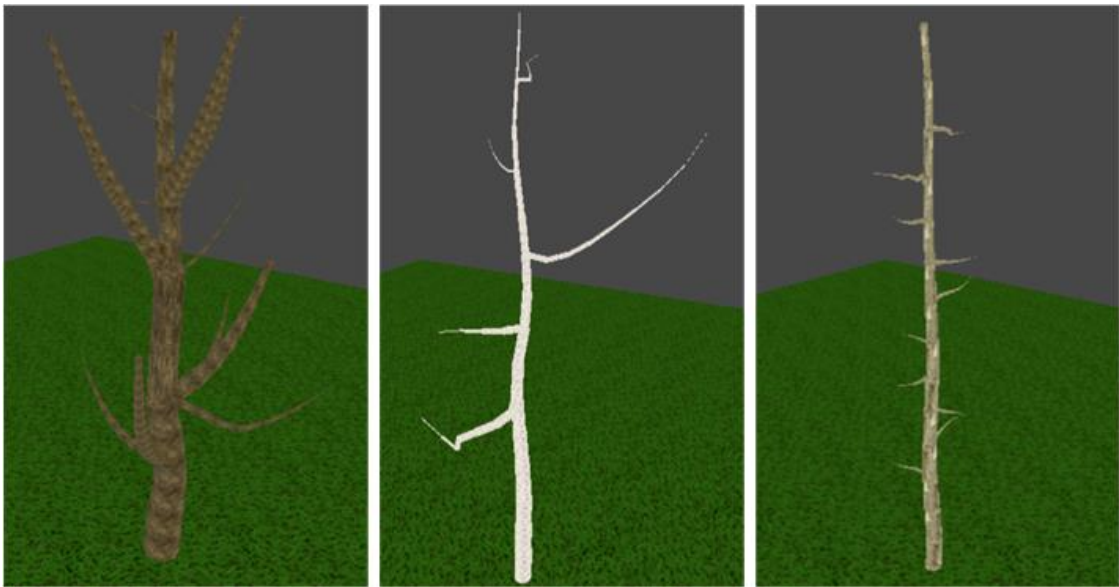


Рисунок 36 – Сгенерированные модели граба, березы и осины

Более того, уточним, что дерево способно реагировать на воздействие извне будто ветер или другой объект (рисунок 37).

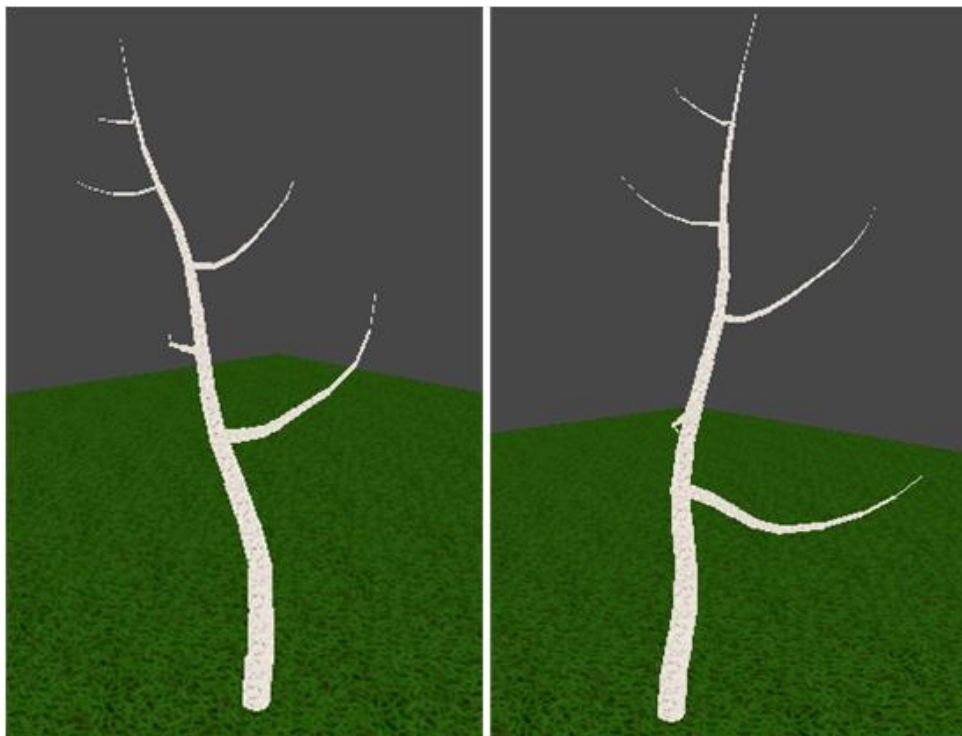


Рисунок 37 – Дерево реагирует на влияние извне, например, на ветер или на давление со стороны других объектов

Также, заметим, что в процессе горения дерево распадается на составные части (рисунок 38).

