

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 519.713

Н.Г. КУШИК, А.С. ПОПОВ**, М.В. ТРИГУБ***,****, Н.В. ЕВТУШЕНКО**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГОРЕНИЯ
НА ОСНОВЕ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ¹

Кратко описывается разработанное авторами программное обеспечение для моделирования процесса высокотемпературного горения на основе клеточных автоматов; представленные результаты экспериментов демонстрируют адекватность использования такой модели.

Ключевые слова: клеточные автоматы, компьютерное моделирование, диффузия, распределение температуры, процесс горения, высокотемпературное горение.

Введение

Задача моделирования различных явлений реального мира была и остаётся актуальной, в частности, объектом пристального внимания в этой области является процесс высокотемпературного горения твёрдых тел [1]. Такой интерес обуславливается практическими приложениями, связанными с получением новых материалов и наноматериалов на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), в основу которого положено явление твердопламенного горения (ТПГ) [1]. Важным преимуществом компьютерного моделирования различных физических и химических процессов является возможность предсказать, какие внешние условия и параметры эксперимента приведут к желаемому результату, например к материалам с заданными свойствами. Компьютерное моделирование позволяет экономить дорогостоящие расходные материалы и время работы экспериментальных установок. Кроме того, при моделировании появляется возможность задавать достаточно простыми способами труднодостижимые параметры эксперимента, такие, как, например, экстремально высокие температуры.

В большинстве случаев задача моделирования высокотемпературного горения решалась с помощью методов и средств непрерывной математики, в частности дифференциально-интегральных уравнений в частных производных [2, 3]. Уравнения в частных производных и системы таких уравнений, а также другие модели непрерывной математики активно используются при моделировании физических явлений, однако при обращении к этому математическому аппарату возникают трудности при задании граничных условий, и, кроме того, при моделировании с использованием дифференциально-интегральных уравнений достаточно сложно провести визуализацию моделируемого процесса в реальном времени.

В данной работе при моделировании процесса высокотемпературного горения предлагается использовать модели дискретной математики, которые позволяют увеличить скорость моделирования и обладают высокой степенью визуализации. Одной из таких распространенных дискретных моделей являются однородные структуры, в частности клеточные автоматы (КА), которые достаточно хорошо зарекомендовали себя при моделировании различных физических, химических и других процессов [4]. Поскольку клеточный автомат в общем случае представляет собой n -мерную решётку, каждая ячейка которой находится в определённом состоянии, визуализация физических процессов оказывается достаточно простой в смысле реализации, однако в клеточно-автоматной модели за счет дискретизации теряется точность моделирования и появляется так называемый «автоматный шум». Тем не менее модель клеточного автомата активно используется при моделировании физических процессов, поскольку, с одной стороны, допускает различный уровень абстракции при моделировании (как правило, зависит от ресурсов, которыми располагает исследователь), а с другой – необходимую визуализацию моделируемого процесса в реальном времени. Адекватность использования такой модели для физического процесса обычно оценивается экспериментально. В настоящий момент авторам не известны примеры применения клеточных

¹ Работа выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

автоматов и других дискретных моделей при описании процесса высокотемпературного горения. Вместе с тем интуитивно данный процесс представляется возможным для дискретизации подобно другим физическим процессам [4]. Авторами разработано программное обеспечение (ПО) для моделирования физических процессов на основе клеточных автоматов. В данной работе представлены полученные авторами результаты по моделированию процесса высокотемпературного горения с использованием разработанного ПО.

1. Основные определения и обозначения

Горение представляет собой сложный физико-химический процесс превращения компонентов горючей смеси в продукты сгорания с выделением теплового излучения, света и лучистой энергии [5]. Одним из активно развивающихся направлений изучения процессов горения является ТПГ, под которым понимается автоволновой химический процесс в системе твердофазных реагентов (например, в смесях порошков), приводящий к образованию твердофазных промежуточных и конечных продуктов [3]. ТПГ представляет практический интерес, поскольку его продуктами могут быть тугоплавкие соединения (бориды, карбиды и др.); в частности, на основе ТПГ был создан новый метод получения тугоплавких соединений, а именно СВС.

