

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ MODELING AND OPTIMIZATION

УДК 004.023, 004.925

DOI: 10.17587/it.27.227-234

А. Д. Обухов, канд. техн. наук, e-mail: Obuhov.art@gmail.com,
А. Е. Архипов, аспирант, e-mail: alexeiarh@gmail.com,
А. О. Сидорчук, бакалавр, e-mail: sidorchuk.a.o@yandex.ru,
Тамбовский государственный технический университет

Математическое моделирование и визуализация процессов горения в тренажерных комплексах*

Рассматривается задача моделирования и визуализации физических процессов горения в тренажерных комплексах. Предлагается математическая модель, позволяющая формализовать структуру виртуальных объектов горения, их свойства и процесс смены состояний от возгорания объекта до полного уничтожения или тушения. Разработаны диаграммы жизненных циклов и правила смены состояний объектов виртуальной реальности для организации процесса визуализации горения и тушения в виртуальной реальности.

Ключевые слова: компьютерная графика, 3D-моделирование, визуализация физических процессов, адаптивные тренажерные комплексы, формализация процесса горения, модель состояний виртуальных объектов, теория множеств, подготовка персонала

Введение

При организации подготовки персонала промышленных предприятий к деятельности в штатных и аварийных ситуациях одним из ключевых моментов обучения является отработка действий в случае пожара, возгорания, задымления. Реализовать в полной мере процесс пожаротушения, эвакуации, задымления на производстве затруднительно, так как часть операций невозможно осуществить на работающем предприятии, часть связана с риском для здоровья. Поэтому применение тренажерных комплексов на базе виртуальной реальности экономически оправдано в данной ситуации.

Однако решение задачи моделирования реалистичных пожаров, распространения огня и эффектов задымления связано с неизбежным ростом вычислительной нагрузки на оборудование. В случае виртуальной реальности это осложняется исходными высокими требованиями к вычислительной мощности для отрисовки трехмерной графики. Реалистичность и точность моделирования процесса горения очень важна, так как позволяет выработать правильные прак-

тические навыки у обучающихся, однако полностью моделировать физические процессы распространения пламени и сгорания материала, влияние воздушных потоков, герметичности и влажности бессмысленно: во-первых, это нецелесообразно относительно итогового результата, во-вторых, приведет к значительной потере производительности, в-третьих, значительно повысит стоимость тренажерного комплекса.

Поэтому актуальной задачей при разработке адаптивных тренажерных комплексов (АТК) является достоверная и качественная визуализация физических процессов, особенно процесс распространения пожара. Помимо непосредственно визуализации корректное компьютерное моделирование позволяет решать сопутствующие задачи, среди которых следует отметить определение времени эвакуации при пожарах и негативного воздействия на человека [1, 2], вопросы эффективной борьбы с лесными пожарами [3].

Однако моделировать процессы горения без соответствующего математического обеспечения с полной достоверностью невозможно. В статье [8], например, представлен метод моделирования и визуализации распространения дыма и пожаров, основанный на первоначальном решении уравнений течения газа и жидкости в двухмерной постановке. В статье [9] рассмотрены методы использования эмпирических данных о по-

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-013-00567 с использованием вычислительного оборудования ЦКП "Цифровое машиностроение".

жарах и результатах моделирования горения на основе уравнений газодинамики в тренажерах виртуальной реальности. В работе [10] подробно рассмотрены вопросы моделирования горения. Предложенный в данной статье метод основан на физическом моделировании очагов ламинарного и турбулентного горения. Полученные результаты позволяют моделировать распространение пожара от испаряемых горючих жидкостей и твердых горючих веществ.

Общим недостатком, присутствующим в большинстве работ, является необходимость решения дифференциальных уравнений математической модели горения или анализ большего объема эмпирических данных. Поэтому использование указанных методов при непосредственно программной реализации распространения пожаров в виртуальной реальности приводит к значительным затратам времени на расчеты и решение дифференциальных уравнений и, следовательно, к повышению стоимости тренажерного комплекса и снижению его производительности. Поэтому актуальной задачей является разработка математической модели, адаптированной для использования в средствах визуализации и обеспечивающей корректность расчетов процессов горения в АТК. Естественно, что подобная упрощенная модель будет содержать ряд допущений, однако в рамках поставленной задачи требуется лишь обеспечить визуальное соответствие моделируемых процессов горения реальным.

