

УДК004.9

М.О. Пустовіт

Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля ДСНС України, Черуаси

## МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ВСЕРЕДИНИ БУДІВЕЛЬ У ДВОВИМІРНОМУ ПРОСТОРІ МЕТОДОМ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ

В статті розглянуто моделювання поширення пожежі всередині будівель у двовимірному просторі. Вказано на основні відмінності моделей клітинних автоматів, наведені приклади їх застосування на практиці. Розроблено математичну модель поширення пожежі на основі клітинних автоматів у двовимірному просторі для подальшого використання в комп'ютеризованому тренажерному комплексі підготовки пожежного-рятувальника.

**Ключові слова:** математичне моделювання, поширення пожежі, клітинні автомати, двовимірний простір.

### Вступ

**Актуальність проблеми.** Математичні моделі поширення пожежі та задимлення дозволяють імітувати реальну обстановку об'єкта з високою точністю в реальному часі, створювати практично всі можливі ситуації при його застосуванні, у тому числі вводити можливі аварійні ситуації й режими роботи обладнання для відпрацювання дій персоналу в особливих режимах і ситуаціях, створювати візуальну картину навколишнього простору і його зміни в процесі роботи.

Моделювання поширення вогню та диму при пожежі всередині будівель в двовимірному просторі може відбуватись за багатьма методами та способами.

Одним з багатьох є метод клітинних автоматів. Основними перевагами методу є висока швидкість обробки даних, що закладено в математичну модель, достатня достовірність отриманих результатів, відображення результатів в графічному вигляді.

Дослідниками в переважній більшості випадків метод клітинних автоматів використовується для прогнозування поширення пожежі лісових масивів, відкритого простору тощо. В деяких випадках зустрічається його застосування для прогнозування пожеж всередині приміщень.

Аналіз та вдосконалення моделі поширення пожежі методом клітинних автоматів дозволить в подальшому її використання в комп'ютеризованому тренажері підготовки пожежного-рятувальника.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз існуючих математичних моделей поширення пожежі не виявив готових і апробованих рішень для використання в тренажерах, що значною мірою пов'язано з відсутністю достатньо відпрацьованих теорії і практики розв'язання подібних задач у рамках підготовки пожежного-рятувальника.

Класифіковано математичні моделі за основними їх характеристиками. В якості досліджуваних обрано моделі, що базуються на методі клітинних автоматів.

За допомогою клітинних автоматів (КА) авторами [1] моделюється процес поширення лісової пожежі. Описано стани клітини на різні моменти часу, проте не враховано властивості пожежного навантаження.

Автори [2] використовують КА для розрахунку розповсюдження пожежі та задимлення у великих будівлях. Основним недоліком даного методу є значний розмір клітини, і як наслідок – низька точність прогнозування.

Дослідником [3] моделюється процес поширення пожежі в будівлях. Використовується вектори швидкостей повітряних потоків для визначення параметрів задимлення. Головною проблемою, що може виникнути при застосуванні пропонованого методу – необхідність вимірювання швидкостей повітряних потоків в різних умовах, що не завжди є можливим.

Найбільш оптимально з точки зору можливого застосування моделі поширення пожежі за допомогою методу клітинних автоматів пропонують автори [4]. Позитивною рисою є можливість масштабування клітини для отримання більш точних результатів.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є аналіз існуючих математичних моделей розвитку пожеж та вдосконалення найбільш оптимальних для використання в комп'ютеризованому тренажері підготовки пожежного-рятувальника.

Математичні моделі поширення пожежі що базуються на методі клітинних автоматів можливо застосувати для моделювання складних динамічних систем, базою яких є місцева динаміка компонентів. Додатковою перевагою при використанні клітинних автоматів є відображення результатів в графічному вигляді, що полегшує розуміння дискретної динаміки досліджуваної системи. Використання КА в якості засобу моделювання виявилось досить зручним під час розробки штучних сценаріїв, в основному в тих областях, де інші методи не є підходящими.

