

*Запропоновано математичні та комп'ютерні моделі клітинних автоматів, здібних моделювати мікроскопічні процеси горіння, що дозволило звести обчислювальні методи моделювання макроскопічних процесів горіння до взаємодії між мікроскопічними процесами горіння*

*Ключові слова: клітинний автомат, процес, горіння*

*Предложены математические и компьютерные модели клеточных автоматов, способные моделировать микроскопические процессы горения, что позволило свести вычислительные методы моделирования макроскопических процессов горения к взаимодействию между микроскопическими процессами горения*

*Ключевые слова: клеточный автомат, процесс, горение*

*In this article the mathematical and computing models of cellular automaton have been offered. They are capable to simulate microscopic processes of burning. It has allowed presenting computing methods of modeling of macroscopic processes of burning as interaction of microscopic processes*

*Keywords: cellular automaton, process, burning*

УДК 681.3:656.2..006

# КЛЕТОЧНЫЕ АВТОМАТЫ – ОСНОВА ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА

И. Г. Филиппенко

Доктор технических наук, профессор\*

А. В. Головко

Аспирант\*

\*Кафедра «Вычислительная техника и системы управления»

Украинская Государственная Академия железнодорожного транспорта

пл. Фейербаха, 7, г. Харьков, Украина, 61050

Контактный тел.: 730-10-40

## 1. Введение

В 60-70-х годах прошлого столетия были проведены широкие научные исследования по разработке классификации лесных пожаров, в частности Курбатским Н. П. в [1]. В работе [2] Мелеховым И.С. исследованы горючие свойства лесных материалов. Влияние погодных условий на процесс горения описаны Валендиком Э. Н. в [3]. По результатам этих и других научных трудов были разработаны рекомендации по обнаружению и тушению лесных пожаров [19]. С появлением вычислительной техники начались попытки ее использования для сбора, хранения информации о лесных фондах и пожарах, а также прогнозирования развития пожара [5].

Анализ последних исследований и публикаций. Ряд работ Ходакова В.Е., Граб М.В. [6, 7, 8] посвящены классификации ситуаций и моделированию процессов динамики окружающей среды в задачах управления ликвидацией лесного пожара, основанных на агрегатно-ориентированном подходе.

Сама по себе проблема описания распространения огня очень сложна. В литературе она представляется, как совокупность разнообразных физико-химических процессов. Многие авторы рассматривают эти процессы по отдельности. Например, естественная конвекция при тепло и массообмене в газовой среде и на границе сред подробно рассмотрена в работе [9].

В работе представлены уравнения движения газов и жидкостей, состояния среды в достаточно общем виде. Для некоторых частных случаев приведены данные, дающие возможность получить численный результат.

Данные, позволяющие провести практические вычисления температуры среды, скорости выгорания горючих материалов, количество выделяемого тепла при горении, приведены в [10]. К сожалению, данные, позволяющие провести практические вычисления параметров процесса горения, приведены в микроскопическом масштабе, рассчитанные на граммы топливной массы и квадратные сантиметры ее объема, что далеко от макроскопического масштаба процесса распространения пожара в лесу.

Определяющее влияние на динамику распространения пожара оказывает среда, в которой этот пожар распространяется. Описанию различных ландшафтов, их определяющих параметров, особенностей сезонных изменений климата посвящена работа [12].

В монографии [11] получена общая математическая модель лесных пожаров, в рамках которой лес и продукты горения представляются пористо-дисперсной реакционноспособной средой. Главным недостатком, как и в работе [10], является микроскопическая масштабность полученных математических моделей процесса распространения пожара, описанных в виде систем дифференциальных уравнений в частных производных. Построить на такой базе макромоделю про-