1. Постановка задачи исследования

Необходимо осуществить формализацию, моделирование и практическую реализацию процессов горения в виртуальной среде. К физическим процессам относятся: горение, тушение, задымление, изменение размеров и текстуры виртуальных объектов. Разработанный математический аппарат должен с достаточной точностью повторять реальные процессы распространения огня, а также обеспечивать приемлемый уровень быстродействия для его использования в системах виртуальной реальности. В данной предметной области быстродействие является определяющим фактором, так как технологии виртуальной реальности предъявляют особые требования к производительности системы. Помимо реализации математической модели необходимо разработать новые инструменты формализации жизненных циклов виртуальных объектов, позволяющие отобразить процессы изменения внешних и внутренних характеристик объектов.

2. Метод формализации физических процессов в виртуальной реальности на основе диаграмм жизненных циклов

На первом этапе решения поставленной задачи осуществлен выбор математического аппарата теории множеств для формализации физических процессов. Однако он позволяет сформулировать структуру и связи между виртуальными объектами, но не обеспечивает достаточной визуализации протекающих в виртуальной реальности процессов.

Поэтому для формализации жизненного цикла виртуальных объектов в процессе их возгорания, горения, тушения или полного уничтожения необходимо использовать графические представления. Обозначим их как диаграммы жизненного цикла. В предлагаемых диаграммах отображается жизненный цикл каждого виртуального объекта. На горизонтальной оси диаграммы отмечены пороговые значения объекта, а на вертикальной — последовательность событий (рис. 1).

Под пороговыми значениями понимается статус виртуального объекта по шкале от "возгорание невозможно" до "максимальное воспламенение". Тогда диаграммы жизненного цикла отражают смену пороговых значений объекта в рамках одного события в течение времени. Возникновение, окончание или смену какого-либо воздействия на объекты обозначим как событие. События отражены по горизонтальной оси и протекают в соответствии с указанным направлением. Переход по вертикали снизу вверх отражает смену событий.

Смена пороговых значений зависит от совокупности внешних воздействий, а также собственных свойств объекта. Рассмотрим перечень пороговых значений:

"-2" — возгорание абсолютно невозможно. Достигается при сильном воздействии на объект водой, пеной или иным веществом;

"-1" — граница между "мокрым" и "сухим" состоянием объекта;

"0" — нормальное состояние, к которому стремится объект при отсутствии различных воздействий. После полного разрушения (сгорания) объект также возвращается в данное состояние;

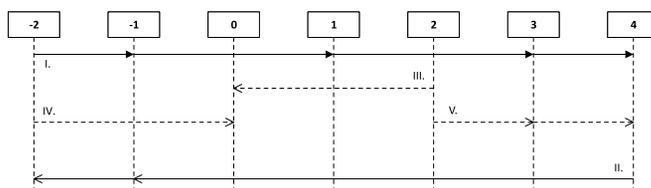


Рис. 1. Общий вид диаграммы жизненного цикла виртуального объекта

"1" — начальная стадия возгорания объекта. Осуществляется визуализация дымообразования, без открытого пламени и изменения цвета;

"2" — граница невозврата объекта к нормальному состоянию;

"3" — открытое пламя. Визуализация открытого пламени, дымообразования и изменения цвета объекта;

"4" — максимальная степень возгорания объекта. Параметры высоты языков пламени, дымообразования и температурного воздействия имеют максимальные значения.

Для некоторых объектов отдельные пороговые значения могут отсутствовать из-за типа материала или его свойств.

Вторая составляющая диаграммы жизненного цикла объекта — это правила смены состояний. На рис. 1 они обозначены римскими цифрами и отражают реальные физические процессы, протекающие в объектах при том или ином виде воздействия или же его отсутствии. Рассмотрим основные правила.

Первое правило описывает процесс смены состояний объекта при положительном для процесса горения внешнем воздействии (например, огонь). Необходимое условие: непрерывность воздействия. Прочность объекта начинает снижаться только после достижения состояния "2".

Второе правило отражает смену состояний объекта при отрицательном для процесса горения внешнем воздействии (например, вода). Условие: непрерывность. В процессе воздействия прочность объекта может постепенно снижаться, если ранее он горел (вплоть до момента достижения состояния "0").

Третье правило возвращает объект в нейтральное состояние "0". Условие: прекращение положительного воздействия в пределах пороговых значений от "0" до "2".

Четвертое правило возвращает объект в нейтральное состояние "0", но со стороны отрицательных пороговых значений, т. е. в процессе высыхания объекта после его тушения водой. Условие: прекращение отрицательного воздействия в пределах пороговых значений от "-2" до "-1".

Пятое правило отражает стремление объекта к воспламенению даже после прекращения положительного воздействия. Условие: прекращение положительного воздействия в пределах пороговых значений от "2" до "4".