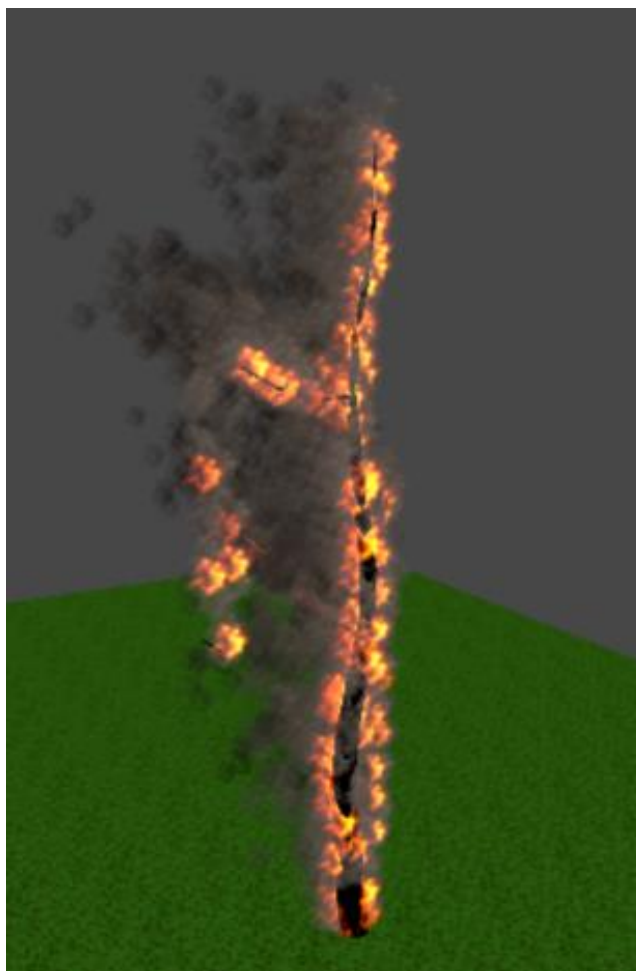


Рисунок 38 – Дерево реагирует на возгорание и со временем разрушается

Из данных экспериментов можно сделать вывод о том, что разработанная модель представления растительности показывает определенную гибкость при генерации экземпляров моделей деревьев, вложенное в основу физическая составляющая способно моделировать динамику ветвей, а также физическое поведение дерева при горении.

4.3. Анализ результатов

Из результатов проведенных экспериментов можно сделать выводы.

Во-первых, удалось на базе объектно-ориентированного подхода одновременно поддерживать в сцене более 12000 видимых игровых объектов в режиме реального времени без учета физики растительности. Вариация с включенной физикой растительности вынуждена работать только с 6000 объектами из-за ограничений производительности физического движка.

Ключевым преимуществом данной модели является использование инстанционного рендеринга вместе с многомодульным представлением растительности. В отличие от авторов статьи [2] нет никакой необходимости иметь конкретный набор примитивов для сбора дерева. Можно иметь один вариант примитива, например цилиндр, и адаптировать его размерность через масштабирование. Более того, поскольку все эти примитивы перед появлением проходят через вершинный шейдер, данный подход можно доработать и как бы “сшить” их грани воедино, создав тем самым гладкое представление дерева.

Более того, из-за хранения данных для рендеринга в самом дереве, последние всегда можно скрыть и отобразить в нужный момент без потери данных о симуляции.

Большее число одновременно отображаемых объектов предполагает использование статических игровых объектов без симуляции физики ветвей как это было в статье [2] или же при допущении грубых упрощений [3]. Ближе всего к данной работе является использование подхода ориентированного на данные за место классического объектно-ориентированного, но первый обладает достаточно высоким порогом входа и не всем потенциальным пользователям будет удобно с ним работать и модифицировать.

Во-вторых, модель распространения лесного пожара базируется на проверенном и достаточно эффективном алгоритме [11] [12] [13]. Как стало понятно в ходе экспериментов высокая точность сетки сильно сказывается на производительности симуляции, но даже при относительно небольшой точности сетки проявляются все основные явления теплопередачи. Например, передача тепла от факела к дереву, затем от дерева к дереву и далее по всему лесу.

В-третьих, получилось создать универсальное и гибкое представление дерева через кривые Безье, которое позволяет обойтись без алгоритмов генерации дерева, хоть и требует в текущей постановке некоторых усилий от пользователя (скопировать древовидную структуру вручную). Алгоритм, работающий с данным представлением, решает все основные проблемы кривых

Безье и позволяет генерировать многомодульное представление дерева, перенимая все основные особенности существующих моделей [1] [2].

4.4. Потенциал для улучшений

В данном разделе описываются варианты возможных улучшений разработанной модели.

Так, разработанный алгоритм аппроксимации ветвей деревьев на основе кривой Безье может быть улучшен путём включения в состав его работы алгоритмов, способных автоматически сегментировать дерево по ответвлениям. Это помогло бы избежать необходимости вручную настраивать кривую Безье под конкретно интересующую структуру дерева.

Более того, с учётом наличия в модели большого количества игровых объектов, стоит перенести разработанную модель на стек технологий ориентированный на данные. Это позволило бы избежать высоких затрат на поддержание столь большого множества управляемых объектов.