Основними вимогами, що висуваються нами до математичної моделі поширення пожежі є:

- масштабування клітин для прискорення обчислень або збільшення їх точності;
- проведення обчислень приміщень довільної форми (не лише прямокутних);
- проведення обчислень в режимі реального часу;
- графічне відображення результатів моделювання для полегшення сприйняття.

### Основний матеріал досліджень

Завдання розробки математичної моделі поширення пожежі в одному або декількох приміщеннях довільної форми вдалося вирішити із застосуванням методу імітаційного моделювання.

Суть цього методу при дослідженні систем полягає в тому, що процес імітується за допомогою арифметичних і логічних операцій в тій послідовності елементарних актів, яка характерна для модельованого процесу. При цьому загальною математичною моделлю функціонування системи виступає моделюючий алгоритм, відповідно до якого в ЕОМ виробляється інформація, що описує елементарні явища досліджуваного процесу з урахуванням їх взаємного впливу.

Використання моделюючого алгоритму дозволяє отримати не лише конкретні значення характеристик процесу, але і провести якісні дослідження для цієї системи [5].

У розробленій моделі площа поверху будівлі представляється у вигляді безлічі елементів – розрахункових одиниць площі (що відповідають квадратному метру, сантиметру і тому подібне), кожен з яких має свої характеристики горючого навантаження, у тому числі, лінійну швидкість поширення полум'я. Поширення пожежі в тому або іншому напрямі від джерела запалення визначається вірогідністю загорання кожного такого елемента. Таким чином, дана модель є імітаційною імовірнісною моделлю.

Загорання клітини (x, y) впливає на одну з прилеглих клітин (x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>).

Ймовірність займання визначається виходячи з матеріалів, що горять, і розташовані в сусідніх клітинах. Ці ймовірності укладені в структурі багатовимірного масиву для всієї сітки, що є тривимірним: два з них (x та y), вказують положення у сітці для вихідної комірки (x, y), а третій показує положення сусідніх клітин).

Перед перемальовуванням кожного кадру анімації по формулі (1) робиться обчислення вірогідності загорання кожного елемента з урахуванням його характеристик і наявності сусідніх елементів, що горять

$$FIXED\_PROB\_F = \frac{V \cdot FP}{\Delta} \quad (1)$$

де V – лінійна швидкість поширення полум'я, виражена в одиницях [елемент/кадр анімації];

FP – параметр, що характеризує кількість і відносне розташування сусідніх елементів, що горять. Він може набувати значення в інтервалі [0...12], оскільки «питома вага» елементів, що горять, розташованих ортогонально по відношенню до того, що розглядається, приймається в 2 рази більше, ніж діагонально розташованих (рис. 1):

$$FP = 2n^+ + n^x, \quad (2)$$

де n<sup>+</sup> – кількість елементів, що горять, розташованих ортогонально по відношенню до того, що розглядається; n<sup>x</sup> – кількість елементів, що горять, розташованих що по діагоналі відносно розглядаємого.

Такий підхід обумовлений тим, що на імітаційному рівні поширення полум'я подібно до теплообміну випромінюванням горючі матеріали, розташовані на деякій відстані від фронту полум'я в результаті такого теплообміну поступово нагріваються і запалюються. А теплообмін випромінюванням між тілами обернено пропорційний до квадрата відстані між ними:

$$d^2Q_1 = C_0 \left[ \left( \frac{\tau_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{\tau_2}{100} \right)^4 \right] \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2 \quad (3)$$

Відстань між центрами діагонально розташованих елементів в  $\sqrt{2}$  разів більше відстані між елементами, розташованими ортогонально, тому імітується в 2 рази менш інтенсивна взаємодія між ними.

