

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛАКОВ В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Башков Е.А., Суворова И.П.

Кафедра ПМИИ, ДонГТУ

bashkov@pmi.donetsk.ua, suvorova@r5.dgtu.donetsk.ua

### **Abstract**

*Bashkov E.A., Suvorova I.P. Cloud simulation in virtual environments. In this paper we present a new method of simulation and visualization of smoke and steam clouds in virtual environments. We use a particle system approach but reduce the particle numbers to decrease the computation and rendering times.*

### **Введение**

Визуализация локального дыма и облаков может увеличить реализм изображений в системах виртуальной реальности (СВР). Как показали последние исследования, достигнут большой прогресс в компьютерной анимации облаков, но моделирование в реальном времени и визуализация облаков в СВР имеет существенные недостатки. Польза от локальных облаков ясна: эта дополнительная особенность может быть широко использована в индустриальных, архитектурных СВР или СВР городского планирования. Одним из приложений является моделирование серьезных аварий на химических заводах, которое может быть использовано в планировании путей эвакуации. Другим приложением является моделирование природных явлений для тренажеров транспортных средств. Требование реального времени заставляет искать компромисс между качеством и скоростью в представлении облаков.

### **1. Предыдущие исследования**

Reeves[1] ввел понятие частичных систем компьютерной анимации. Он предложил моделировать и изображать большое количество частиц для того, чтобы визуализировать нечеткие объекты, такие как дым или газовые облака. Кроме общего подхода, предложил идею иерархии частичных систем.

Исследования [2,3] представляют физические модели для природных явлений, таких как снег, дождь, вода или огонь. Эти модели не используются в реальном времени, так как они должны иметь сотни тысяч частиц, чтобы достигнуть реального эффекта. Однако, результаты этого исследования применены в профессиональной анимационной системе Softimage.

В последние годы разработано несколько СВР для визуализации результатов сложного механического моделирования[4,5,6]. Интерактивная 3D визуализация достигается за счет уменьшения числа частиц и использования аппаратных средств. Хотя цель этих систем отлична от темы этой статьи, комбинация частичных (particle) систем и аппаратных средств является многообещающим подходом. Поэтому выбираем этот подход как начальную точку для исследования.

## 2. Комбинирование частичных систем и многогранных моделей облаков

### 2.1. Концепции

Использование только частичных систем для моделирования больших облаков в реальном времени является сегодня невозможной задачей. Единственный способ моделировать частичные системы в реальном времени - это уменьшение числа частиц до нескольких тысяч. Простые методы, такие как визуализация каждой частицы, могут использоваться только для малых облаков. В случае больших облаков нужно найти другое решение.

Первый шаг - это уменьшение числа частиц. Из миллиона частиц остается только несколько тысяч. Однако, визуализация должна спрятать это сокращение. Основная идея - использовать остающиеся частицы как вершины текстурного многогранника. Таким образом, группа из недостающих частиц визуально представляется единственным, текстурным и полупрозрачным многогранником, включающим малый объем. Чтобы моделировать большое облако, необходимо создать много таких многогранников (Рисунок 2.1). Из-за множественных пересечений пустые пространства облака становятся меньше, и наблюдатель не замечает их.

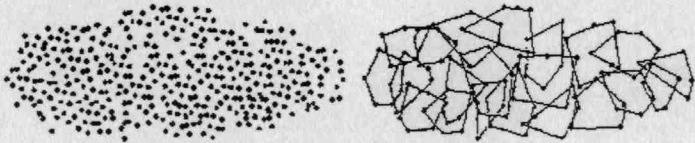


Рисунок 2.1 - Замена частиц облака многогранниками

Дальнейшее увеличение реализма достигается вычислением значений температуры и плавучести для группы из нескольких ( $\approx 40$ ) частиц, которые строят маленькое облако. Структуризация частиц в облаках позволяет разделить их между несколькими моделируемыми потоками.

### 2.2. Физическое обоснование

В последующих формулах будут использоваться следующие параметры:

$\alpha$  - константа, зависящая от материала;  $\eta$  - вязкость среды;  $\mu_A$  - средняя атомная масса молекул воздуха;  $\nu$  - молярная масса молекул газа;  $\mu_C$  - средняя атомная масса молекул облака;  $C_p$  - теплоемкость облака (под постоянным давлением);  $\rho_M$  - плотность среды;  $\rho_B$  - плотность тела;  $g$  - гравитационная константа;  $m$  - масса облака;  $\kappa$  - постоянная Больцмана ( $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ );  $p$  - давление воздуха ( $\text{Н/м}^2$ );  $\Delta r$  - перемещение частицы облака;  $r_C$  - радиус частицы облака;  $A$  - поверхность облака;  $R$  -  $8.314 \text{ J/Кмоль}$  (универсальная газовая постоянная);  $T_A$  -

температура воздуха;  $T_C$  – температура облака;  $T_C(0)$  – начальная температура облака;  $V$  – объем облака,  $F_{up}$  -архимедова сила.

