

УДК 004.9

М.О. Пустовіт

Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля ДСНС України

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ ТРЕНАЖЕРНИХ КОМПЛЕКСІВ

*В статті розглянуті існуючі математичні моделі розвитку пожеж. Вказано на основні відмінності моделей, наведені приклади їх застосування на практиці. Проведений аналіз дав можливість обрати інтегральну модель пожежі та модель клітинних автоматів для удосконалення з подальшим використанням в комп'ютеризованому тренажерному комплексі підготовки пожежного-рятувальника.*

**Ключові слова:** математичне моделювання, поширення пожежі, тренажерний комплекс, підготовка персоналу.

### Вступ

**Актуальність проблеми.** Вдосконалення підготовки персоналу оперативно-рятувальної служби цивільного захисту неможливе без впровадження в процес навчання комп'ютеризованих систем і тренажерів.

У такій галузі знань, де практично неможливо наочно відобразити складні процеси і явища, що відбуваються в реальному житті, комп'ютерне моделювання є особливо актуальним. Моделювання в процесі навчання можна розглядати не лише як спосіб узагальнення і представлення знань, але і як знаряддя (засіб) його формування.

Існуючі на сьогодні моделі пожеж, великий внесок у розвиток яких внесли Астахова І.Ф., Кошмаров Ю.А., Пузач С.В., Рижов А.М. та інші, та тренажерні системи на їх основі не реалізовувалися для цілей навчання. Вони спрямовані на рішення конкретних практичних задач пожежної безпеки, відображають окремі випадки горіння речовин і матеріалів в приміщеннях певної форми. При цьому вимагають для свого функціонування значного часу із-за великого об'єму проведених обчислень. А розроблені до теперішнього часу тренажерні системи розвитку пожеж у більшості випадків не містять у своїй основі досить адекватних моделей пожеж.

Аналіз існуючих математичних моделей розвитку пожеж дозволить обрати серед них найбільш ефективні та оптимальні для моделювання відповідних процесів та висунути вимоги для створення комп'ютеризованого тренажеру підготовки пожежного-рятувальника.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз існуючих математичних моделей розвитку пожеж 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 моделі CFAST враховується перенесення маси і тепла горизонтальними і вертикальними потоками повітря.

Методика Computational Fluid Dynamics (CFD) дозволяє розрахувати потоки газів і рідин, а також розподіл температури і тиску та інші величини в будь-якій точці модельованого приміщення, проте має високі вимоги до апаратної частини комп'ютера.

NIST FDS – це CFD модель пожежі, в якій турбулентний рух описується законами збереження повного моменту і повної енергії з використанням моделі LES (Large Eddy Simulation). Передусім, вирішуються завдання по перенесенню диму і тепlopередачі.

Модель поширення пожежі, заснована на кінцевих ланцюгах Маркова, являється стохастичною на протигагу детерміністичним підходам до моделювання розвитку пожежі.

За допомогою клітинних автоматів здебільшого моделюється процес поширення лісової пожежі. Можливе використання даного методу для моделювання поширення пожежі всередині будівель.

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

Застосування таких систем дозволить відбити усю сукупність процесів і явищ в усій її складності і взаємозв'язках, значно знизити витрати на натурне моделювання пожеж, скоротити терміни і підвищити рівень підготовки фахівців до ухвалення ефективних рішень в області пожежної безпеки. Необхідність їх впровадження в процес професійної підготовки фахівців оперативно-рятувальної служби цивільного захисту неодноразово відбивалася в роботах Брушлинського М.М., Денисова А.М., Кафідова В.В., Коломійця Ю.І., Місюкевича М.С., Семикова В.Л., Соболева М.М. і інших.

Сучасні комп'ютеризовані тренажери, що використовують математичні моделі поведінки об'єкта, 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.

### Основний матеріал досліджень

Усе різноманіття математичних моделей, призначених для опису процесів, що мають місце на пожежі, можна умовно розділити на класи, користуючись для цього різними якість.