Таким образом, можно условно выделить две группы воздействий: положительные для процесса горения (огонь, искры или высокая температура) и отрицательные (вода, пена, песок). Положительные воздействия влияют на развитие процесса горения, а отрицательные приводят к его прекращению.

Любой вид воздействия имеет различную силу в зависимости как от типа источника этого воздействия, так и материала объекта. К воздействиям также можно отнести некоторые параметры окружающей среды: объем виртуального помещения; циркуляция воздуха; электрическое оборудование и провода; доступность кислорода и герметичность; температура помещения; загазованность и задымленность; токсичность продуктов горения; влажность.

Таким образом, представленный подход к формализации процесса горения виртуальных объектов включает основные факторы, влияющие на состояние объектов, отражает их жизненный цикл в процессе горения и тушения, а также правила смены состояний.

3. Математическая модель изменения состояний виртуальных объектов

Далее на основе определенных выше понятий и метода формализации сформулируем математическую модель изменений состояний виртуальных объектов.

Обозначим O — множество объектов горения. Под каждым $o_i \in O$ понимается трехмерная модель реального объекта с присущими ему основными свойствами, влияющими непосредственно только на процесс горения. Рассмотрим основные параметры объектов горения и связанные с ними внешние сущности, представленные на схеме (рис. 2).

К основным параметрам объекта $o_i \in O$ можно отнести размер Z_i , массу W_i и тип материала M_i , из которого этот объект сделан, прочность объекта H_i . К дополнительным параметрам относятся: температура T_i , текущее пороговое значение состояния объекта S_i и скорость горения I_i . Тогда:

$$o_i = (Z_i, W_i, M_i, H_i, I_i, T_i, S_i). \quad (1)$$

Параметры объекта горения	Материалы	Параметры материалов
Материал Размер (ШхВхГ) Масса (кг) Прочность Скорость горения Температура Текущее пороговое значение	Бумага Картон Дерево Пластик Резина ГСМ	Тип материала Допустимые воздействия Базовая скорость горения Базовая прочность Температура самовоспламенения Токсичность материала Коэффициент дымообразования
Внешние воздействия	Пороговые значения	
Огонь Температура Искра Вода Порошок Песок Пена	-2: горение невозможно -1: прекращение горения 0: равновесное значение 1: появление дыма 2: порог до воспламенения 3: воспламенение 4: горение	

Рис 2. Основные сущности процесса горения

Прочность объекта H_i определяет время, в течение которого объект может выдержать негативное влияние огня, и зависит от размера, массы и типа материала объекта:

$$(Z_i, W_i, M_i) \rightarrow H_i. \quad (2)$$

Прочность объекта влияет на время от момента воспламенения объекта и до его полного сгорания, когда объект больше не может воспламениться.

Скорость горения I_i объекта в следующий момент времени $t + \Delta t$ определяется эмпирической функцией F_S , зависящей от следующих параметров: текущей скорости горения $I_i(t)$ и состояния объекта $S_i(t)$. Различные внешние воздействия могут увеличивать (при усилении пламени) или уменьшать (при тушении) ее значение:

$$I_i(t + \Delta t) = F_S(S_i(t), I_i(t), M_i). \quad (3)$$

Таким образом, на основе соотношения (3) можно определить прочность объекта следующим образом:

$$H_i(t + \Delta t) = H_i(t) - I_i(t)\Delta t, \quad (4)$$

где Δt — время горения.

Температура T_i объекта в момент времени $t + \Delta t$ определяется функцией F_T и зависит как от общей температуры окружения T_E , так и температуры j -х объектов, расположенных вблизи i -го объекта, в момент времени t :

$$T_i(t + \Delta t) = T_i(t) + F_T(T_E(t), \{T_j(t) \mid j \neq i\}). \quad (5)$$

Основной материал объекта M_i также имеет ряд характеристик, участвующих в процессе моделирования процесса горения:

- тип материала (бумага, картон, дерево, пластик, резина, горюче-смазочные жидкости) задает основные свойства объекта;
- допустимые воздействия определяют перечень возможных воздействий для данного материала;
- базовая скорость горения и базовая прочность являются коэффициентами при расчете скорости горения и прочности конкретного объекта;
- температура самовоспламенения задает границу самовозгорания объекта;
- токсичность материала при горении оказывает влияние на состояние дыхательной системы человека в случае отсутствия средств защиты.