Чтобы достигнуть реальной визуализации облака, нужно разработать физически реалистичную модель. Соединяем принцип плавучести Архимеда:

$$F_{up} = gV(\rho_M - \rho_B) = gV\left(\frac{\mu_A}{V_A} - \frac{\mu_C}{V_C}\right) \quad (2.1)$$

и уравнение состояния идеального газа:

$$pV = \nu RT = \frac{m}{\mu} RT \quad (2.2)$$

Из формул 2.1 и 2.2 получаем формулу, которая описывает газовую конвенцию:

$$F_{up} = \frac{gpV}{R} \left( \frac{\mu_A}{T_A} - \frac{\mu_C}{T_C} \right). \quad (2.3)$$

Рисунок 2.2 изображает скорость и траекторию движения облака в горизонтальном направлении после применения формулы (2.3). Кривые показывают, что эта первая модель не является удовлетворительной. Облако по этой кривой поднималось бы быстро ко внешнему пространству, так как охлаждение облака не принималось во внимание в формуле (2.3).

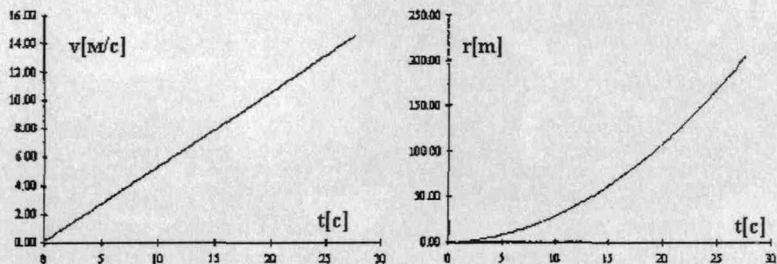


Рисунок 2.2 – Первая физическая модель

Такое поведение можно предотвратить расширением физической модели законом охлаждения Ньютона, описывающим температуру тела  $C$  как:

$$T_C = (T_C(0) - T_A)e^{-t/\tau} + T_A, \quad (2.4)$$

$$\text{где } \tau = \frac{C_p m}{\alpha A}. \quad (2.5)$$

Соединяя формулу (2.3) и формулу (2.4), получаем:

$$F_{UP} = \frac{gpV}{R} \left( \frac{\mu A}{T_A} - \frac{\mu c}{(T_C(0) - T_A)e^{-t/\tau} + T_A} \right). \quad (2.6)$$

Кривая на рисунке 2.3 показывает, как облако двигалось бы по уравнению (2.6). Можно предположить, что физическая модель становится более реалистичной. Однако в этой модели нет трения, таким образом, скорость облака может принять нереальные значения.

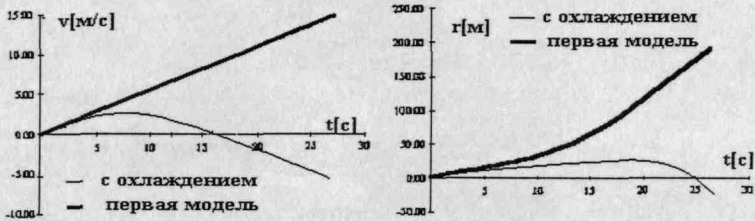


Рисунок 2.3 – Вторая физическая модель

С другой стороны, используя трение, можно разработать реальное взаимодействие облака с ветром. Добавляя элемент трения к уравнению 2.6

$$F_{fr} = C_{fr}(\rho_{wind} - \rho_{cloud}), \quad (2.7)$$

получаем заключительное уравнение для моделирования движения облака:

$$F_{res} = \frac{gpV}{R} \left( \frac{\mu A}{T_A} - \frac{\mu c}{(T_C(0) - T_A)e^{-t/\tau} + T_A} \right) + C_{fr}(\rho_{wind} - \rho_{cloud}). \quad (2.8)$$

Анализ результирующих кривых на рисунке 2.4 выделяет другое улучшение в модели движения, так как вертикальная компонента вектора скорости достигает граничного значения. С другой стороны, если облако достигнет спокойной зоны сцены или ветер утихнет, трение позволит облаку в конце концов остановиться.

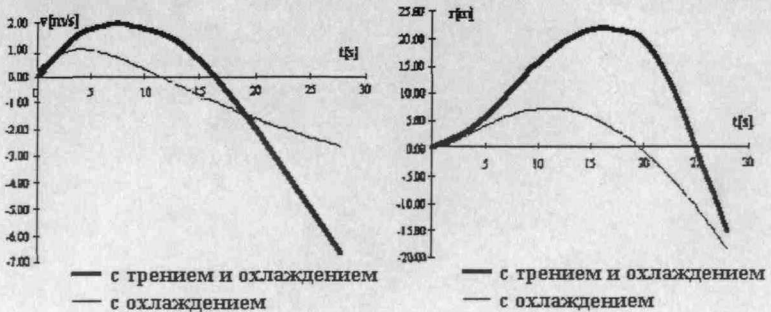


Рисунок 2.4 – Третья физическая модель

### 2.3. Турбулентность

Только с помощью турбулентности можно придать реалистичность сгенерированному облаку. Простая и быстро вычисляемая компьютерная турбулентность может быть взята прямо из модели броуновского движения.