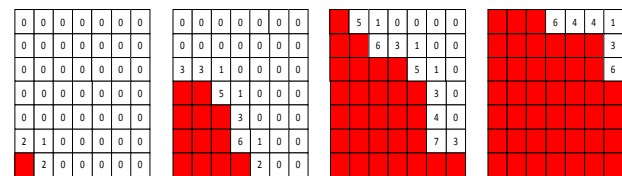


Рис. 1. Розподіл параметра в різні моменти часу моделювання

Перехідні правила стосовно КА поширення пожежі для осередку (x, y) на крок за часом t, позначається A(x, y)t (4):

$$A(x, y)t = \begin{cases} \text{or}(A(x, y)_{t-1} = 2) \text{ and } (\text{time\_expired}(x, y) = 0) \\ 1 \text{ if } A(x, y)_{t-1} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

де time\_expired (x, y) є лічильником, який зменшується від максимального значення F\_DURATION (x, y) на кожен часовий крок, поки значення КА не досягне 0.

### Обмеження методу

Необхідно відмітити, що за один кадр анімації фронт пожежі (периметр) може переміститися тільки на один елемент (V<sub>max</sub> = 1 ел./кадр), тому максимально можлива модельована лінійна швидкість поширення полум'я в якому-небудь напрямі дорівнює відтворенню частоти кадрів і лінійного розміру квадрата, прорівняного до елемента:

$$V_{\max} = v \cdot a, \quad (5)$$

де  $v$  – частота кадрів анімації,  $c^{-1}$ ;  $a$  – лінійний розмір розрахункової одиниці площі, на які розбивається площа будівлі, м.

Така залежність накладає на модель певні вимоги: розробникові імітаційних систем необхідно враховувати, що розмір елементів має бути, з одного боку, мінімальним (для зменшення дискретності процесу збільшення площі пожежі), з іншого боку, не менше, ніж розмір, при якому максимальна швидкість поширення полум'я буде достатня для використання в тренажері необхідних видів горючого навантаження.

Нами прийнята частота 20 кадрів в секунду, але розрахунок робиться на кожному четвертому кадрі, тобто 5 разів в секунду. Площа поверху розбивається

ся на елементи розміром 2,5x2,5 см. Таким чином, максимальна модельована лінійна швидкість поширення полум'я складає 0,125 м/с (7,5 м/хв), що є достатньо для переважної більшості речовин та матеріалів згідно довідкових таблиць [8].

### Практична реалізація

Алгоритм, показаний на рис. 2, не дозволяє реалізувати цю модель в режимі реального часу у зв'язку з дуже великою кількістю елементів, стан яких необхідно аналізувати (1600 на кожному квадратному метрі площі будівлі).

При моделюванні пожежі навіть в невеликому офісі по цьому алгоритму на сучасних комп'ютерах вдається досягти швидкості всього 10 – 15 кадрів в секунду.