Под клеточным автоматом понимается упорядоченная четвёрка $\langle Z^d, A, \tau^{(n)}, X \rangle$, где A – конечное непустое множество, называемое *алфавитом внутренних состояний* элементарных автоматов-компонент клеточного автомата, представляющее собой набор всех состояний, в которых может находиться каждый элементарный автомат. Компонента Z^d представляет собой множество всех d -мерных кортежей – целочисленных координат точек в евклидовом пространстве E^d , т.е. Z^d – это d -мерная целочисленная решётка (прямая, плоскость, объемное тело и др.), элементы которой служат для пространственной идентификации элементарных автоматов. В каждую ячейку Z^d помещен автомат Мура с набором внутренних состояний A . Автомат Мура представляет собой конечный автомат, выход которого в данный момент времени t зависит только от его внутреннего состояния и не зависит от значения входного символа. Состояние S_i элементарного клеточного автомата в момент времени $t > 0$ определяется его собственным состоянием в предыдущий момент времени и состояниями его соседей. Параметр X есть индекс (шаблон) соседства, который определяет соседние автоматы, состояния которых будут влиять на следующее состояние данного единичного автомата в следующий момент времени. Он представляет собой упорядоченный кортеж из k элементов из Z^d . Простейшим примером индекса соседства может служить двумерный КА, решётка которого выглядит как участок клеточной бумаги, в каждой клетке которого расположены идентичные автоматы Мура. Состояние всей однородной среды в текущий момент времени называется *конфигурацией* (КФ) данного КА и представляет собой набор текущих состояний всех составляющих его элементарных автоматов. Функционирование КА осуществляется в дискретной шкале времени $t = 0, 1, \dots$ и определяется *локальной функцией перехода* (ЛПФ), которая задаёт состояние каждого единичного автомата в момент времени t на основе состояний автоматов соседних по шаблону соседства в момент времени $(t - 1)$. Одновременное применение ЛПФ к текущей конфигурации шаблона соседства для каждого единичного автомата КА определяет *глобальную функцию перехода*, которая задаёт правило нахождения последующей конфигурации КА по заданной текущей конфигурации.

Здесь и далее мы рассматриваем двумерные клеточные автоматы, используемые при моделировании процесса высокотемпературного горения.

2. Моделирование процесса высокотемпературного горения с использованием клеточных автоматов

Тремя ключевыми процессами, которые протекают при ТПГ, являются теплообмен, диффузия вещества и химическое взаимодействие реагентов с выделением тепла и образованием продуктов реакции (горение). Далее мы кратко описываем, каким образом каждый из этих процессов можно промоделировать на основе клеточных автоматов.

Теплообмен

При моделировании высокотемпературного горения в данной работе рассматривается синхронный режим функционирования КА, моделирующего процесс теплопереноса. Состояние каждой ячейки решётки представляет её температуру в данный момент времени. Решётка в этом слу-

чае является замкнутой и представляет собой плоское кольцо. Локальная функция перехода использует шаблон соседства фон Неймана (четыре ближайших соседа на двумерной плоскости) [6]

и представляется уравнением
$$T_{i,j}^{t+1} = \frac{T_{i-1,j}^t + T_{i+1,j}^t + T_{i,j}^t + T_{i,j-1}^t + T_{i,j+1}^t}{5}$$
. Отметим в данном случае не-

обходимость использования множества действительных (а не целых) чисел для задания состояний единичного автомата. В функции перехода КА задействована процедура деления, применение которой к целым числам как взятия целой части может дать постоянное снижение средней температуры, что не соответствует реальному состоянию дел при теплопереносе, поскольку средняя температура должна оставаться неизменной из-за замкнутости системы.