Пороговые состояния объекта S_i сменяют друг друга непрерывно с некоторым шагом, таким образом, определить текущее состояние объекта в диапазоне между двумя пороговыми значениями можно по следующей формуле:

$$S_i(t + \Delta t) = S_i(t) + k\Delta t \frac{|T_i(t) - T_j(t)|}{T_i(t)}, \quad (6)$$

где k — коэффициент, определяющий направление и интенсивность изменения порогового значения объекта, принимает значения в интервале $\{-1; 1\}$. Для некоторых материалов (например, бензин) k стремится к значениям в интервале $\{-1000; 1000\}$ для того, чтобы проходить некоторые пороговые значения за максимально короткий промежуток времени; Δt — время изменения порогового состояния; T_i, T_j — температура объекта и внешней среды (воздействия) соответственно в момент времени t .

Помимо параметров виртуального объекта на процесс горения оказывают существенное влияние характеристики окружения P_E и множество воздействий S_E .

Характеристики виртуального окружения определяют объем помещения Q_E , параметры вентиляции V_E , электричества E_E , состояние герметизации H_E , количество кислорода O_E , задымленность S_E , токсичность X_E , температуру T_E и влажность M_E в помещении:

$$P_E = (Q_E, V_E, E_E, H_E, O_E, S_E, X_E, T_E, M_E). \quad (7)$$

Воздействия (события) $S_E = \{s_{e,j}\}$ направлены на изменение характеристик объектов и окружения виртуальной реальности при движении процесса горения либо в положительную сторону (горение, нагревание), либо в отрицательную (тушение, остывание). Воздействие включает следующие компоненты:

$$s_{e,j} = (\lambda_j, T_j^{se}, t_j), \quad (8)$$

где λ_j — коэффициент, определяющий интенсивность воздействия; T_j^{se} — температура воздействия; t_j — общее время воздействия, включающее временные интервалы $t_{j,k}$, соответствующие различным пороговым значениям наблюдаемого объекта.

Изменение температуры объекта зависит от следующих факторов:

- горение объекта

$$T_i(t + \Delta t) = T_i(t) + \lambda_j \frac{H_i(t)}{H_0} t_j (T_j^{se} - T_i(t)); \quad (9)$$

- тушение объекта

$$T_i(t + \Delta t) = T_i(t) - \lambda_j \frac{H_i(t)}{H_0} t_j (T_i(t) - T_j^{se}); \quad (10)$$

- влияние окружающей среды

$$T_i(t + \Delta t) = T_i(t) + \lambda_E t_E (T_i(t) - T_E(t)), \quad (11)$$

где λ_E — коэффициент, определяющий направление и интенсивность влияния окружающей

среды, зависящий от параметров окружения, принимает положительные значения, если объект холоднее окружения, и отрицательные — в противном случае; t_E — время влияния окружающей среды; $H_i(t)$ и H_0 — текущая и начальная прочность объекта соответственно.

По формулам (9)—(11) проводится расчет температуры на каждом временном интервале от одного порогового значения до другого.

Используя представленную выше математическую модель изменения состояний виртуальных объектов, диаграммы пороговых значений и правила смены состояний, можно осуществить формализацию процесса горения объектов виртуальной реальности.

4. Практическая реализация

В качестве примера рассмотрим упрощенный сценарий возгорания объекта из дерева в качестве основного материала и тушение его с помощью воды.

Для формализации процесса смены событий в рамках виртуальной реальности кроме диаграмм жизненного цикла виртуальных объектов предлагается использовать матричное представление, включающее все атрибуты объектов, окружающего пространства, источников огня и т. д. Складывая и вычитая соответствующие строки матриц, оценивая полученные значения атрибутов, формализуем смену состояний объектов в процессе горения и тушения.

Для лучшего понимания и сокращения объемов аналитических расчетов в рамках данной статьи введем следующее допущение: расчет температур ведется дискретно по каждому пороговому значению, а не непрерывно в каждый момент времени. При программной реализации математической модели данное допущение снимается. Второе допущение: в данной статье не приводятся расчеты по формуле (6), так как в программном обеспечении коэффициенты k задаются эмпирически для каждого перехода из одного порогового состояния в другое, и представлять данные расчетные формулы в рамках рассматриваемых примеров не имеет смысла. Третье допущение: для

сокращения объема расчетных формул примем следующую форму записи:

$$T = 100 \rightarrow T = 200 \equiv T = 100 \rightarrow 200. \quad (12)$$

Сценарий заключается в моделировании процесса возгорания объекта при периодическом воздействии открытым огнем с последующей ликвидацией возгорания.

Диаграмма на рис. 3 отображает жизненный цикл объекта в ходе первого сценария при возникновении события возгорания и последующего тушения. Длительность каждого порогового состояния в рамках события обозначена $t_{j,k}$.