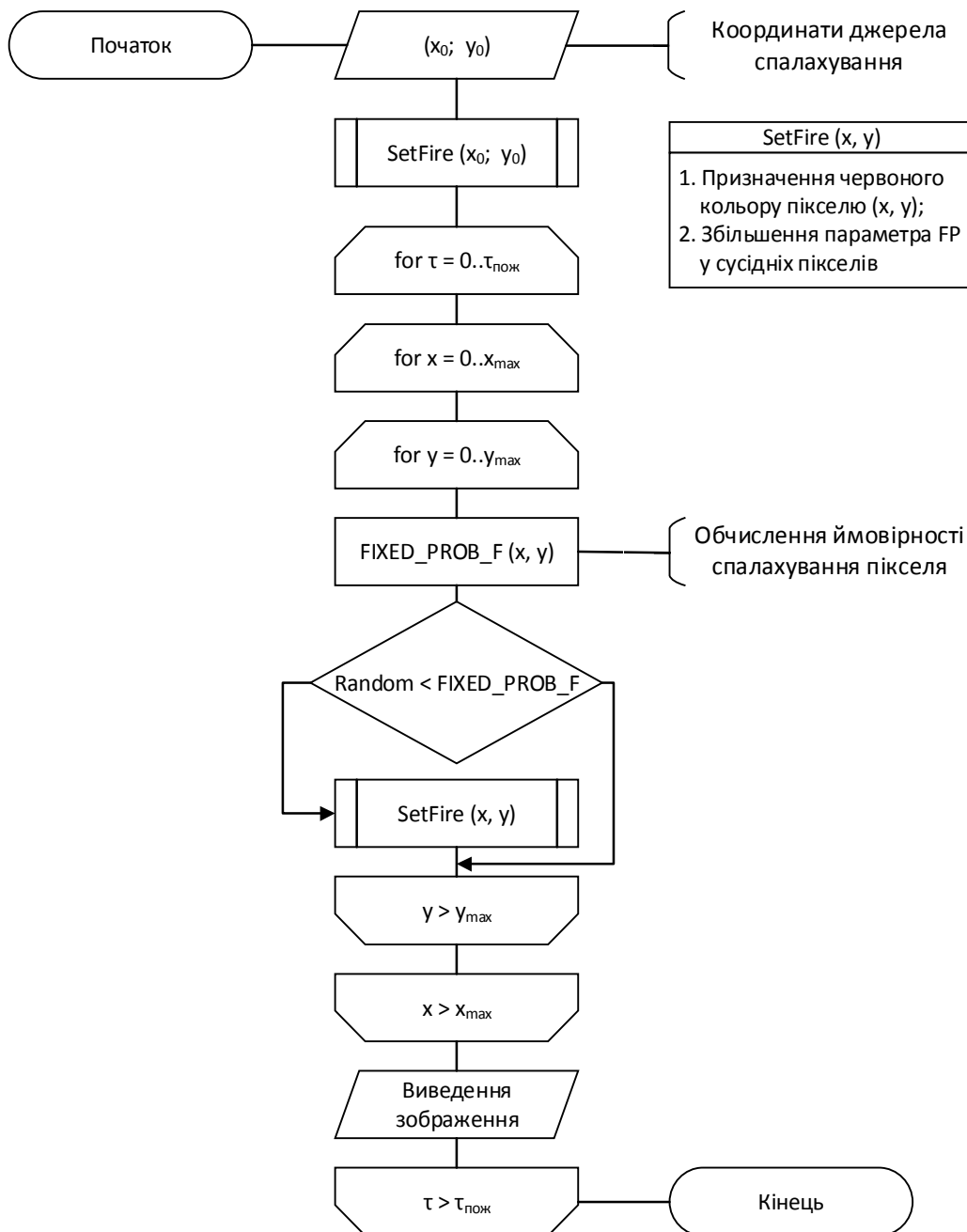


Рис. 2. Загальний алгоритм реалізації імовірнісної моделі поширення пожежі по площі