Д и ф ф у з и я

Под *диффузией* понимается процесс перемешивания двух веществ, приводящий к самопроизвольному выравниванию их концентраций по всему занимаемому объёму (концентрационная диффузия). При этом перенос вещества происходит из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией. Классические КА-модели диффузии имеют булев алфавит состояний и эволюцию в виде последовательности булевых массивов. Состояния клеток (0 или 1) определяют наличие или отсутствие единицы массы. Клеточно-автоматная диффузия на прямоугольных сетках достаточно хорошо изучена, и существует различные модели для ее описания. Одной из таких моделей является *наивная диффузия* [6]. Эта модель диффузии является достаточно примитивной; она непосредственным образом отображает представление о процессе диффузии как блуждании частиц в стремлении выровнять концентрацию вещества в пространстве. *Окрестностью* клетки являются её четыре ближайших соседа. Правило функционирования задается следующим образом: на каждой итерации выбирается случайная ячейка, которая равновероятно меняется своим значением с одним из своих соседей.

Г о р е н и е

Проектируемая в работе клеточно-автоматная модель горения описывается следующим образом [7]. Кубик-клетка начинает «гореть», если она соседствует с клеткой в состоянии «фронт горения». По истечении определённого промежутка времени клетка сгорает. Время сгорания клетки линейно зависит от скорости горения её вещества и от количества окружающих её клеток, находящихся в состоянии «фронт горения», при этом в расчёт принимаются четыре ближайшие клетки.

Конечный КА, моделирующий твердопламенное горение, имеет решетку, каждая клетка которой представлена двумя числами, отображающими количество вещества в клетке и его температуру. КА функционирует следующим образом. Сначала используется функция перехода, рассчитывающая температурное распределение ячеек. Далее используется функция перехода «наивной» диффузии со следующим изменением: диффундировать будут те и только те клетки, которые имеют температуру больше константы $T_{\text{диф}}$, которая представляет собой температуру активации диффузии. После диффузии выполняется шаг моделирования горения. «Гореть» будут те и только те ячейки, которые имеют достаточную температуру $T_{\text{гор}}$ и находятся в соседстве с клетками с противоположным веществом, необходимым для протекания реакции. Следующее состояние клетки вычисляется по правилу: от текущего состояния клетки отнимается число граничащих клеток с противоположным веществом клеток, умноженное на коэффициент q (данный коэффициент различен для двух веществ, представленных в модели). Затем температура клетки повышается на число, равное количеству соседних клеток с противоположным веществом, умноженному на коэффициент k , который также зависит от конкретного вещества. На этом одна итерация заканчивается. Клетка, состояние которой становится меньшим или равным нулю, «сгорает», далее она не участвует в горении, но продолжает участвовать в следующей итерации при распределении температуры и диффузии.

3. ПО для моделирования физических процессов на основе клеточных автоматов

Как уже отмечалось, в разработанном ПО для моделирования физических процессов количество измерений для N -мерной решётки КА выбрано равным двум, иными словами, рассматривается двумерное моделирование на плоскости. Этот факт, в частности, обуславливается тем, что большинство современных КА-моделей разработаны для двумерной решётки [4], и, более того, в литературе отмечается, что такие двумерные модели могут достаточно адекватно описывать фи-

зические явления [8]. ПО для моделирования физических процессов реализовано на языке программирования высокого уровня C++ [9]. Двумерная решётка в данном случае представляется соответствующим двумерным массивом, т.е. матрицей, элементами которой выступают состояния элементарных автоматов КА в заданный дискретный отрезок времени. Отметим, что КА может быть иерархической структурой, и функция перехода КА может быть композицией некоторых простых функций переходов элементарных автоматов, что, в частности, используется при моделировании высокотемпературного горения.

