

**УДК 004.94**

**Куштынов Максим Александрович**, студент, Смоленский филиал  
Московского энергетического института, г. Смоленск

## **МЕТОДЫ РАЗРУШЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В 3D ГРАФИКЕ**

### **Аннотация**

Настоящая работа посвящена обзорному анализу методов и технологий симуляции разрушения объектов в трехмерной компьютерной графике. Рассматриваются основы моделирования разрушения, включая диаграмму Вороного как базовый метод сегментации объекта и особенности, которые стоит учитывать при обработке разных материалов. Проводится классификация подходов к реализации разрушения: пререндеренные методы и динамические методы.

### **Annotation**

This paper provides a review of methods and technologies for simulating the destruction of objects in 3D computer graphics. It examines the fundamentals of destruction modeling, including the Voronoi diagram as a basic method for object segmentation and considerations when processing different materials. A classification of approaches to implementing destruction is provided: pre-rendered methods and dynamic methods.

**Ключевые слова:** компьютерная графика, 3D, симуляция, разрушаемость.

**Keywords:** computer graphics, 3D, simulation, destructibility.

Разрушение объектов в трехмерной графике представляет собой одну из наиболее сложных и визуально впечатляющих задач компьютерной графики. Процесс реализации требует от разработчиков и художников нахождения тонкого баланса между достоверностью, производительностью и предсказуемостью результата. Все методы можно разделить на две большие категории: пререндеренные (предварительно просчитанные) и динамические. Индустрии кино и игр выдвигают различные требования на основании которых выбирается оптимальная стратегия для конкретного проекта. В кинематографе приоритетными являются визуальная достоверность и художественная выразительность, что допускает использование пререндеренных методов и значительных вычислительных затрат. В игровой индустрии критическими факторами выступают производительность в режиме реального времени, предсказуемость поведения и интерактивность, что требует применения принципиально иных подходов к моделированию [1].

Для начала следует затронуть тему ограничения времени и сложности вычисления, так как часто именно эти параметры определяют выбор методов разрушения и напрямую влияют на достоверность вывода. Это актуально как для игр, в которых результат должен быть рассчитан на потребительских системах и показан в реальном времени, так и для кино — в зависимости от сложности сцены обработка одного кадра может занимать часы или дни и требует огромных вычислительных мощностей рендер-ферм. Поэтому для каждого проекта выбирается свой набор технологий симуляции и визуализации, оптимизированный под целевые временные рамки и доступные вычислительные ресурсы.

Пререндеренные методы основаны на предварительном создании всех возможных состояний разрушения для минимизации динамических вычислений в момент рендеринга. К данной категории относится метод полной предварительной симуляции (запекание), при котором физические расчеты разрушения выполняются однократно на этапе производства, а результаты (траектории движения фрагментов, деформации) сохраняются в виде

кэшированных анимационных данных. Основным преимуществом пререндеренных методов является предсказуемость результата и минимальная вычислительная нагрузка при воспроизведении, тогда как главным недостатком выступает отсутствие интерактивности и невозможность реагировать на непредусмотренные сценарием воздействия.

Динамические методы предполагают вычисление разрушения в реальном времени на основе физических моделей и актуальных параметров воздействия. Эти методы обеспечивают высокую степень интерактивности и уникальность каждого акта разрушения, однако требуют значительных вычислительных ресурсов и применения дополнительных алгоритмов оптимизации, таких как уровни детализации, пространственную активацию фрагментов, пулы объектов.

Для интерактивных приложений часто применяется гибрид динамических и пререндеренных методов, таких как метод замены. В данном случае целый объект мгновенно замещается заранее смоделированной разрушенной версией, поделенной на фрагменты, дальнейшую обработку которых производит физический движок. Другим распространенным подходом является использование масок текстурирования и декалей (текстур). Повреждения моделируются через динамическое обновление карт прозрачности и наложение дополнительных текстурных слоев, нарисованных заранее, которые имитируют трещины и сколы без изменения базовой геометрии.

Учитывая обозначенные выше особенности, фундаментальным математическим инструментом для процедурного дробления трехмерных объектов служит диаграмма Вороного [2]. Она подходит для обработки часто встречающихся хрупких или крошащихся материалов — бетона, камней, стекла, и подобных им. Если требования к реалистичности позволяют, то диаграммы Вороного используют для разрушения других видов материалов. Для интерактивных приложений обычно выполняют запекание полученных осколков и замену модели в реальном времени. Алгоритм применяется как в 2D, так и в 3D графике. В двумерной плоскости диаграмма Вороного разделяет форму на области, где каждая область содержит все точки, ближайшие к

определенному центру. В трехмерном пространстве это превращается в набор выпуклых многогранников. Именно это свойство делает диаграмму Вороного идеальной для симуляции разрушения: природа часто создает трещины именно по таким случайным, но математически обоснованным траекториям, минимизирующим энергию деформации. Разрушение горной породы, появление трещин в высыхающей грязи — эти и множество других подобных процессов подчиняется подобным закономерностям. Процесс применения диаграммы Вороного к 3D-объекту включает несколько этапов:

1. Генерация точек — внутри объема объекта расставляются точки-семена. Их расположение может быть полностью случайным, равномерным или управляемым — например, большая плотность в местах предполагаемого удара.