По місцю виникнення і проходження пожежі моделі можуть бути розділені на: моделі пожеж в приміщенні і моделі пожеж на відкритому повітрі. Пожежі в приміщенні відрізняються невеликим масштабом, складністю обліку пожежного навантаження (в тому сенсі, що ми не можемо достовірно знати, яке пожежне навантаження опиниться в приміщенні, що вивчається, у момент пожежі), складністю прогнозування потоків повітря (із-за повітряних потоків через розбиті вікна і т.п.) і іншими особливостями. Пожежі на відкритому повітрі відрізняються великими масштабами, необхідністю обліку і прогнозування погодних умов (включаючи чинники опадів, який протидіють поширенню пожежі), необхідністю врахування рельєфу місцевості і т.д. Ділення по місцю виникнення, також як і ділення з використанням інших якостей, є умовним. Наприклад, пожежі у великих приміщеннях (атріуми, холи, криті стадіони і т.д.) займають деяке проміжне положення між вказаними двома класами пожеж.

По кількості контрольних об'ємів (площ), на яке ділиться досліджуваній об'єм (площа) математичні моделі пожеж діляться на:

- інтегральні моделі (network models) – моделі, які використовують один контрольний об'єм (площу) для кожного приміщення (площі) і дозволяють передбачити усереднені умови в контрольному об'ємі і умовах у віддалених від пожежі місцях;
- зонні моделі (zone models) – моделі, які використовують декілька контрольних об'ємів (площ) на приміщення (площа);
- польові (диференціальні) моделі (field models) – моделі, що використовують сотні або тисячі контрольних об'ємів (площ) на приміщення (площа), які можуть передбачити умови в кожному з контрольних об'ємів.

По відношенню до обумовленості майбутнього моделі діляться на: детерміністські і імовірнісні (стохастичні). Причому в кожній імовірнісній моделі особливим чином приймається те, які явища бу-

дуть вважатися імовірнісними, а які детерміністськими.

Окрім усього перерахованого, математичні моделі характеризуються різною глибиною обліку фізичних і хімічних явищ. Одні моделі використовують системи диференціальних рівнянь, що відбивають принципи збереження маси, енергії і моменту, інші моделі використовують прості емпіричні формули і правила. Одна і та ж модель може враховувати різні явища з різною глибиною і рівнем дискретизації. Усе це цілком визначається кінцевою метою, з якою створювалася ця модель.

Модель Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (CFAST)[1] враховує поширення диму і газів і розподіл температури в приміщеннях будівлі, в якій відбувається пожежа. Кожне приміщення умовно ділиться на два шари: верхній (відносно гарячий) шар і нижній (відносно холодний) шар.

Враховується перенесення маси і тепла горизонтальними і вертикальними потоками повітря (рис. 1).

Математично модель є задачею Коші (початкове завдання) для системи звичайних диференціальних рівнянь. Ці рівняння є наслідками закону збереження мас і закону збереження енергії (у вигляді першого закону термодинаміки).

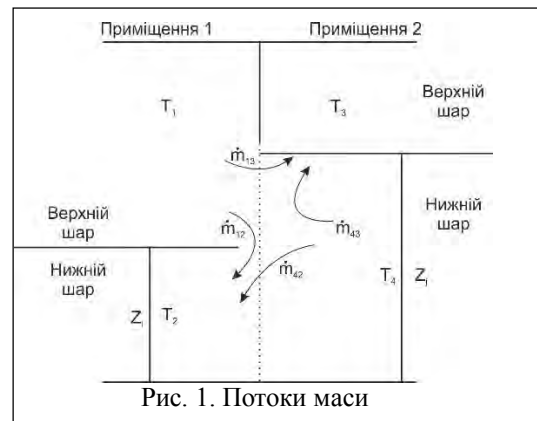


Рис. 1. Потоки маси

Вогонь в цій моделі – це причина втрати маси палива і джерело енергії. У кожному приміщенні горіння задається окремо. Піроліз не включений в цю модель, і його параметри задаються користувачем для кожного випадку окремо. Вплив теплового випромінювання на піроліз безпосередньо не враховується. Враховується вплив пониження концентрації кисню, викликаний горінням, на саме горіння. Висота шару моделюється згідно рівнянню Хескестада.

В якості початкових даних модель вимагає завдання термодинамічних властивостей і теплоти згорання усіх матеріалів (стіни/підлога/стеля, пожежне навантаження), сполучення між приміщеннями (двері, вікна), вертикальних потоків повітря (отвори в стелі, вентиляція) та ін. Усі матеріали розглядаються як гомогенні.

В результаті застосування моделі отримуємо наступні дані: температури верхнього і нижнього

шарів, температури стін/підлоги/стелі, концентрації диму і газів у верхньому і нижньому шарах, температури об'єктів, що цікавлять нас, і час спрацьовування системи пожежогасіння. Усі дані виходять для кожного з приміщень, що беруть участь в розрахунку.