$$\Delta r^2 = \frac{kTC}{2\pi\eta C} \Delta t = c\Delta t. \quad (2.9)$$

### 2.4. Визуализация

Для каждого облака из 40 частиц создается закрытый многогранник. Вершины многогранника – это частицы. Моделируя частицы, автоматически двигаем каждую вершину облака. Важной особенностью является прозрачность многогранника облака. Эмпирические исследования [7] показали, что 90%-прозрачность вершин обеспечивает наилучшее восприятие для глаз. Дополнительно используется фильтрующая гауссовская текстура шума с похожим альфа-каналом, которая производит, вместе с прозрачными вершинами многогранника, очень реалистичные облака. Большое преимущество таких текстур в том, что они могут быть использованы для всех облаков, идущих из одного источника, поэтому уменьшается время изображения. Нестандартные текстуры с любыми артефактами не могут быть использованы в этом подходе, потому что повторение этих артефактов было бы немедленно распознано наблюдателем и разрушило бы реализм.

Из-за высокой прозрачности, единственного многогранника-облака недостаточно для визуализации. Источник облаков должен постоянно производить много пересекающихся облаков, которые уходят от него и покрывают большие части сцены.

Этот подход автоматически решает проблему движущегося наблюдателя в СВР, который сейчас может войти в полупрозрачные, движущиеся многогранники облаков, которые автоматически защищают его от наблюдения их истинной многогранной природы. Рисунок 2.5(а) иллюстрирует ситуацию, когда единственный многогранник используется для визуализации дыма. Хотя объекты А, В и С покрыты облаком и имеют различные расстояния до наблюдателя О, их можно видеть также ясно, как если бы дыма не было совсем. Рисунок 2.5(б) показывает преимущество использования множества многогранников. Наблюдатель сейчас может сказать, что между ним и объектом А больше дыма, чем между ним и объектом В, и, возможно, он даже не заметил объект С, потому что здесь очень много полупрозрачных поверхностей между ними.

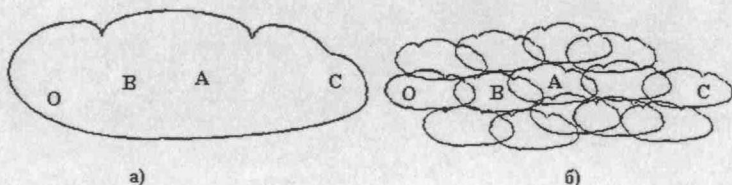


Рисунок 2.5

### 3. Результаты

Таблица 3.1 показывает результаты моделирования облаков на основе алгоритма частиц в параллельной системе Virtual Design II[7] и модифицированного алгоритма, представленного в данной статье (\*) на ПЭВМ Pentium 233.

Таблица 3.1

Число облаков	Время моделирования, мс		Время рендеринга, мс	
		(*)		(*)
30	69	34	62	102
40	94	50	90	130
50	115	62	108	144
75	190	101	170	200
100	248	140	240	260
150	375	202	380	432

Как показывает таблица, узкое место этого подхода – это рендеринг, так как аппаратное обеспечение поддерживает только альфа-затемнение, но не прозрачность.

### Заключение

Узкое место рендеринга требует дальнейших разработок, особенно для динамических и полупрозрачных поверхностей.

Физическая модель может быть в дальнейшем расширена без уменьшения числа фреймов, когда используется более двух каналов моделирования. Однако, для 30-50 облаков система производит допустимое количество фреймов. Нечетко выглядящая текстура, движущиеся вершины и пересекающиеся облака могут полностью спрятать многогранную структуру.

### Литература

1. Reeves W.T. Particle systems – a technique for modeling a class of fuzzy objects. ACM Transactions on graphics 2(2), 1983, pp.91-108.
2. Sims K. Particle animation and rendering using data parallel computation. SIGGRAPH'90. Computer Graphics (24), pp.405-413.
3. O'Brien J.F. Dynamic simulation of splashing fluids. Computer Animation, 1995.
4. Globus A., Levit C., Lasinski T. A tool for visualizing the topology of three-dimensional vector fields. IEEE Visualization Proceedings(2), 1991, pp.123-127.
5. Silver D., Gao M., Zabusky N. Visualizing casual effects in 4D space-time vector fields. IEEE Visualization Proceedings(4), 1994, pp.154-157.
6. Wijk J. Three ways to show 3D fluid flow. IEEE Computer Graphics and Applications(9), 1994, pp.17-24.
7. Astheimer P. Virtual Design II – an advanced VR system for industrial applications. Virtual Reality World Conference: Stuttgart, 1995, p.98-104.