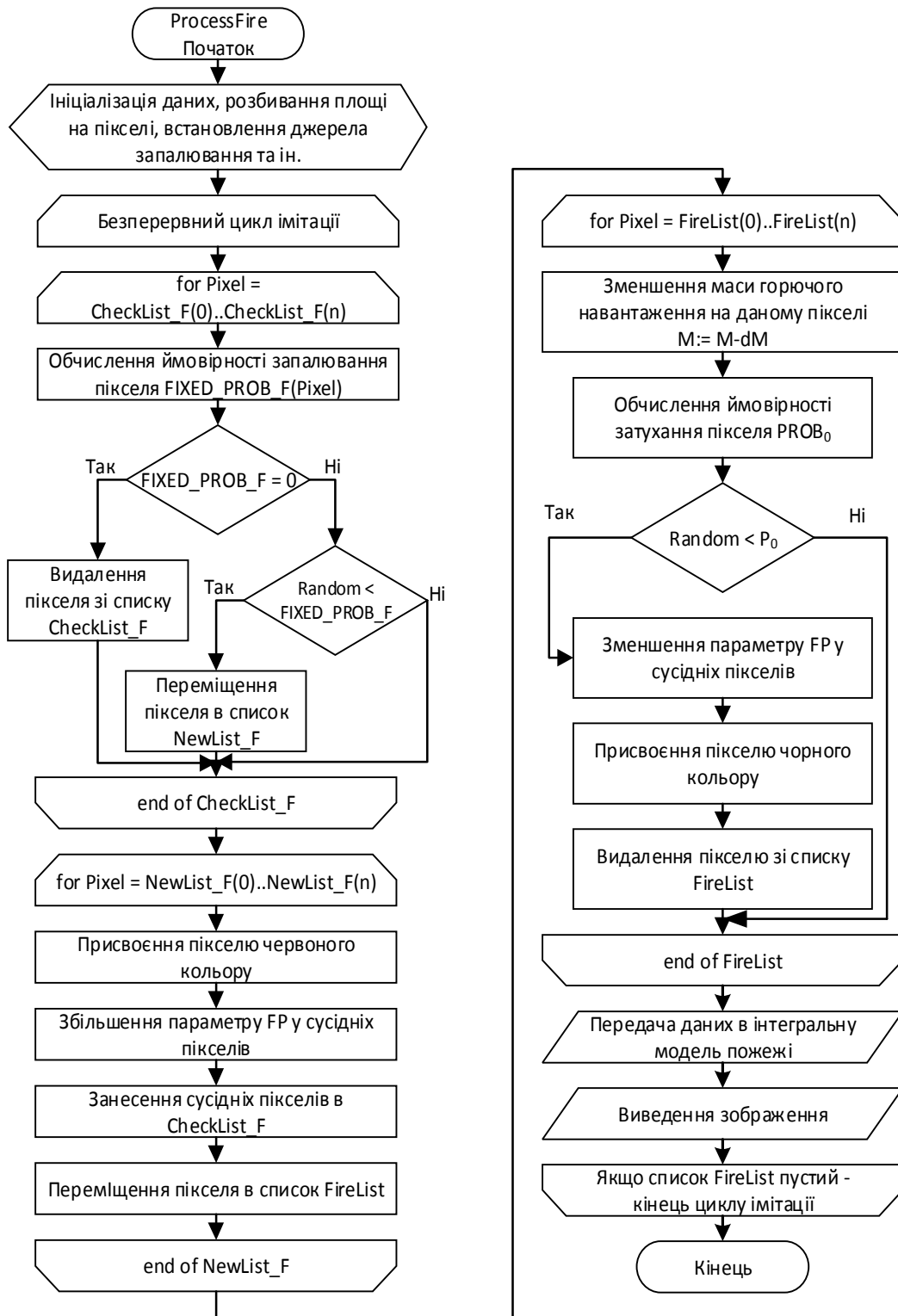


Рис. 3. Алгоритм реалізації імовірнісної моделі поширення пожежі

Крім того, при такому послідовному зверненні до елементів у разі виконання умови (4) і загоряння елемента автоматично збільшується значення FP у сусідніх елементах, і ймовірність зміни їх стану на поточному кроці рахунку обчислюється із вже зміненим його значенням. Так при  $V = V_{\max}$  уся площа може бути охоплена вогнем всього за один крок

рахунку.

Обидві вказані проблеми вдалося розв'язати шляхом внесення ряду доповнень в алгоритм програми з використанням масивів особливого типу – списків [7].

Створюється три об'єкти цього класу:

CheckList – список покажчиків на елементи, що

ще не горять, (або не задимлені), розташовані впригол до фронту пожежі (загоряння яких власне імітує поширення полум'я в тому або іншому напрямі);

NewList – список покажчиків на елементи, які належить запалити на цьому кроці рахунку, оскільки виконується умова (4);

FireList – список покажчиків на елементи (їх сукупність є площею пожежі), що вже горять.

Таким чином, необхідні операції робляться не з усіма елементами усєї площі будівлі, а тільки з тими, які безпосередньо залучені в модель і є площею пожежі або задимлення.

Реалізація моделі відбувається за наступним алгоритмом (рис. 3):

- обробляється список CheckList: обчислюється ймовірність загоряння кожного елемента, при виконанні умови (4) він переноситься в список NewList;

- обробляється список NewList : елементи списку позначаються червоним кольором, в усіх сусідніх елементах збільшується значення FP і вони заносяться в список CheckList;

- усі елементи з NewList переносяться в FireList;

- обробляється список FireList: обчислюється площа пожежі і інші параметри, необхідні для реалізації інтегральної моделі; пропорційно швидкості вигорання зменшується маса горючого матеріалу; при вигоранні усєї маси, що доводиться на цю розрахункову одиницю площі, вона видаляється із списку (загасання).