Апробація моделі була проведена за допомогою значних серій натурних експериментів і показала точність близько 10 – 25%.

Методика Computational Fluid Dynamics (CFD)[2] дозволяє розрахувати потоки газів і рідин, а також розподіл температури і тиску та інші величини. Ця методика заснована на постановці і рішенні крайових і початкових завдань для систем диференціальних рівнянь, що виражають закони збереження маси, моментів і енергії. Такі завдання вирішуються за допомогою чисельних методів на комп'ютері (наприклад, методом кінцевих елементів). Ця методика вирішує дуже широке коло проблем, пов'язаних з фізикою потоків рідини і газів.

Найбільш відомі програмні продукти, що використовують методику CFD:

- ANSYS CFX;
- FLUENT;
- STAR – CD;
- FLOW VISION;
- FEATFLOW.

Багато з програмних продуктів, що використовують методику CFD, не містять в собі засобу CAD (засоби для креслення і обробки векторної графіки: будівельні, конструкторські креслення і т.д.) і вимагають придбання таких засобів у сторонніх розробників.

У роботі [3] виконувався аналіз експериментальних даних, отриманих в натурному експерименті по розвитку пожежі в спальні готелю і даних комп'ютерної симуляції цієї пожежі. Натурний експеримент був виконаний Національним Інститутом Стандартів і технології США (US National Institute of Standards and Technology (NIST) в 1985 році. Комп'ютерна симуляція здійснювалася з використанням моделі CFD за допомогою програми Flovent 3.2. Участь в натурному і комп'ютерному експериментах брало приміщення спальні готелю. Повна маса пожежного навантаження склала 53.7 кг і складалася з: двоспального ліжка, нічного столика і сміттового кошику (у якій знаходився осередок займання). Стіни приміщення були зроблені з клеєної фанери, стелю і вогнетривкого гіпсокартону, підлога – бетонна. Двері розміром 0.76 м × 2.03 м були відкриті в інше приміщення, з якого могло поступати повітря.

При моделюванні передбачалося, що усі предмети являються сірими тілами з коефіцієнтом чорноти  $\epsilon = 0,9$ . Було прийнято, що 35% тепла, яке виділяється, поширювалося за допомогою випромінювання, а 65%, що залишилося, – за допомогою конвекції. У моделі враховувалася витрата кисню на

горіння. Формула, що зв'язує витрату кисню з інтенсивністю виділення тепла:

$$m_{O_2} = \frac{1}{V} Q_{tot},$$

де  $k = 13.1-106$  (Дж/кг).

У моделі використовувалося ділення на сітку з числом осередків від 40000 до 180000. Кількість осередків в такому діапазоні не впливала істотним чином на результат. І остаточно була використана сітка з числом 115000 неоднакових осередків і крок за часом – 5 с.

Було отримано дуже хороше погодження результатів моделювання з експериментальними даними для температури в центрі кімнати, температури в різних шарах повітря (на різних відстанях від стелі) і задовільне погодження для швидкостей потоків повітря і масопереносу (що важливе для розрахунку поширення диму).

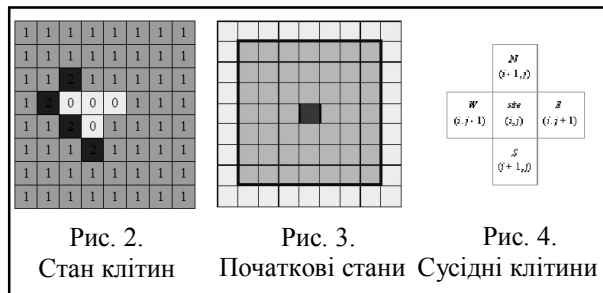
У роботі [4] пропонується модель поширення пожежі, заснована на кінцевих ланцюгах Маркова. Приміщення розбивається на  $n$ -зон, вводиться поняття стану системи, і задається ймовірність переходів між цими станами. Як підкреслюється в роботі, ця модель являється стохастичною на противагу детерміністичним підходам до моделювання розвитку пожежі.