Поскольку решетка двумерного КА представляется двумерным массивом, функция перехода КА в описываемом пакете принимает на вход текущую конфигурацию и вычисляет следующую конфигурацию за счет изменения значения каждой клетки соответствующей матрицы. В общем случае различные функции перехода могут иметь различные шаблоны соседства. Функции перехода могут быть двух типов: синхронные, когда значения состояний всех единичных автоматов изменяются одновременно при смене конфигурации, и асинхронные, когда состояния единичных автоматов изменяются последовательно, причем, как правило, очередной единичный автомат выбирается случайно [8]. ПО для моделирования физических процессов «учитывает» оба режима работы КА. Синхронный режим работы КА реализован в пакете при помощи двух массивов, представляющих решётку КА в различные отрезки времени, M_t и M_{t+1} , $t \geq 0$. При этом следующие состояния элементарных автоматов фиксируются в массиве M_{t+1} и вычисляются по данным, записанным в массив M_t , с учетом соответствующего шаблона соседства. Отметим, что при работе КА в асинхронном режиме используется только один массив M_t .

Одним из явных достоинств КА при моделировании физических процессов является простота визуализации полученных результатов, соответственно пакет программ по моделированию на основе клеточных автоматов должен поддерживать необходимый интерфейс. Для создания такого графического интерфейса в данной работе используется библиотека Qt [10], основным достоинством которой является ее кросс-платформенность, а именно программное обеспечение, созданное с использованием Qt, может работать практически под всеми современными операционными системами. В данной среде был реализован класс *CellularAutomaton*, включающий, в качестве член-данных, размер решётки КА, номер текущей итерации (конфигурации перенумерованы натуральными числами) и два двумерных массива M_t и M_{t+1} для представления текущей конфигурации.

Основные модули ПО

- 1) *модуль моделирования диффузии* (программная реализация «наивной» диффузии);
- 2) *модуль моделирования распределения температуры в веществе* (на основе КА из [11]);
- 3) *модуль моделирования распространения автоволн* (реакция Белоусова – Жабатинского [12]);
- 4) *Модуль моделирования горения вещества* (на основе КА из п. 2).

Графический интерфейс всех модулей пакета программ является однотипным, и в качестве

примера на рис. 1 приведена работа модуля моделирования диффузии (конфигурация № 111).

При работе ПО на экране отображаются: счётчик итераций КА, кнопка Stop, совершающая остановку работы текущего модуля, кнопка Run, запускающая работу модуля, кнопка Init, предназначенная для задания начальной конфигурации КА, кнопка OneStep, совершающая одну итерацию КА, и область визуального вывода текущей конфигурации КА. Несмотря на очевидную простоту, интерфейс оказывается удобным при моделировании различных физических процессов, в частности с использованием рассмотренного пакета был промоделирован процесс СВС.

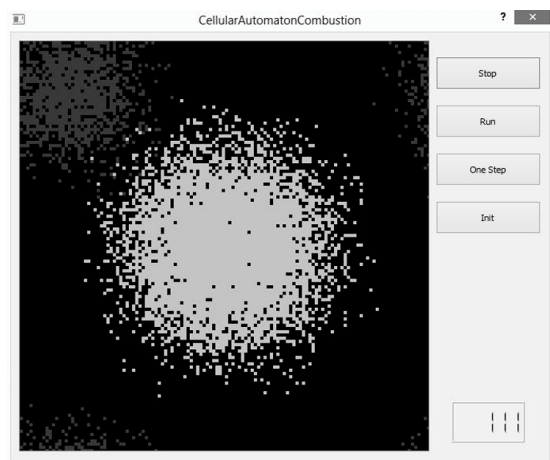


Рис. 1. Интерфейс одного из модулей пакета

4. Экспериментальные результаты

Кратко приводятся результаты экспериментов по оценке адекватности разработанной модели процесса высокотемпературного горения, в частности представлены эксперименты двух типов:

1) экспериментальные результаты по визуальному сравнению формы фронта горения с изображениями, полученными в физических экспериментах с использованием лазерного монитора, и 2) результаты экспериментов, направленные на проверку качественных свойств модели и их сравнение с известными свойствами твердопламенного горения.