цесса распространения пожара в лесу представляется мало возможным. Естественно возникает вопрос. А нельзя ли построить модель процесса распространения пожара в лесу, которая явным образом сводит макроскопические процессы горения к точно определенным микроскопическим процессам? На помощи в решении этой задачи приходят работы в области теории и практики клеточных автоматов [13, 14, 15, 16, 17]. В [13] вначале вводятся основные понятия, некоторые исторические сведения и описывается машина клеточных автоматов. Далее описываются различные классы правил, окрестностей соседствующих клеточных автоматов и особенности динамики клеточных конфигураций. Приведено развитие клеточных структур и зависимости динамики конфигураций от пространственных и временных фаз жизни клеточного автомата. Приведены модели физических процессов в газах и твердых телах. Работа [14] знакомит с новой методологией проектирования компьютерных элементов с памятью, которая основывается на представлении их "прозрачными" F-автоматами, отличимыми от автоматов Мили и Мура. В [15 - 16] рассматриваются методы вычисления Изинговых динамик на базе клеточных автоматов с использованием метода Монте – Карло. В [17] введено понятие "обобщенных координат" для решеток клеточных автоматов, и обоснованы преимущества использования обобщенных координат для многомерных решеток клеточных автоматов. В работе [18] предложено компьютерное моделирование процесса распространения пожара на плоскости. Для разработки компьютерного моделирования процесса распространения пожара в трехмерном пространстве, предложенные клеточные автоматы, описывающие микроскопические процессы горения на плоскости, не пригодны для их использования при построении объемных макроскопических процессов горения. В связи с этим формулируется следующая задача.

## 2. Постановка задачи

Необходимо разработать математические и компьютерные модели клеточных автоматов, способных моделировать микроскопические процессы горения. Модели клеточных автоматов в дальнейшем послужат базой, позволяющей свести макроскопические процессы распространения пожара в трехмерном пространстве к точно определенному взаимодействию микроскопических процессов.

## 3. Условные обозначения

КАПП – клеточный автомат процесса распространения пожара.

ЛГМ – лесные горючие материалы.

СКА – сети клеточных автоматов.

T – температура в нулевом слое

w – влагосодержание в нулевом слое.

T<sub>v</sub> – температура в объеме.

ρ<sub>1</sub> Md1 – массовая часть сухого ЛГМ в объеме.

ρ<sub>2</sub> Md2 – массовая часть влаги в объеме.

ρ<sub>3</sub> Md3 – массовая часть коксика.

ρ<sub>4</sub> Md4 – массовая часть золы.

ρ<sub>5</sub> Md5 – массовая часть сажи в объеме.

ρ<sub>6</sub> Md6 – массовая часть золы в объеме.

ρ<sub>7</sub> Md7 – массовая часть горючих газообразных продуктов пиролиза в объеме.

ρ<sub>8</sub> Md8 – массовая часть кислорода воздуха в объеме.

ρ<sub>9</sub> Md9 – массовая часть углекислого газа в объеме.

ρ<sub>10</sub> Md10 – массовая часть водяного пара в объеме.

ρ<sub>11</sub> Md11 – массовая часть инертных газов воздуха в объеме.

## 4. Изложение основного материала исследования

Физическая природа процесса распространения пожара. Горение может возникнуть тогда, когда температура топлива достигла температуры воспламенения. Для этого необходимо чтобы влагосодержание топлива было ниже определенного предела. Иначе энергия горящего топлива уйдет на испарение влаги и температура воспламенения не будет достигнута. Лесные горючие материалы (ЛГМ) представлены в виде двух составляющих [11]. В первую составляющую входят опавшие с деревьев листья, хвоинки, тонкие веточки, слои мхов, лишайников, трав и кустарников, валежник, гнилые пни. Во вторую составляющую входят хвоя, листья и ветки в пологе леса. И первая, и вторая составляющие лесных горючих материалов образуют конденсированную фазу. До нагревания эта фаза состоит из органического вещества (объемная доля φ<sub>1</sub>, плотность ρ<sub>1</sub>) и связанной с ним воды (объемная доля φ<sub>2</sub>, плотность ρ<sub>2</sub>). При поступлении к ней тепла последовательно протекают следующие стадии [11]: нагрев влажного материала (без испарения воды), сушка (испарение воды), нагрев сухого материала до температуры начала разложения (пиролиза), разложение органики с образованием реакционно способных горючих и не горючих газообразных продуктов (H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O) и конденсированных частиц дыма. Далее происходит возгорание горючих газообразных продуктов, выделение тела с дальнейшей сушкой новых порций лесных материалов.