Якщо пожежа в даний момент відбувається в якійсь зоні, то існує деяка ймовірність припинення пожежі, залежна від пожежного навантаження, що знаходиться в цій зоні. Також з деякою вірогідністю пожежа може поширитися в суміжну область (яка ще не була схильна до горіння). Усі можливі способи переходів з одного стану системи в інший описуються квадратною матрицею, що складається з ймовірності цих переходів. За допомогою такої моделі ми можемо отримати ймовірність вигорання зон, середній час вигорання усього приміщення і інші характеристики.

За допомогою клітинних автоматів (КА) авторами [5] моделюється процес поширення лісової пожежі. Область лісу, що вивчається, ділиться на квадрати однакових розмірів, утворюючи сітку розмірів  $N \times N$ . Припустимо, що кожна клітина сітки може знаходитися в одному з трьох станів: 0 або EMPTY – клітина порожня (не містить дерев, здатних горіти), 1 або TREE – клітина містить дерева, здатні горіти і 2 або BURNING, – клітина містить дерева (ця область лісу в даний момент схильна до пожежі), що горять (рис. 2).

Клітини межі області, що вивчається, встановлюються в значення EMPTY, а клітини початкового займання в BURNING (рис. 3).

Припустимо, що поточна клітина має індекси  $(i, j)$ , тоді стан її в наступний момент часу залежатиме від станів 4-х її найближчих сусідів:  $N(i-1, j)$ ,  $W(i, j-1)$ ,  $E(i, j+1)$  і  $S$  (рис. 4).



Вводиться величина  $probCatch$  – ймовірність того, що осередок в стані TREE перейде в стан BURNING, якщо вона має хоч би один осередок по сусідству в стані BURNING у моделі клітинних автоматів.

Обходяться усі осередки сітки з використанням наступного алгоритму:

```

if site is TREE and (N, E, S, or W is BURNING)
    if a random number between 0.0
    and 1.0 is less than probCatch
        return BURNING
else
    return TREE

```

У роботі [6] описується застосування моделі КА для вивчення лісових пожеж. У цій роботі підкреслюється першорядна вага коефіцієнту заповнення пожежного навантаження (дерева, куші і т.ін.). Для того, щоб пожежа могла поширюватися, цей коефіцієнт має бути не менше 59% для моделі КА, що працює з урахуванням 4-х найближчих сусідів, і не менше 41% для моделі КА, що працює з урахуванням 8-ми найближчих сусідів.

Наступним за значимістю чинником є займість палива.

У вказаній роботі використовувалося середовище Swarm – багатоцільова програма для моделювання і аналізу складних систем.

Машинний експеримент показав якісно правильну поведінку моделі при зміні чинників лісової пожежі, що враховувалися в цій роботі. Завдання нахилу поверхні землі призводило до збільшення швидкості поширення у бік підвищення висоти (і зменшенню швидкості у зворотному напрямі), тим більшому, ніж більший нахил був заданий

Збільшення сили вітру призводило до збільшення швидкості поширення пожежі у напрямі потоку повітряних мас. Дія чинників перевірялась в різних комбінаціях і при різних інтенсивностях. В подальшому планувалося врахувати ефекти теплопередачі (конвекцією і випромінюванням) і поширення пожежі внаслідок перенесення вітром частинок, що горять.

Авторами [7] запропоновано математичні та комп'ютерні моделі клітинних автоматів, здатних моделювати мікроскопічні процеси горіння, що дозволило звести обчислювальні методи моделю-

вання макроскопічних процесів горіння до взаємодії між мікроскопічними процесами горіння.

Просторова область процесу поширення пожежі (полігон) являє собою тривимірний простір, представлений тривимірним масивом з наступними максимальними значеннями по кожному виміру:  $numRows$  – число індексів по виміру "r" (row);  $numCols$  – число індексів по виміру "c" (column);  $numSt$  – число індексів по виміру "s" (stratum). Належність індексу до відповідного виміру визначається наступним чином:

$$\begin{aligned}
 r &\in \{0, 1, \dots, numRows - 1\}; \\
 c &\in \{0, 1, \dots, numCols - 1\}; \\
 s &\in \{0, 1, \dots, numSt - 1\}.
 \end{aligned}$$

Кожна компонента тривимірного масиву являє собою клітинний автомат процесу поширення пожежі (КАППП). Конфігурація сусідства клітинного автомата з безпосередньо сусідніми з ним клітинними автоматами визначається його координатами в тривимірному векторному просторі. Існує обмежена кількість конфігурацій  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_{27}\}$ .