Визуальное сопоставление результатов моделирования и фрагментов, отражающих динамику процесса высокотемпературного горения

Для оценки адекватности построенной КА-модели можно использовать визуальное качественное сопоставление реального процесса и результатов моделирования. Однако проведение диагностики высокотемпературных процессов непосредственно во время горения затруднено из-за присутствия экранирующего свечения эрозионного факела, возникающего над поверхностью, и собственного излучения нагретой до высокой температуры поверхности материала. Этот факт препятствует применению для исследования зоны горения в реальном масштабе времени прямых и высокоинформативных методов распознавания нелинейных оптических образов с помощью скоростных методов регистрации видеоизображений, которые представляют наибольший интерес в аспекте изучения физических механизмов СВС.

В работе [13] описан метод, позволяющий проводить визуализацию объектов, экранированных фоновой засветкой, который был выбран в качестве основного метода диагностики СВС. Он основан на использовании активных оптических систем (АОС) с усилителями яркости изображений на парах металлов [14]. Дальнейшее совершенствование таких систем привело к разработке *лазерного монитора с покадровой регистрацией изображения* [15]. Покадровая регистрация предполагает формирование кадра видеоряда лишь одним импульсом сверхизлучения усилителя яркости, длительность которого равна ~ 40 нс. Лазерный монитор (рис. 2) выполнен с использованием усилителя яркости на парах бромида меди. С помощью схемы синхронизации, управляющей высокоскоростной камерой, обеспечивается покадровый режим. Принцип формирования изображения в АОС следующий: сверхизлучение усилителя яркости попадает на объект наблюдения, часть излучения, отразившись, поступает обратно в усилитель. Вместе с тем в усилитель попадает и сигнал от засветки, но из-за высокой спектральной яркости сред на парах металлов усиление происходит лишь в спектральном диапазоне излучения активного элемента, что составляет 2 нм для меди, в то время как современные оптические фильтры имеют полосу пропускания 1 нм и более. Именно этот факт делает лазерные мониторы наиболее привлекательными для диагностики процессов в режиме реального времени.

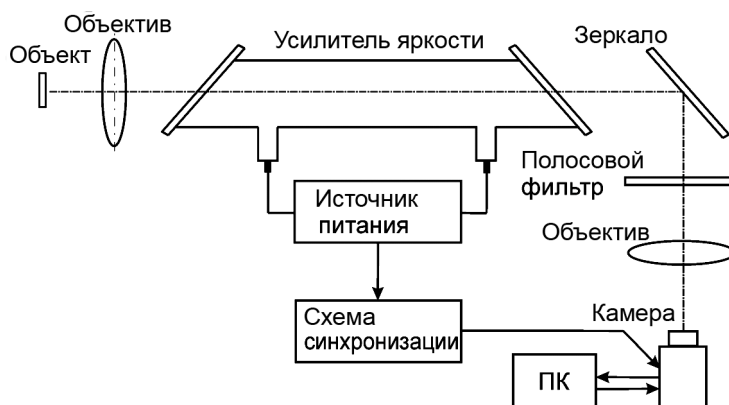


Рис. 2. Схема лазерного монитора с покадровой регистрацией изображения

При проведении компьютерных экспериментов по оценке адекватности модели были исследованы данные, полученные с использованием описанной выше технологии. Соответственно был рассмотрен ряд изображений, полученных на экране с использованием лазерного монитора, и эти изображения явились в данном случае экспериментальной выборкой. На рис. 3 представлена эволюция КА, моделирующего процесс высокотемпературного горения с характеристиками $q_A = 5$, $q_B = 7$, $T_{\text{диф}} = 300$, $T_{\text{диф}} = 500$, $k = 15$.

На рис. 4 приведены результаты съёмки горения СВС-структуры (фильтро-смесь (саянская)), полученные с помощью высокоскоростной камеры и лазерного усилителя яркости.