Процесс горения определяет следующие начальные условия: загрузка участка – плотность первой составляющей на метр квадратный, например, это хвойный опад с плотностью 3 кг/м<sup>2</sup> и влагосодержанием 8%; плотность растительности над землей (травы и кустарники, плотность сухого ЛГМ, например, 0,8 кг/м<sup>3</sup> и влагосодержанием 80%); температура; направление и скорость ветра.

Перечислим составляющие, содержащиеся в зоне процесса горения. Под составляющей понимается вещество, находящееся в объеме, в котором развивается процесс горения. Каждая составляющая характеризуется объемной долей (φ<sub>i</sub>) и плотностью (ρ<sub>i</sub>) в смеси составляющих зоны горения. Совокупность составляющих в зоне горения представляет собой их массовую концентрацию. Истинная плотность (ρ<sub>ин</sub>), связанная с объемной долей и плотностью смеси i-ых составляющих, определяется соотношением:

$$\rho_{ин} = \frac{\rho_i}{\phi_i}.$$

Конденсированная фаза (объемная доля φ<sub>к</sub>, плотность ρ<sub>к</sub>) содержит:

- сухое органическое вещество (объемная доля  $\varphi_1$ , массовая концентрация  $\rho_1$ );

- связанную с сухим органическим веществом воду в жидко-капельном состоянии (объемная доля  $\varphi_2$ , массовая концентрация  $\rho_2$ );

- конденсированный продукт пиролиза – коксик (объемная доля  $\varphi_3$ , массовая концентрация  $\rho_3$ );

- конденсированный продукт горения – зола (объемная доля  $\varphi_4$ , массовая концентрация  $\rho_4$ ).

Дисперсная фаза (объемная доля  $\varphi_d$ , плотность  $\rho_d$ ) содержит:

- дисперсный продукт горения – сажа (объемная доля  $\varphi_5$ , массовая концентрация  $\rho_5$ );

- дисперсный продукт горения – зола (объемная доля  $\varphi_6$ , массовая концентрация  $\rho_6$ ).

Газовая фаза (объемная доля  $\varphi_g$ , массовая концентрация  $\rho_g$ ) содержит:

- горючие газообразные продукты пиролиза (монооксид углерода CO, водород H<sub>2</sub>) (объемная доля  $\varphi_7$ , массовая концентрация  $\rho_7$ );

- кислород воздуха (объемная доля  $\varphi_8$ , массовая концентрация  $\rho_8$ );

- углекислый газ (объемная доля  $\varphi_9$ , массовая концентрация  $\rho_9$ );

- водяной пар (объемная доля  $\varphi_{10}$ , массовая концентрация  $\rho_{10}$ );

- инертные газы воздуха (объемная доля  $\varphi_{11}$ , массовая концентрация  $\rho_{11}$ ).

Объемная доля конденсированной фазы  $\varphi_k$  равна сумме объемных долей составляющих:

$$\varphi_k = \sum_{i=1}^4 \varphi_i$$

Плотность конденсированной фазы  $\rho_k$  равна сумме плотностей составляющих:

$$\rho_k = \sum_{i=1}^4 \rho_i$$

Объемная доля дисперсной фазы  $\varphi_d$  равна сумме объемных долей составляющих:

$$\varphi_d = \sum_{i=5}^6 \varphi_i$$

Плотность дисперсной фазы  $\rho_d$  равна сумме плотностей составляющих:

$$\rho_d = \sum_{i=5}^6 \rho_i$$

Объемная доля газовой фазы  $\varphi_g$  равна сумме объемных долей составляющих:

$$\varphi_g = \sum_{i=7}^{11} \varphi_i$$

Плотность газовой фазы  $\rho_g$  равна сумме плотностей составляющих:

$$\rho_g = \sum_{i=7}^{11} \rho_i$$

До возникновения горения или пиролиза (пассивное состояние) в зоне пожара отсутствуют коксик ( $\rho_3 = 0$ ), зола ( $\rho_4 = 0$ ), дисперсная фаза  $\rho_d = \sum_{i=5}^6 \rho_i = 0$ , горючие газообразные продукты пиро-

лиза (монооксид углерода CO, водород H<sub>2</sub>)  $\rho_7 = 0$ . Содержание в воздухе углекислого газа в невозмущенной среде ничтожно мало и поэтому принимается  $\rho_9 = 0$ .