Изначально наблюдаемый объект o находится в нейтральном пороговом состоянии "0". Состояние окружения P_E также условно нейтральное:

$$o + P_E = \begin{bmatrix} H = 5000 \\ S = 0 \\ T = 25 \\ I = 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_E = 0,02 \\ T_E = 25 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H = 5000 \\ S = 0 \\ T = 25 \\ I = 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

В записи (13) и далее знаки равенства внутри квадратных скобок носят условный характер и используются для наглядного отображения текущих значений переменных.

В определенный момент времени происходит событие $s_{e,I}$ — прямое воздействие открытого огня на наблюдаемый объект в течение $t_I = 5$ с до наступления события $s_{e,II}$. В течение времени воздействия объект достигает состояния "1" за 3 с, после чего начинается отображаться дым, и объект достигает промежуточного состояния "1.7" за 2 с:

$$o + s_{e,I} + P_E = \begin{bmatrix} H = 5000 \\ S = 0 \\ T = 25 \\ I = 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_I = 0,05 \\ T_I^{se} = 500 \\ t_I = 5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_E = 0,02 \\ T_E = 25 \\ t_E = 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H = 5000 \\ S = 1,7 \\ T = 120 \\ I = 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

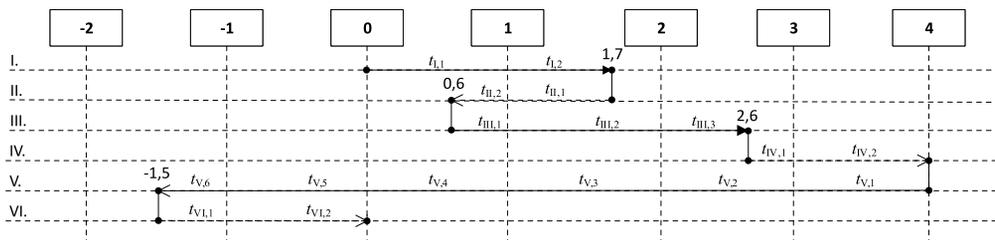


Рис. 3. Диаграмма жизненного цикла объекта по первому сценарию

$$t_I = \begin{cases} t_{I,1} = 3, S = 0 \rightarrow 1, \\ T = 25 \rightarrow 100, H = 5000; \\ t_{I,2} = 2, S = 1 \rightarrow 1,7, \\ T = 100 \rightarrow 137, H = 5000. \end{cases} \quad (15)$$

Отметим, что на этапе $t_{I,2}$ окружающая среда уже оказывает свое влияние из-за разницы температур между объектом и средой. После окончания воздействия согласно правилам переходных состояний объект из промежуточного состояния "1.7" будет стремиться к пороговому значению "0" под воздействием нейтральной окружающей среды. Таким образом, начинается событие $s_{e,II} = P_E$ — прекращение воздействия открытым пламенем на объект в течение $t_{II} = 30$ с (процесс остывания):

$$o + P_E = \begin{bmatrix} H = 5000 \\ S = 1,7 \\ T = 137 \\ I = 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_E = 0,02 \\ T_E = 25 \\ t_E = 30 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H = 5000 \\ S = 0,6 \\ T = 80 \\ I = 0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$t_{II} = \begin{cases} t_{II,1} = 16, S = 1,7 \rightarrow 1, \\ T = 137 \rightarrow 100, H = 5000 \rightarrow 5000; \\ t_{II,2} = 14, S = 1 \rightarrow 0,6, \\ T = 100 \rightarrow 80, H = 5000 \rightarrow 5000. \end{cases} \quad (17)$$

Следующее событие $s_{e,III}$ — возобновление воздействия открытого пламени, аналогично $s_{e,I}$, в течение $t_{III} = 14$ с:

$$o + s_{e,III} + P_E = \begin{bmatrix} H = 5000 \\ S = 0,6 \\ T = 80 \\ I = 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{III} = 0,05 \\ T_{III}^{se} = 500 \\ t_{III} = 14 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_E = 0,02 \\ T_E = 25 \\ t_E = 14 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H = 4737 \\ S = 2,6 \\ T = 310 \\ I = 25 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$t_{III} = \begin{cases} t_{III,1} = 1, S = 0,6 \rightarrow 1, \\ T = 80 \rightarrow 100, H = 5000 \rightarrow 5000; \\ t_{III,2} = 2,5, S = 1 \rightarrow 2, \\ T = 100 \rightarrow 150, H = 5000 \rightarrow 5000; \\ t_{III,3} = 10,5, S = 2 \rightarrow 2,6, \\ T = 150 \rightarrow 310, H = 5000 \rightarrow 4737,5. \end{cases} \quad (19)$$