Клітинний автомат поширення пожежі має п'ять станів: Passive, Drying, Drying Burn, Pyrolysis, Pyrolysis Burn, Burn, Afterburn.

Passive – пасивний (початковий) стан, що характеризується наявністю певної кількості лісових горючих матеріалів, вологості і температури повітря. Drying – стан процесу сушіння, протягом якого вологість зменшується. Drying Burn – стан процесу сушіння + горіння, протягом якого вологість зменшується, горіння йде за рахунок горючих газів, що надходять до нього від сусідніх з ним клітинних автоматів. Pyrolysis – стан процесу піролізу починається тоді, коли в процесі нагрівання вологість лісових горючих матеріалів стає рівною нулю, і починається виділення летких речовин, в тому числі і горючих газів. Burn – стан процесу горіння, протягом якого відбувається процес виділення і вигорання горючих газів. After Burn – стан процесу охолодження після закінчення процесу горіння.

В результаті комп'ютерного моделювання процесу горіння в обраних клітинах встановлено, що зміна температури в клітці йде приблизно з однаковою швидкістю. Максимальна температура досягається в момент переходу зі стану піроліз + горіння (Pyrolysis Burn) в стан горіння (Burn). Падіння температури після переходу від піролізу-горіння до горіння, пов'язано з тим, що горючі гази надходять лише з сусідніх клітин і відсутня енергія піролізу.

Зміна кількості горючих газів залежить від поточного стану клітини і досягає максимуму у момент переходу від піроліз + горіння (Pyrolysis Burn) до горіння (Burn). Величина максимуму зростає в міру віддалення клітини від джерела горіння. Це пов'язано із загальною кількістю клітин виділяють горючі гази.

Отримані (в результаті комп'ютерного моделювання процесу горіння) залежності зміни температур і мас горючих газів в часі підтвердили правильність побудови математичних моделей клітинних автоматів. Система клітинних автоматів дозволила звести обчислювальні методи моделювання макроскопічних процесів горіння до взаємодії мікроскопічних процесів горіння між собою.

Автори [8] використовують КА для розрахунку розповсюдження пожежі та задимлення у великих будівлях.

Просторова структура КА представлена сіткою клітин, які можуть бути зазначені в будь-яких розмірах. У даному випадку просторова рамка для обох автоматів представлена як кінцева двовимірна ортогональна сітка з квадратних осередків. Прилегла структура обмежена районом навколо кожної комірки. Використовується Мооге-подібна форма (рис. 5) сусідства (клітина стану плюс його вісім оточуючих клітин).

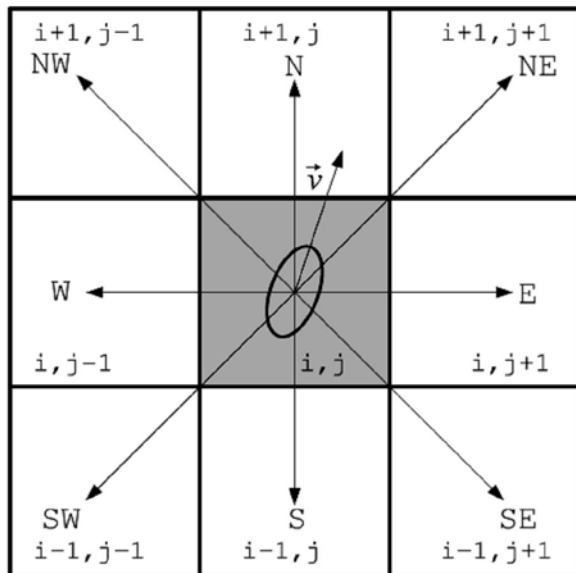


Рис. 5. Просторова структура КА

Змінні стану клітинного автомата представлені набором атрибутів, які описують свої "стани" у певний момент часу. У разі пожежі автомат значень комірок може бути:

0 = EMPTY (описує осередок, який застрахований від пожежі (або вже спалений, або неможливо спалити - наприклад, бетонна стіна);

1 = UNBURNED (описує осередок з наявністю матеріалів, які можуть горіти, але ще не зайнялись);

2 = BURNING (описує осередок, який горить).

Використано еліпсоїдну модель розповсюдження вогню і вектор швидкості повітряного потоку  $\vec{v}$  для осередку займання.

Клітинний автомат поширення диму подібний з розробленим для поширення вогню зі збільшеною швидкістю поширення.