Пространственная область процесса распространения пожара (полигон) представляет собой трехмерное пространство, представленное трехмерным массивом со следующими максимальными значениями по каждому измерению: numRows – число индексов по измерению "r" (row); numCols – число индексов по измерению "c" (column); numSt – число индексов по измерению "s" (stratum). Принадлежность индекса к соответствующему измерению определяется следующим образом:  $r \in \{0, 1, \dots, \text{numRows} - 1\}$ ;  $c \in \{0, 1, \dots, \text{numCols} - 1\}$ ;  $s \in \{0, 1, \dots, \text{numSt} - 1\}$ .

Каждая компонента трехмерного массива представляет собой клеточный автомат процесса распространения пожара (КАПП). Конфигурация соседства клеточного автомата с непосредственно соседствующими с ним клеточными автоматами определяется его координатами в трехмерном векторном пространстве. Существует ограниченное множество конфигураций  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_{27}\}$

$$k|_{k \in K} = \begin{cases} k_1 & (0 < c < \text{numCols} - 1) \wedge (0 < s < \text{numSt} - 1) \wedge (r = 0); \\ k_2 & (0 < r < \text{numRow} - 1) \wedge (0 < s < \text{numSt} - 1) \wedge (c = 0); \\ k_3 & (0 < c < \text{numCols} - 1) \wedge (0 < s < \text{numSt} - 1) \wedge (r = \text{numRow} - 1); \\ k_4 & (0 < r < \text{numRow} - 1) \wedge (0 < s < \text{numSt} - 1) \wedge (c = \text{numCols} - 1); \\ k_5 & (0 < r < \text{numRow} - 1) \wedge (0 < c < \text{numCols} - 1) \wedge (s = \text{numSt} - 1); \\ k_6 & (0 < r < \text{numRow} - 1) \wedge (0 < c < \text{numCols} - 1) \wedge (s = 0). \end{cases} \quad (1)$$

Обобщенная конфигурация соседства клеточного автомата показана на рис. 1.

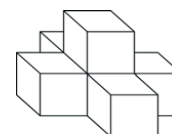


Рис. 1. Обобщенная конфигурация соседства клеточного автомата, с координатами КА-та, определенными в (1)

Конкретное k-ое соседство клеточного автомата определяется значением координаты клеточного автомата, находящегося в невидимой зоне на рис. 1, и зависимостью (1).

Координаты клеточных автоматов, расположенных в углах полигона определяются как:

$$k|_{k \in K} = \begin{cases} k_7 & (s = 0) \wedge (r = 0) \wedge (c = 0); \\ k_8 & (s = 0) \wedge (r = \text{numRow} - 1) \wedge (c = 0); \\ k_9 & (s = 0) \wedge (r = \text{numRow} - 1) \wedge (c = \text{numCols} - 1); \\ k_{10} & (s = 0) \wedge (r = 0) \wedge (c = \text{numCols} - 1); \\ k_{11} & (s = \text{numSt} - 1) \wedge (r = 0) \wedge (c = 0); \\ k_{12} & (s = \text{numSt} - 1) \wedge (r = \text{numRow} - 1) \wedge (c = 0); \\ k_{13} & (s = \text{numSt} - 1) \wedge (r = \text{numRow} - 1) \wedge (c = \text{numCols} - 1); \\ k_{14} & (s = \text{numSt} - 1) \wedge (r = 0) \wedge (c = \text{numCols} - 1). \end{cases} \quad (2)$$

Обобщенная конфигурация соседства клеточного автомата с координатами, определенными в (2), показана на рис. 2.

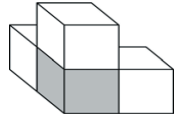


Рис. 2. Обобщенная конфигурация соседства клеточного автомата, с координатами КА-та, определенными в (2)

КА-т, координаты которого представлены в (2), окрашен в темный цвет.