Поскольку большинство рассмотренных работ сосредотачивается на симуляции верхового пожара стоит задуматься о симуляции и низового пожара, распространяющегося по траве и пологу. С текущей разрушаемостью модулей дерева можно отследить как много запасенной энергии осталось в упавшей ветке и передать оставшуюся в упавшей ветке тепловую энергию траве, тем самым провоцируя низовой пожар и поддерживая его распространение.

Стоит отметить достаточно широкий возможности квадродеревьев в вопросе оптимизации многомодульных представлений деревьев. Разбив поверхность леса на секции, где каждая секция знает о деревьях, которые в ней находятся, можно добавить отображение высоко детализированных деревьев вблизи зрителя, а низко детализированных деревьев вдали от зрителя. Также, возможна реализация без участия зрителя. Каждое дерево, которые попадает под действие высокой температуры меняет собственное низко детализированное представление на высоко детализированное. Таким образом, в процессе горения буду участвовать только высоко детализированные многомодульные представления деревьев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данной работы была разработана модель распространения лесных пожаров.

Данная модель показывает хорошие результаты производительности, а также способна учитывать физическое поведение растительности. Так, разработанная модель с отключенной физикой растительности способна обрабатывать большие объемы леса, что есть около 300 детализированных моделей деревьев. С включенной физикой растительности данная модель может работать только с лесами в два раза меньших по размеру, но данный показатель существенно лучше, чем у моделей с аналогичным функционалом.

Достигнуто это было благодаря особенному подходу к рендерингу деревьев, модификации многомодульного подхода для генерации функциональных моделей растительности, а также простому и стабильному решателю жидкости Эйлера-Лагранжа.

Исходя из результатов тестирования и анализа разработанной модели, можно сделать следующие выводы:

- инстанционный рендеринг отлично справился с задачей отображения большого количества детализированных деревьев;
- мезомасштабное (многомодульное) представление растительности, при должной доработке отлично подходит для последовательного приближения исходной геометрии растительности;
- решатель жидкости Эйлера-Лагранжа может быть использован для симуляции сложных процессов, например как распространение лесных пожаров.

Результаты моей ВКР и его исходные коды, текст, пример с инструкциями к запуску опубликованы в репозитории на GitHub. Получить доступ к ним можно по ссылке [18].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Pirk S. et al. Interactive wood combustion for botanical tree models //ACM Transactions on Graphics (TOG). – 2017. – Т. 36. – №. 6. – С. 1-12.
2. Hädrich T. et al. Fire in paradise: Mesoscale simulation of wildfires //ACM Transactions on Graphics (TOG). – 2021. – Т. 40. – №. 4. – С. 1-15.
3. You J. et al. Real-time 3D visualization of forest fire spread based on tree morphology and finite state machine //Computers & Graphics. – 2022. – Т. 103. – С. 109-120.
4. Meng Q. et al. Visualization of 3D forest fire spread based on the coupling of multiple weather factors //Computers & Graphics. – 2022.
5. ANTMANS.:Nonlinear Problems of Elasticity(2nd edition).Springer, Dordrecht, 2005.
6. Deul C. et al. Direct position-based solver for stiff rods //Computer Graphics Forum. – 2018. – Т. 37. – №. 6. – С. 313-324.
7. Bender J., Müller M., Macklin M. Position-Based Simulation Methods in Computer Graphics //Eurographics (tutorials). – 2015. – С. 8.
8. Shao H. et al. Accurately Solving Rod Dynamics with Graph Learning //Advances in Neural Information Processing Systems. – 2021. – Т. 34. – С. 4829-4842.
9. Huang J. et al. A survey on fast simulation of elastic objects //Frontiers of Computer Science. – 2019. – Т. 13. – №. 3. – С. 443-459.
10. Quigley E. et al. Real-time interactive tree animation //IEEE transactions on visualization and computer graphics. – 2017. – Т. 24. – №. 5. – С. 1717-1727.
11. Stam J. Real-time fluid dynamics for games //Proceedings of the game developer conference. – 2003. – Т. 18. – №. 11.
12. Stam J. Stable fluids //Seminal Graphics Papers: Pushing the Boundaries, Volume 2. – 2023. – С. 779-786.
13. Stam J. Interacting with smoke and fire in real time //Communications of the ACM. – 2000. – Т. 43. – №. 7. – С. 76-83.

14. Pirk S. et al. Windy trees: Computing stress response for developmental tree models //ACM Transactions on Graphics (TOG). – 2014. – Т. 33. – №. 6. – С. 1-11.
15. Richter F., Rein G. A multiscale model of wood pyrolysis in fire to study the roles of chemistry and heat transfer at the mesoscale //Combustion and Flame. – 2020. – Т. 216. – С. 316-325.
16. Unreal Engine 5.0 Documentation [Электронный источник]. URL: https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/unreal-engine-5-0-documentation?application_version=5.0 (дата обращения: 23.05.24).
17. Unity Documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.unity.com/> (дата обращения: 23.05.24).
18. MesoscaleWildfire [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/NemkovYaroslav/MesoscaleWildfire.git> (дата обращения: 26.05.2024)