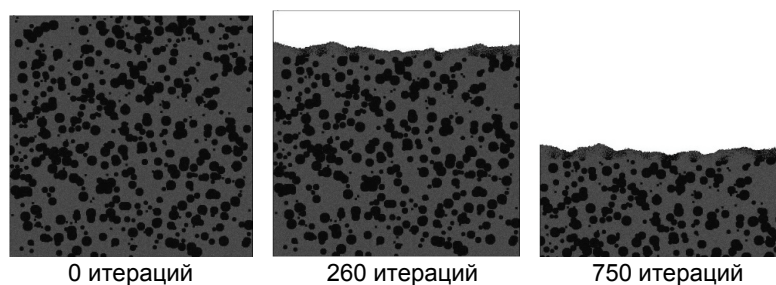


Рис. 3. КА, моделирующий высокотемпературное горение

Результаты моделирования и видеосъемки процесса высокотемпературного горения имеют схожие тенденции, в частности характерную сложную изрезанную форму фронта горения, которая с большими трудностями может быть промоделирована дифференциально-интегральными уравнениями. Данная изрезанная форма фронта горения прослеживается на обоих рисунках: на рис. 3 она представлена границей наличия и отсутствия клеток, наделенных некоторым (не белым) цветом. На рис. 4 эта граница прослеживается аналогичным образом уже при прохождении времени, равного 120 мс, заметно существенное различие в плотности расположения частиц в нижней и верхней частях рисунка. Тем не менее имеется и ряд расхождений с динамикой процесса. Это свя-

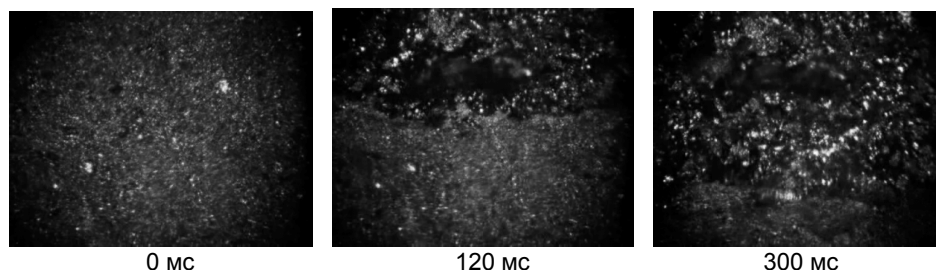


Рис. 4. Протекание высокотемпературного горения на примере СВС-структуры

зано, в частности, с наличием собственного шума усилителя яркости – спонтанного излучения. Устранение шума техническими средствами невозможно из-за особенностей работы активной среды; его устранение видится возможным с привлечением математической обработки полученных изображений. Для более точного совпадения результатов визуального сравнения необходима также доработка рассматриваемой КА-модели, например рассмотрение большего количества элементарных автоматов. Помимо визуального сравнения были проведены эксперименты по проверке качественных характеристик КА-модели процесса горения.

Проверка качественных характеристик КА-модели

Приводятся результаты компьютерных экспериментов, направленных на проверку статических характеристик процесса высокотемпературного горения. В частности, рассмотрено свойство «торможения» реакции горения и свойство самоподдерживания этой реакции.

При проведении эксперимента по проверке «торможения» реакции горения верифицировалось свойство твердопламенного горения, заключающееся в замедлении реакции из-за образования продуктов горения, мешающих реагентам вступить в химическое взаимодействие [3]. На рис. 5 представлена эволюция соответствующего КА.