Так как объект преодолел пороговое значение "2", то процесс горения становится необратимым даже без внешнего источника пламени (в этом случае считается, что объект сам становится источником пламени для самого

себя). Температура объекта также начинает влиять на температуру окружающей среды и степень его влияния на объект, что приведет к изменению значений следующих параметров внешней среды: $T_E = 40$, $\lambda_E = 0,01$. Это отражается в событии $s_{e,IV}$, протекающем в течение $t_{IV} = 20$ с:

$$o + s_{e,IV} + P_E = \begin{bmatrix} H = 4737 \\ S = 2,6 \\ T = 310 \\ I = 25 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{IV} = 0,05 \\ T_{IV}^{se} = 500 \\ t_{IV} = 20 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_E = 0,01 \\ T_E = 40 \\ t_E = 20 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H = 4400 \\ S = 4 \\ T = 390 \\ I = 50 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$t_{IV} = \begin{cases} t_{IV,1} = 11, S = 2,6 \rightarrow 3, \\ T = 310 \rightarrow 380, H = 4737,5 \rightarrow 4460; \\ t_{IV,2} = 9, S = 3 \rightarrow 4, T = 380 \rightarrow 390, \\ I = 25 \rightarrow 50, H = 4460 \rightarrow 4400. \end{cases} \quad (21)$$

Следующим происходит событие $s_{e,V}$ — воздействие человека в целях ликвидации возгорания с использованием воды в течение $t_V = 49$ с:

$$o + s_{e,V} + P_E = \begin{bmatrix} H = 4400 \\ S = 4 \\ T = 390 \\ I = 50 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_V = -0,05 \\ T_V^{se} = 10 \\ t_V = 49 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_E = 0,01 \\ T_E = 40 \\ t_E = 49 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H = 3420 \\ S = -1,5 \\ T = 70 \\ I = 0 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$t_V = \begin{cases} t_{V,1} = 6,5, S = 4 \rightarrow 3, T = 390 \rightarrow 300, \\ I = 50 \rightarrow 25, H = 4400 \rightarrow 4070; \\ t_{V,2} = 7, S = 3 \rightarrow 2, \\ T = 300 \rightarrow 230, H = 4070 \rightarrow 3890; \\ t_{V,3} = 10, S = 2 \rightarrow 1, \\ T = 230 \rightarrow 160, H = 3890 \rightarrow 3640; \\ t_{V,4} = 8,5, S = 1 \rightarrow 0, T = 160 \rightarrow 120, \\ I = 25 \rightarrow 0, H = 3640 \rightarrow 3420; \\ t_{V,5} = 9, S = 0 \rightarrow -1, \\ T = 120 \rightarrow 90, H = 3420; \\ t_{V,6} = 8, S = -1 \rightarrow 1, \\ T = 90 \rightarrow 70, H = 3420. \end{cases} \quad (23)$$

Изменение состояний объекта происходит вплоть до порогового значения "-1,5" за время t_V , когда горение объекта прекращается, и пов-

торное воспламенение без постороннего воздействия невозможно.

В точке "-1,5" прекращается подача воды и, соответственно, ее воздействие — наступает событие $s_{e, VI} = P_E$. По правилу стремления объекта в нейтральное состояние "0" после прекращения воздействия водой в течение времени $t_{VI} = 108$ с под воздействием только окружающей среды объект переходит в состояние "0", в котором и остается до наступления новых событий:

$$o + P_E = \begin{bmatrix} H = 3420 \\ S = -1,5 \\ T = 70 \\ I = 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_E = 0,01 \\ T_E = 40 \\ t_E = 108 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H = 3420 \\ S = 0 \\ T = 25 \\ I = 0 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

$$t_{II} = \begin{cases} t_{II,1} = 66, S = -1,5 \rightarrow -1, \\ T = 70 \rightarrow 50, H = 3420; \\ t_{II,2} = 62, S = -1 \rightarrow 0, \\ T = 50 \rightarrow 25, H = 3420. \end{cases} \quad (25)$$

Это вновь приведет к изменению значений следующих параметров внешней среды: $T_E = 30$, $\lambda_E = 0,02$.

Далее на основе представленной формализации осуществляется программная реализация на языке программирования C# в среде разработки Unity3d. Так как при разработке математической модели мы учитывали объектно-ориентированную парадигму, используемую в Unity3d, перенос структуры объектов и процессов горения в программный код осуществляется достаточно быстро и просто. Пример процесса горения по рассмотренному сценарию представлен на рис. 4.