Авторами отримано модель, що дозволяє прогнозувати поширення вогню та диму всередині будівель в режимі реального або прискореного часу.

Зважаючи на результати досліджень вищенаведених авторів, можна зробити висновок, що для цілей моделювання поширення пожежі всередині будівель можна використати подібну імовірнісну математичну модель. Вона має ряд переваг перед іншими, зокрема:

- простота програмної реалізації;
- висока швидкість прорахунку;
- лояльні вимоги до апаратного забезпечення.

Проте, повністю обійтись без прорахунку зміни середньооб'ємних параметрів стану газового середовища в приміщеннях будівлі ми не можемо.

Польові моделі пожежі в принципі дозволяють отримати найбільш повну і точну інформацію про досліджуваний процес в порівнянні з будь-якими іншими математичними моделями пожежі, проте далеко не для усіх прикладних пожежно-технічних завдань потрібна така детальна інформація. Для роботи комп'ютеризованого тренажеру в режимі реального часу при прорахунку вищеназваних процесів достатньо використати інтегральну модель пожежі.

## Висновок

Таким чином, здійснений аналіз математичних моделей розвитку пожеж дав можливість оцінити їх основні переваги та недоліки для послідовного використання в комп'ютеризованому тренажері підготовки пожежно-рятувальника.

Подальшими перспективними дослідженнями є вдосконалення та суміщення обраних інтегральної моделі та моделі клітинних автоматів.

## Список літератури

1. CFAST Technical Reference Manual, Natl. Inst. Stand. Technol. Spec. Pub. 1026, 126 pages (December 2005). [Електронний ресурс]. - Режим доступу до ресурсу: <http://fast.nist.gov/Documents/>.
2. Kuzmin D. Course: Introduction to Computational Fluid Dynamics / D.Kuzmin. - Institute of Applied Mathematics University of Dortmund.
3. Manz H. Modelling smoke and fire in a hotel bedroom / H. Manz, W. Xu, M. Seymour. - Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Section Applied Physics in Building, Duebendorf, Switzerland.
4. Моторыгин Ю.Д. Моделирование процессов развития пожаров с помощью конечных цепей Маркова / Ю.Д. Моторыгин, В.А. Ловчиков, Д.А. Поташев, А.В. Муромцев // Вестник Санкт-Петербургского института Государственной противопожарной службы. - 2007. - №3-4. - С. 143-148.
5. Sullivan A.L. A hybrid cellular automata/semi-physical model of fire growth / A.L. Sullivan, I.K. Knight // Proceedings of the 7th Asia-Pacific Conference on Complex Systems Cairns Conventnion Centre, Cairns, Australia 6-10th December 2004.
6. Li X. Modeling fire spread under environmental influence using a cellular automaton approach / X. Li, W. Magill // Complexity International. - 2001. - Volume 08, H01.

7. Филиппенко И.Г. Клеточные автоматы – основа построения математической модели процесса распространения пожара / И.Г. Филиппенко, А.В. Головки // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Вып. № 3/5 (45). – С. 8-13.

Innocenti, A. Aiello, J.-F. Santucci, G. Wainer // *Simulation*. – 2005. – Vol. 81, no 2. – P. 103-117.

Надійшла до редколегії 3.07.2013

8. Muzy A. Cellular Automata Based Simulation for Smoke and Fire Spreading in Large Buildings / A. Muzy, E.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.М. Рудницький, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси.

### АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ПОЖАРОВ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫХ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

М.А. Пустовит

*В статье рассмотрены существующие математические модели развития пожаров. Указаны основные отличия моделей, приведены примеры их применения на практике. Проведенный анализ позволил выбрать интегральную модель пожара и модель клеточных автоматов для усовершенствования с последующим использованием в компьютеризированном тренажерном комплексе подготовки пожарного-спасателя.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, распространение пожара, тренажерный комплекс, подготовка персонала.

### ANALYSIS OF THE EXISTING MATHEMATICAL MODELS OF FIRE SPREAD FOR COMPUTERIZED TRAINING COMPLEXES

M.O. Pustovit

*The article considers the existing mathematical models of fire spread. Specified major differences between models, examples of their application in practice. The analysis has revealed the integral model of fire spread and model of cellular automata to improve with subsequent use in a computerized firefighter training complex.*

**Keywords:** mathematical modeling, fire spread, training complex, personnel training.