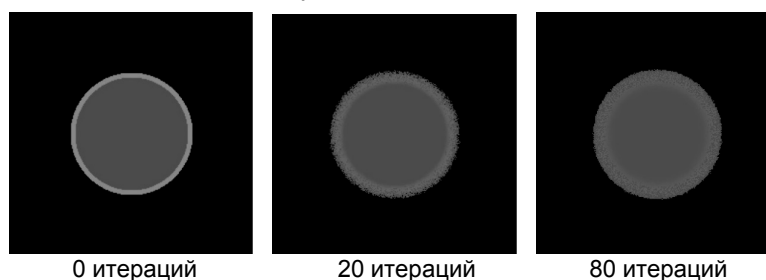


Рис. 5. Эволюция КА, моделирующего высокотемпературное горение

Черным цветом на рис. 5 представлено вещество A , а серым – вещество B , границная область, отмеченная светло-серым цветом, отвечает повышенной температуре вещества B . После прохождения 20 итераций область повышенной температуры замещается отображением продуктов горения смеси. Утолщающийся слой продуктов реакции постепенно отделяет два вещества друг от друга, и реакция затухает со временем. На рис. 6 изображён график зависимости числа сгоревших клеток от номера итерации. Из графика видно, что реакция начинается достаточно бурно, далее она теряет свою интенсивность и через некоторое время совсем останавливается. Полученная зависимость полностью соответствует свойству высокотемпературного горения «мешать самому себе» или «тормозиться» из-за невозможности реагентов вступить в химическую реакцию.

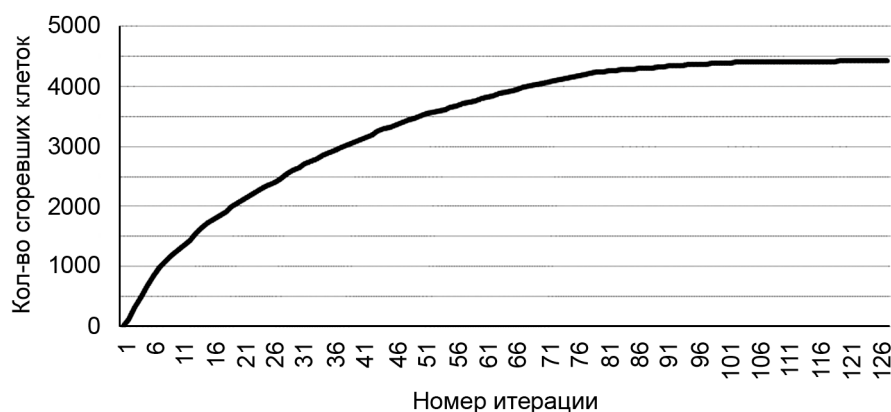


Рис. 6. Зависимость числа сгоревших клеток от номера итерации

Следующий эксперимент был проведен с целью проверки свойства самораспространения и самоподдерживания для разработанной КА-модели процесса высокотемпературного горения. В процессе эксперимента проверялось, может ли клеточный автомат продолжать менять конфигурации и самостоятельно поддерживать себя за счёт повышения температуры на шаге сгорания. На рис. 7 приведена динамика развития такого КА в описываемых экспериментальных условиях. В качестве начальной конфигурации был задан круг, имитирующий вещество B , помещённый в квадрат, соответствующий веществу A . Параметрам КА, моделирующим ТПГ, были присвоены следующие значения: $T_{\text{диф}} = 800$, $T_{\text{гор}} = 200$, $q_A = 5$, $q_B = 7$, $k = 25$. При таких значениях параметров модели реакция успешно иницируется и имеет возможность активного протекания. Номера конфигураций обозначены на рисунках белым цветом.

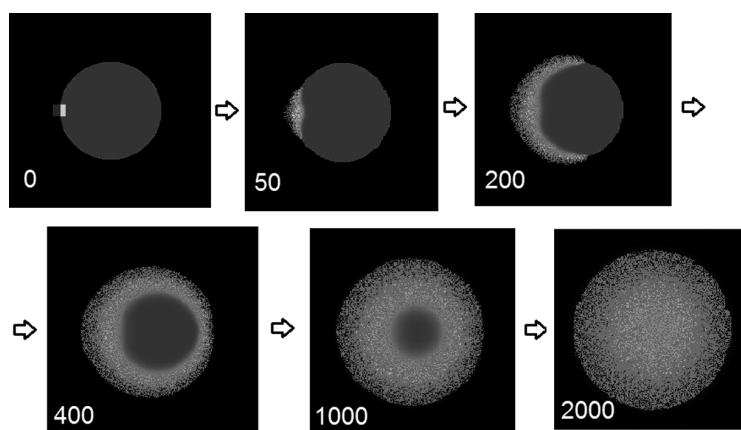


Рис. 7. Эволюция КА, моделирующего высокотемпературное горение при точечном иницировании системы на границе раздела веществ