Универсальность представленных подходов позволяет моделировать процессы горения объектов самых различных форм, материалов и размеров, а также вне зависимости от параметров помещения успешно осуществлять реалистичную визуализацию горения и тушения объектов.

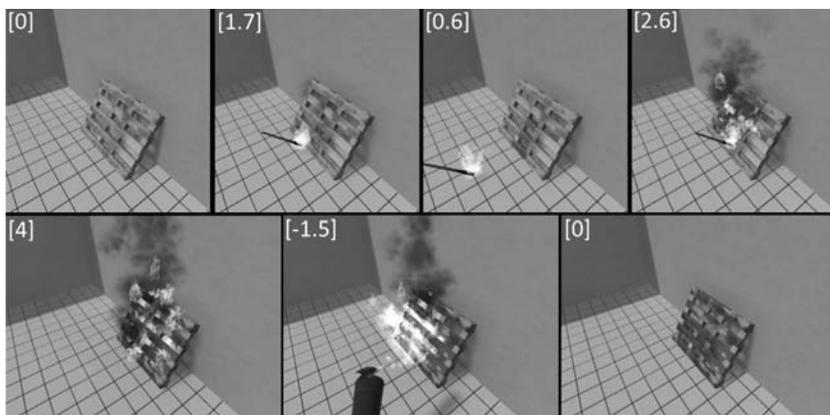


Рис 4. Программная реализация процесса горения

Заключение

В рамках данной статьи рассматривается важный аспект проектирования АТК — формализация физических процессов в виртуальном пространстве на примере горения объектов. Данный процесс достаточно исследован, однако существующие математические модели не адаптированы для использования в тренажерных комплексах, приводят к значительному повышению стоимости АТК и снижению производительности из-за сложности расчетов. Поэтому предлагается адаптированная математическая модель, позволяющая формализовать структуру объектов горения, основные их свойства и процессы смены состояний, начиная от возгорания объекта и заканчивая их полным уничтожением или тушением.

Кроме того, для решения задачи формализации процесса горения предлагаются оригинальные диаграммы жизненного цикла виртуальных объектов и система правил смены их состояний, позволяющие проследить весь жизненный цикл объектов и процедуру смены состояний. Закономерности смены состояний формализованы с помощью матричного представления свойств объектов. Данный подход отличается своей универсальностью и может использоваться для моделирования других физических процессов (задымления, затопления, замерзания, распространения токсичных газов и т.д.). Таким образом, проведенные научные исследования могут использоваться для формализации физических процессов в тренажерных комплексах для эргатических систем профессионального назначения.

Список литературы

1. **Kunkler K.** The role of medical simulation: an overview // Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg. 2006. Vol. 2, N. 3. P. 203—210.
2. **Manca D., Brambilla S., Colombo S.** Bridging between Virtual Reality and accident simulation for training of process-industry operators // Adv. Eng. Softw. Elsevier Ltd. 2013. Vol. 55. P. 1—9.
3. **Strayer D. L., Drews F. A.** Simulator training improves driver efficiency: Transfer from the simulator to the real world // Proceedings of the Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design. 2003. P. 190—193.
4. **Patle D. S., Ahmad Z., Rangaiah G. P.** Operator training simulators in the chemical industry: review, issues, and future directions // Rev. Chem. Eng. 2014. Vol. 30, N. 2. P. 199—216.
5. **Kuligowsky E. D., Peacock R. D.** A review of evacuation models. National Institute of Standards and Technology, U. S. Department of Commerce, Technical note., 2005.

6. **Rushmeier H. E., Hamins A., Choi M. Y.** Case Study: Volume Rendering of Pool Fire Data // *IEEE Comput. Graph. Applications*. 1994. Vol. 4, N. 15. P. 382–385.

7. **Schadschneider A.** et al. Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications // *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. New York, NY: Springer New York, 2009. P. 3142–3176.

8. **Krüger J., Westermann R.** GPU Simulation and Rendering of Volumetric Effects for Computer Games and Virtual Environments // *Comput. Graph. Forum*. 2005. Vol. 24, N. 3. P. 685–693.

9. **Cha M.** et al. A virtual reality based fire training simulator integrated with fire dynamics data // *Fire Saf. J.* Elsevier, 2012. Vol. 50. P. 12–24.

10. **Nguyen D. Q., Fedkiw R., Jensen H. W.** Physically based modeling and animation of fire // *ACM Trans. Graph.* 2002. Vol. 21, N. 3. P. 721–728.