2. Построение ячеек — вокруг каждой точки строится область пространства, включающая все точки, которые находятся ближе к данному семени, чем к любому другому.

3. Разделение геометрии — исходная сетка разрезается по границам полученных ячеек.

Для обеспечения вычислительной эффективности применяется иерархическая кластеризация фрагментов, которая может быть представлена как дерево разбиений, где листовые узлы соответствуют неделимым фрагментам, а внутренние узлы — кластерам различного уровня детализации [3].

Математическое разбиение объекта на фрагменты — лишь половина дела. Чтобы разрушение выглядело правдоподобно, необходимо смоделировать физику соединений между фрагментами [4]. Для этого соседние фрагменты соединяются невидимыми связями, каждая из которых имеет определенный предел прочности. Когда внешняя сила (попадание снаряда или ударная волна) превышает порог прочности связи, соединение разрывается. Параметры прочности, в зависимости от реализации симуляции, могут включать в себя:

1. Прочность на сжатие — сопротивление давлению.
2. Прочность на растяжение — сопротивление разрыву.

3. Прочность на сдвиг — сопротивление скольжению фрагментов относительно друг друга.

Однако использование только диаграммы Вороного не может решить проблему достоверной симуляции разрушения некоторых категорий материалов — например, мягких тел, пластичных металлов, древесины. Также этот алгоритм не включает в себя другие процессы, которые происходят во время структурных изменений объекта - просчет физики фрагментов после разделения на осколки, обработка частиц и т. п.

Для реалистичной симуляции повреждения отдельных материалов используются специализированные алгоритмы, учитывающие их реологические свойства и внутреннюю структуру [5]. Выбор конкретного метода определяется типом материала и требуемой точностью моделирования: для металлов применяются модели накопления повреждений в сочетании с методами конечных элементов или бессеточными методами, для древесины — ортотропные модели разрушения с дискретизацией волокнистой структуры, для мягких тканей и биологических материалов — гиперупругие модели с возможностью разрыва связей.

Для обработки осколков материалов и частиц, а также их взаимодействия между собой применяются физические движки, реализующие численное интегрирование уравнений движения систем твердых и мягких тел. Современные физические движки обеспечивают решение прямой и обратной задач динамики, коллизионное взаимодействие фрагментов произвольной формы, а также симуляцию вторичных эффектов в виде систем частиц. Ключевыми компонентами являются детектор коллизий, определяющий моменты и точки соприкосновения объектов, и решатели, вычисляющие результирующие скорости и импульсы после соударения. Интеграция специализированных алгоритмов разрушения с физическими движками позволяет создавать полномасштабные симуляции, где процесс фрагментации неразрывно связан с последующим динамическим поведением образовавшихся элементов.

## Литература

1. Müller M., Chentanez N., Kim T. Y. Real time dynamic fracture with volumetric approximate convex decompositions // ACM Transactions on Graphics (TOG). — 2013. — Vol. 32, № 4. — P. 1–10.
2. Terzopoulos D., Fleischer K. Modeling inelastic deformation: viscoelasticity, plasticity, fracture // Proceedings of the 15th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '88). — New York : Association for Computing Machinery, 1988. — P. 269–278.
3. Richter J. Procedural Destruction in Control: GDC Summer 2020 Talk [Электронный ресурс] // Game Developers Conference (GDC) Vault. — 2020. — Режим доступа: по ссылке (дата обращения: 13.04.2026).
4. Hughes R. T. Real-time fracturing in video games // Multimedia Tools and Applications. — 2023. — Vol. 82. — P. 4709–4734.
5. O'Brien J. F., Hodgins J. K. Graphical Modeling and Animation of Brittle Fracture [Электронный ресурс] // Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series (SIGGRAPH '99). — Los Angeles, 1999. — P. 137–146. — Режим доступа: <http://graphics.berkeley.edu/papers/Obrien-GMA-1999-08/Obrien-GMA-1999-08.pdf> (дата обращения: 13.04.2026).

## Literature

1. Müller M., Chentanez N., Kim T. Y. Real time dynamic fracture with volumetric approximate convex decompositions // ACM Transactions on Graphics (TOG). — 2013. — Vol. 32, № 4. — P. 1–10.
2. Terzopoulos D., Fleischer K. Modeling inelastic deformation: viscoelasticity, plasticity, fracture // Proceedings of the 15th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '88). — New York : Association for Computing Machinery, 1988. — P. 269–278.
3. Richter J. Procedural Destruction in Control: GDC Summer 2020 Talk [Electronic resource] // Game Developers Conference (GDC) Vault. — 2020. — Access mode: via link (accessed: 13.04.2026).

4. Hughes R. T. Real-time fracturing in video games // Multimedia Tools and Applications. — 2023. — Vol. 82. — P. 4709–4734.
5. O'Brien J. F., Hodgins J. K. Graphical Modeling and Animation of Brittle Fracture [Electronic resource] // Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series (SIGGRAPH '99). — P. 137–146. — <http://graphics.berkeley.edu/papers/Obrien-GMA-1999-08/Obrien-GMA-1999-08.pdf> — Access mode: via link (accessed: 13.04.2026).