Координаты клеточных автоматов, расположенных на ребрах полигона и отстоящих от его углов определяются как:

$$k|_{k \in K} = \begin{cases} k_{15} & (s=0) \wedge (r=0) \wedge (0 < c < \text{numCols}-1); \\ k_{16} & (s=0) \wedge (0 < r < \text{numRow}-1) \wedge (c=0); \\ k_{17} & (s=0) \wedge (r=\text{numRow}-1) \wedge (0 < c < \text{numCols}-1); \\ k_{18} & (s=0) \wedge (0 < r < \text{numRow}-1) \wedge (c=\text{numCols}-1); \\ k_{19} & (s=\text{numSt}-1) \wedge (r=0) \wedge (0 < c < \text{numCols}-1); \\ k_{20} & (s=\text{numSt}-1) \wedge (0 < r < \text{numRow}-1) \wedge (c=0); \\ k_{21} & (s=\text{numSt}-1) \wedge (r=\text{numRow}-1) \wedge (0 < c < \text{numCols}-1); \\ k_{22} & (s=\text{numSt}-1) \wedge (0 < r < \text{numRow}-1) \wedge (c=\text{numCols}-1); \\ k_{23} & (0 < s < \text{numSt}-1) \wedge (r=0) \wedge (c=0); \\ k_{24} & (0 < s < \text{numSt}-1) \wedge (r=\text{numRow}-1) \wedge (c=0); \\ k_{25} & (0 < s < \text{numSt}-1) \wedge (r=\text{numRow}-1) \wedge (c=\text{numCols}-1); \\ k_{26} & (0 < s < \text{numSt}-1) \wedge (r=0) \wedge (c=\text{numCols}-1). \end{cases} \quad (3)$$

Обобщенная конфигурация соседства клеточного автомата с координатами, определенными в (3), показана на рис. 3.

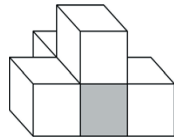


Рис. 3. Обобщенная конфигурация соседства клеточного автомата, с координатами КА-та, определенными в (3)

Координаты клеточных автоматов, расположенных внутри полигона, не касающиеся его границ, определяются как:

$$k|_{k \in K} = k_{27} \quad (0 < s < \text{numSt}-1) \wedge (0 < r < \text{numRow}-1) \wedge (0 < c < \text{numCols}-1). \quad (4)$$

Обобщенная конфигурация соседства клеточного автомата с координатами, определенными в (4), показана на рис. 4.

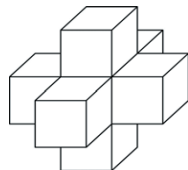


Рис. 4. Обобщенная конфигурация соседства клеточного автомата, с координатами КА-та, определенными в (4)

Граф-схема переходов КАПРП из состояния в состоянии показана на рис. 5. КАПРП имеет пять состояний: Passive, Drying, DryingBurn, Pyrolysis, PyrlsBurn, Burn, AfterBurn.

Passive – пассивное (начальное) состояние, характеризующееся наличием определенного количества ЛГМ, влажности и температурой воздуха. Drying – состояние процесса сушки, в течение которого влажность уменьшается. DryingBurn – состояние процесса сушки + горения, в течение которого влажность уменьшается, горение идет за счет горючих газов, поступающих в него от соседствующих с ним клеточных автоматов. Pyrolysis – состояние процесса пиролиза начинается тогда, когда в процессе нагревания влажность ЛГМ становится равной нулю, и начинается выделение летучих веществ, в том числе и горючих газов. Burn – состояние процесса горения, в течение которого происходит процесс выделения и выгорания горючих газов. AfterBurn – состояние процесса остывания после окончания процесса горения.