11. **Krasnyanskiy M. N., Ostroukh A. V., Karpushkin S. V., Obukhov A. D.** Formulation of the Problem of Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2016. Vol. 12, N. 3. P. 2395–2409.

12. **Rosenkopf L., Tushman M. L.** The Coevolution of Community Networks and Technology: Lessons from the Flight Simulation Industry // *Ind. Corp. Chang.* 1998. Vol. 7, N. 2. P. 311–346.

A. D. Obukhov, Assistant Professor, e-mail: Obuhov.art@gmail.com,
A. E. Arkhipov, Postgraduate Student, e-mail: alexeiarkh@gmail.com,
A. O. Sidorchuk, Bachelor, e-mail: sidorchuk.a.o@yandex.ru,
 Tambov State Technical University, Tambov, 392000, Russian Federation

Mathematical Modeling and Visualization of Combustion Processes in the Training Facilities

An important task in the development of training complexes is the implementation of physical processes in virtual space using the example of burning objects. To solve it, an adapted mathematical model is proposed that allows one to formalize the structure of combustion objects, their main properties and processes of changing states, starting from the ignition of the object and ending with their complete destruction or extinguishing. Original diagrams of the life cycle of virtual objects and a system of rules for changing their states have been developed, which allow tracing the entire life cycle of objects and the procedure for changing states. Each state and transition between them are clearly formalized and calculated on the basis of the properties of the object and external influences. The patterns of state change are formalized using a matrix representation of object properties. This approach is distinguished by its versatility and can be used to model other physical processes (smoke, flooding, freezing, spread of toxic gases, etc.). The practical implementation of the combustion process using the apparatus of life cycle diagrams of virtual objects has been carried out. The developed method has been successfully integrated into the Unity development environment. Its use made it possible to reliably and efficiently implement the combustion process without losing performance, which is especially important for virtual reality systems.

Keywords: computer graphics, 3D modeling, visualization of physical processes, adaptive training complexes, formalization of the combustion process, model of states of virtual objects, set theory, personnel training

Acknowledgements: The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 19-013-00567 using the computing equipment of the Center for Collective Use Digital Engineering.

DOI: 10.17587/it.27.227-234

References

1. **Kunkler K.** The role of medical simulation: an overview, *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg.* 2006, vol. 2, no. 3, pp. 203–210.

2. **Manca D., Brambilla S., Colombo S.** Bridging between Virtual Reality and accident simulation for training of process-industry operators, *Adv. Eng. Softw. Elsevier Ltd*, 2013, vol. 55, pp. 1–9.

3. **Strayer D. L., Drews F. A.** Simulator training improves driver efficiency: Transfer from the simulator to the real world, *Proceedings of the Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design*, 2003, pp. 190–193.

4. **Patle D. S., Ahmad Z., Rangaiah G. P.** Operator training simulators in the chemical industry: review, issues, and future directions, *Rev. Chem. Eng.* 2014, vol. 30, no. 2, pp. 199–216.

5. **Kuligowsky E. D., Peacock R. D.** A review of evacuation models. National Institute of Standards and Technology, U. S. Department of Commerce, *Technical note*, 2005, p. 156.

6. **Rushmeier H. E., Hamins A., Choi M. Y.** Case Study: Volume Rendering of Pool Fire Data, *IEEE Comput. Graph. Applications*, 1994, vol. 4, no. 15, pp. 382–385.

7. **Schadschneider A., Klingsch W., Klöppel H., Kretz T., Rogsch C., Seyfried A.** Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications, *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, NY: Springer New York, 2009, pp. 3142–3176.

8. **Krüger J., Westermann R.** GPU Simulation and Rendering of Volumetric Effects for Computer Games and Virtual Environments, *Comput. Graph. Forum*, 2005, vol. 24, no. 3, pp. 685–693.

9. **Cha M. Han S., Lee J., Choi B.,** A virtual reality based fire training simulator integrated with fire dynamics data, *Fire Saf. J.* Elsevier, 2012, vol. 50, pp. 12–24.

10. **Nguyen D. Q., Fedkiw R., Jensen H. W.** Physically based modeling and animation of fire, *ACM Trans. Graph.* 2002, vol. 21, no. 3, pp. 721–728.

11. **Krasnyanskiy M. N., Ostroukh A. V., Karpushkin S. V., Obukhov A. D.** Formulation of the Problem of Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution, *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2016, vol. 12, no. 3, pp. 2395–2409.

12. **Rosenkopf L., Tushman M. L.** The Coevolution of Community Networks and Technology: Lessons from the Flight Simulation Industry, *Ind. Corp. Chang.* 1998, vol. 7, no. 2, pp. 311–346.