Из рис. 7 видно, что реакция, будучи иницирована в одной точке, начинает протекать вдоль границы раздела веществ, и выделяемое при этом тепло поддерживает дальнейшее «сгорание» клеток. Этот факт подтверждает самоподдерживающееся и самораспространяющееся свойство КА-модели, что соответствует одному из наиболее важных свойств высокотемпературного горения.

ния. Таким образом, из результатов компьютерных экспериментов следует адекватность предложенной КА-модели высокотемпературного горения.

Заключение

В работе представлена клеточно-автоматная модель высокотемпературного горения твердого тела, в которой учитываются основные процессы, происходящие при протекании данного процесса (теплообмен, диффузия и «сгорание» вещества). Приведены результаты экспериментов, подтверждающие адекватность предложенной модели, т.е. возможность адекватного подбора автоматных функций переходов. Предварительные эксперименты показывают возможность расширения клеточно-автоматной модели для оценки образования наноматериалов в результате высокотемпературного горения. Соответствующая модификация предложенной модели является предметом дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев А.Е., Мержанов А.Г. // Успехи химии. – 2004. – Т. 73. – № 2. – С. 157–170.
2. Писклов А.В. Моделирование высокотемпературного синтеза слоевых безгазовых композиций: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2009. – 22 с.
3. Мержанов А.Г., Мукасян А.С. Твердопламенное горение. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007. – 366 с.
4. Бандман О.Л. // Системная информатика. – 2005. – Вып. 10. – С. 57–133.
5. Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. – М.: Наука, 1973. – 415 с.
6. Тоффоли Т., Марголус Н. Машины клеточных автоматов. – М.: Мир, 1991. – 280 с.
7. Глотов О.Г. // ФГВ. – 2010. – Т. 46. – № 6. – С. 130–134.
8. Аладьев В.З. Классические однородные структуры. Клеточные автоматы. – Fultus Books, 2009. – 535 с.
9. Stroustrup B. The C++ Programming Language. – Addison-Wesley Pub Co, 2000. – 911 p.
10. Qt project // URL: <http://www.qt.digia.com> (дата обращения 20.05.2013).
11. Жихаревич В.В., Остапов С.Э. // Компьютинг. – 2009. – Т. 8. – Вып. 3. – С. 61–71.
12. Five Cellular Automata // hermetica.ch: Hermetic System Software. URL: <http://www.hermetic.ch/pca/bz.htm> (дата обращения 20.05.2013).
13. Buzhinsky R.O., Savransky V.V., Zemskov K.I., et al. // Appl. Phys. – 2009. – No. 3. – P. 96–98.
14. Пасманик Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. и др. Оптические системы с усилителями яркости. – Горький: ИПФ АН СССР, 1988. – 173 с.
15. Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., et al. // Rev. Sci. Instrum. – 2014. – V. 85. – P. 033111-1–033111-5.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия Поступила в редакцию 05.03.14.

**Mirball Studio – студия компьютерной графики, г. Томск, Россия

***Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

****Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

E-mail: ngkushik@gmail.com; modenamo@gmail.com; trigub@tpu.ru; yevtushenko@sibmail.com

Кушик Наталья Геннадьевна, к.ф.-м.н., доцент;

Попов Александр Сергеевич, программист-разработчик Mirball Studio;

Тригуб Максим Викторович, к.т.н., ассистент ТПУ, науч. сотр. ИОА СО РАН;

Евтушенко Нина Владимировна, д.т.н., зав. лабораторией.