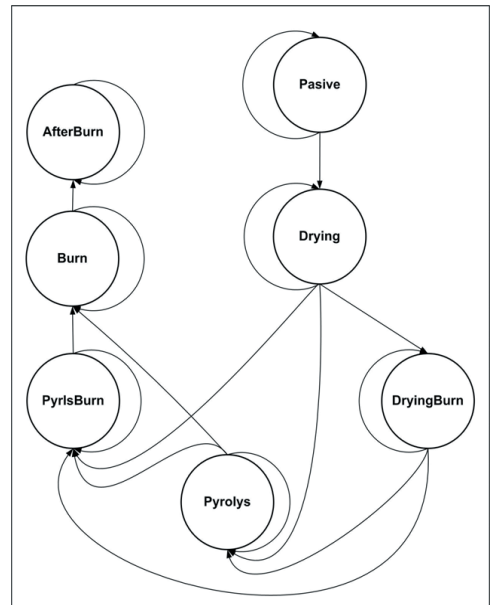


Рис. 5. Граф-схема переходов КАПРП из состояния в состоянии

На рис. 6 – рис. 11 приведены детальные графы переходов КАПРП из вышеприведенных состояний.

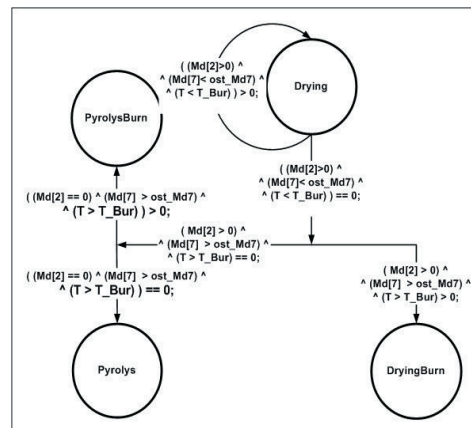


Рис. 6. Граф переходов КАПРП из состояния Passive

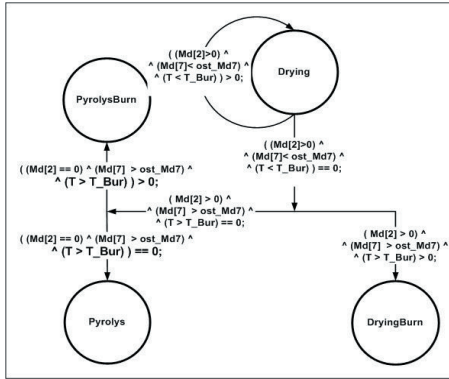


Рис. 7. Граф переходов КАПРП из состояния Drying

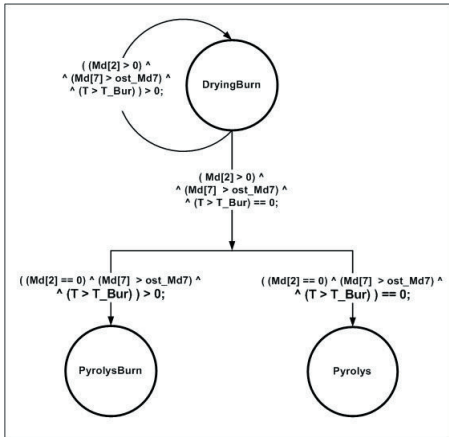


Рис. 8. Граф переходов КАПРП из состояния DryingBurn

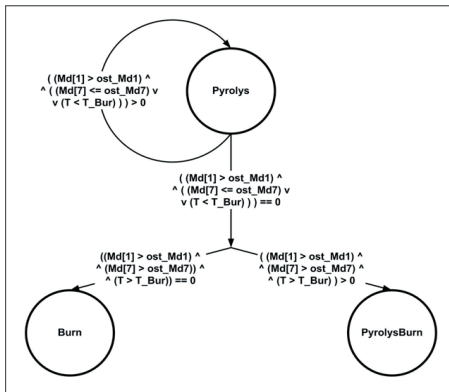


Рис. 9. Граф переходов КАПРП из состояния Pyrolysis

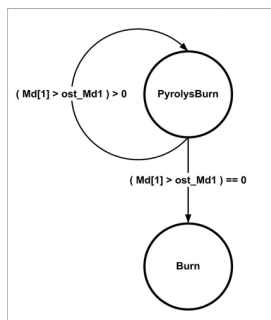


Рис. 10. Граф переходов КАПРП из состояния PyrolysisBurn

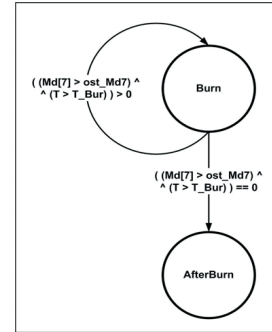


Рис. 11. Граф переходов КАПРП из состояния Burn

В табл. 1 приведены смысловые значения параметров, приведенные в графах переходов КАПРП на рис. 6 – рис. 11.