## Висновок

Підводячи підсумок вищевикладеному, можна сказати, що отримана імовірнісна модель поширення пожежі по площі, що дозволяє отримати площу (кількісно) і форму площі пожежі при будь-яких введених користувачем конфігураціях приміщень, характеристиках горючого навантаження і довільній кількості джерел запалення. Подальшими перспек-

тивними дослідженнями є синтез з інтегральною математичною моделлю пожежі, що дозволить, як в реальному, так і в прискореному режимі часу моделювати не лише розвиток пожежі, але і відобразити динаміку різних параметрів стану газового середовища в усіх приміщеннях будівлі

## Список літератури

1. Sullivan A.L., Knight I.K. *A hybrid cellular automata/semi-physical model of fire growth*, Proceedings of the 7th Asia-Pacific Conference on Complex Systems Cairns Conventioin Centre, Cairns, Australia 6-10th December 2004.

2. Muzy A., Innocenti E., Aiello A., Santucci J.-F., Wainer G., "Cellular Automata Based Simulation for Smokeand Fire Spreading in Large Buildings", *Simulation*, vol. 81, no 2, pp.103-117, 2005.

3. Daniel-Ioan Curiac «Fire Spreading Simulation in Large Buildings Based on Cellular Automata», *ADVANCES in DYNAMICAL SYSTEMS and CONTROL*, vol. 45, no 3, pp. 159-162, 2010.

4. А.А. Субачева, С.В. Субачев *Имитационное моделирование развития и тушения пожаров в системе подготовки специалистов противопожарной службы*[Текст] // Прикладная информатика. – 2008. – № 4. – С. 27-37.

5. Соколов С.В. *Методологические основы разработки и использования компьютерных имитационных систем для исследования деятельности и проектирования аварийно-спасательных служб в городах* [Текст] : дис.... док. техн. наук : 05.13.10 / Соколов Сергей Викторович. – М., 1999. – 295 с.

6. Кошмаров, Ю.А. *Термодинамика и теплопередача в пожарном деле* [Текст] / Ю.А. Кошмаров, М.П. Башкирцев. – М.: ВШШ МВД СССР, 1987. – 444 с.

7. Бакнелл, Джулиан М. *Фундаментальные алгоритмы и структуры данных в Delphi* [Текст]: Пер. с англ. / Джулиан М. Бакнелл. – СПб.: ООО ДиаСофтЮП, 2003. – 560 с. – ISBN 5-93772-087-3.

8. Иванников В.П., Ключ П.П. *Справочник руководителя тушения пожара* [Текст]: – М.: Стройиздат, 1987. – С. 21-23.

Надійшла до редколегії 11.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. наук. співр. Г.А. Кучук, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА ВНУТРИ ЗДАНИЙ В ДВУМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ МЕТОДОМ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

М.А. Пустовит

*В статье рассмотрено моделирование распространения пожара внутри зданий в двумерном пространстве. Указаны основные отличия моделей клеточных автоматов, приведены примеры их применения на практике. Разработана математическая модель распространения пожара на основе клеточных автоматов в двумерном пространстве для дальнейшего использования в компьютеризированном тренажерном комплексе подготовки пожарного спасателя.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, распространение пожара, клеточные автоматы, двумерное пространство.

## MODELING THE SPREAD OF FIRE INSIDE THE BUILDING IN TWO-DIMENSIONAL SPACE USING CELLULAR AUTOMAT

M.O. Pustovit

*The paper considers the modeling of the spread of fire inside the building in two-dimensional space. Shows the main differences between cellular automata models, examples of their application in practice. Developed the mathematical model of the spread of fire on the basis of cellular automata in two-dimensional space for further use in a computerized firefighter training complex.*

**Keywords:** mathematical modeling, fire spread, cellular automata, two-dimensional space.