Таблица 1

Условные обозначения и смысловые значения параметров, приведенные в графах переходов КАПРП

Условное обозначение	Смысловое значение
T	Температура в КАПРП
T_Dry	Температура, при которой начинается процесс сушки
T_Bur	Температура, при которой начинается процесс горения
Md[1]	Масса сухого ЛГМ в КАПРП
Md[3]	Масса КОКСИКА в КАПРП
ost_Md1	Минимально необходимая масса сухого ЛГМ для продолжения процесса пиролиза
ost_Md7	Минимально необходимая масса горючих газов для продолжения процесса горения

Было проведено компьютерное моделирование процесса изменения температуры клетки-источника горения во времени, соседствующих с ней и удаленных от нее клеток. На рис. 12 приведен полигон размерности 4 × 6 × 6 с клеткой, окрашенной в серый цвет, находящейся в состоянии Burn, и с координатами (s = 0, r = 0, c = 2).

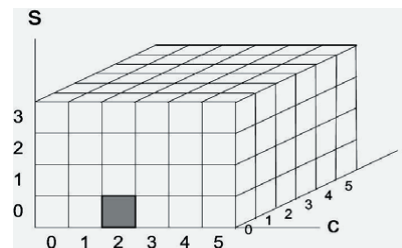


Рис. 12. Полигон

На рис. 13 и рис. 14 приведены изменения температуры клеток и массы горючих газов, полученные в результате компьютерного моделирования процесса горения в выбранных клетках. Исходная загрузка ЛГМ-ом определенной влажности одинакова для всех клеток полигона, кроме клетки, находящейся в состоянии Pyrolysis.

Изменение температуры в клетке идет примерно с одинаковой скоростью. Максимальная температура достигается в момент перехода из состояния пироли-



з+горение (PyrolysisBurn) в состояние горение (Burn). Падение температуры после перехода от пиролизз+горение к горению, связано с тем, что горючие газы поступают только из соседних клеток и отсутствует энергия пиролиза.

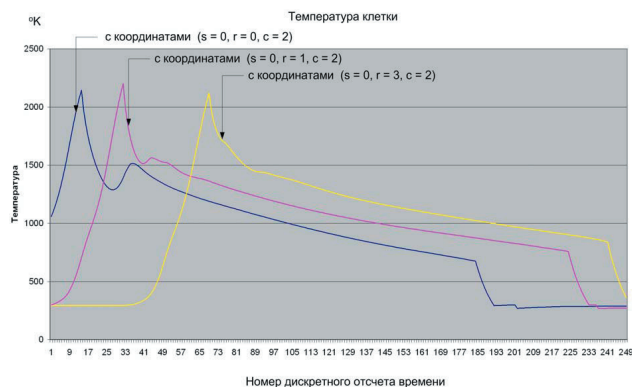


Рис. 13

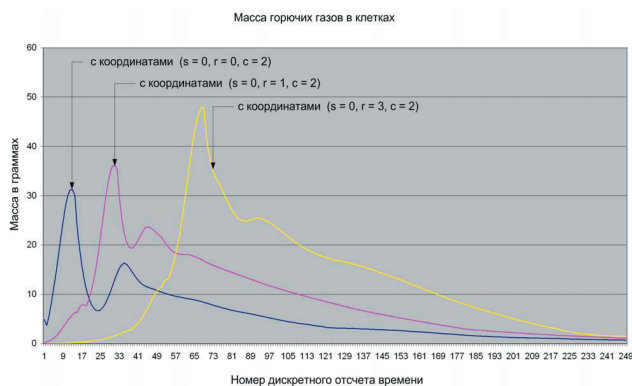


Рис. 14

Изменение количества горючих газов зависит от текущего состояния клетки и достигает максимума в момент перехода от пиролизз+горение (PyrolysisBurn) к горению (Burn). Величина максимума возрастает по мере удаления клетки от источника горения. Это связано с общим количеством клеток выделяющих горючие газы.

## 5. Выводы

- Впервые предложены математические и компьютерные модели клеточных автоматов, способных моделировать микроскопические процессы горения.

- Предложенные клеточные автоматы являются основой построения математической и компьютерной модели процесса распространения пожара.

- Полученные (в результате компьютерного моделирования процесса горения) зависимости временных изменений температур и масс горючих газов подтвердили правильность построения математических моделей клеточных автоматов. Система клеточных автоматов позволила свести вычислительные методы моделирования макроскопических процессов горения к взаимодействию микроскопических процессов горения между собой.

## Литература

1. Курбатский Н. П. Классификация лесных пожаров / Н. П. Курбатский – В кн.: Вопросы лесоведения. Т. 1. Красноярск, 1970.
2. Мелехов И. С. Лесная пирология и ее задачи / И. С. Мелехов – В кн.; Современные вопросы охраны от пожаров и борьбы с ними. - М., 1965.
3. Валендик Э. Н. Ветер и лесной пожар / Э. Н. Валендик. - М., 1968. – 230 с.
4. неизвестно.
5. Доррер Г. А. Математические модели динамики лесных пожаров / Г. А. Доррер. – М.: Лесн. пром-сть, 1979. – 161с.
6. Ходаков В. Е. Моделирование распространения лесных пожаров / В. Е. Ходаков, М. В. Граб // Вестник Херсонского государственного университета. – 2003. – №2(18). – С. 33-41.
7. Ходаков В. Е. Моделирование системы управления природными пожарами / В. Е. Ходаков, М. В. Граб // Вестник Херсонского государственного технического университета. – 2001. - №1(10). – С. 261-265.
8. Ходаков В.Е. Сетевое планирование в задаче управления ресурсами при тушении лесного пожара / В. Е. Ходаков, М. В. Граб // Проблемы пожарной безопасности. – 2001. – Вып. 9. – С. 33-41.
9. Джалурия Й. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен / Й. Джалурия. – М.: Мир, 1983. – 399 с.
10. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздейл; пер. с англ. К. Г. Бомштейна. Под ред Ю. А. Кошмарова, В. Е. Макарова. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.
11. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров / А. М. Гришин. – Томск: Издательство Томского ун-та, 1981. – 279с.
12. Павлов А. В. Энергообмен в ландшафтной сфере земли / А. В. Павлов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 254 с.
13. Тоффоли Т. Машины клеточных автоматов / Т. Тоффоли, Н. Марголус; пер. с англ. П. А. Власова, Н. В. Барабанова – М.: Мир, 1991. – 280 с.
14. Филиппенко И. Г. Методология проектирования компьютерных моделей элементов с памятью для дискретных моделей, управляемых событиями / И. Г. Филиппенко, А. Ю. Глушакова // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Науково – технічний журнал, №3, 1998, С. 76 - 85.
15. M. Creutz «Deterministic Ising dynamics» [Электронный ресурс]: / M. Creutz Ann. Phys. 167, 62–72 (1986). Режим доступа до электронного ресурсу: <http://thy.phy.bnl.gov/~creutz/mypubs/pubs.html>.
16. M. Creutz Microcanonical monte carlo simulation [Электронный ресурс]: / M. Creutz Physical Review Letters, 50:1411–1414, 1983. Режим доступа до электронного ресурсу: <http://thy.phy.bnl.gov/~creutz/mypubs/pubs.html>.
17. Наумов Л. «Цветные» клеточные автоматы / Л. Наумов, А. Шатыло // Мир ПК. – 2004. – №5 – С. 64–71.
18. Филиппенко И. Г. Компьютерное моделирование процесса распространения пожара на плоскости / И. Г. Филиппенко, В. М. Бутенко, А. В. Головки // 36. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ. – 2008. – Вип. № 16. – С. 64 – 73.
19. Указание по обнаружению и тушению лесных пожаров. – Изд.офф. - М.: Гослесхоз СССР, 1976. – 86 с.