

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Головко Олександра Володимирівна

УДК 614.842:004.358

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ
ПОЖЕЖІ В СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту
Міністерства інфраструктури України, м. Харків

Науковий керівник: заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор
Філіппенко Ігор Григорович,
Українська державна академія залізничного транспорту,
кафедра обчислювальної техніки та систем управління,
провідний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Краснобаєв Віктор Анатолійович,
Полтавський національний технічний університет
ім. Юрія Кондратюка,
кафедра комп'ютерної інженерії, завідувач кафедри

кандидат технічних наук, доцент
Жарікова Марина Віталіївна,
Херсонський національний технічний університет,
кафедра інформаційних технологій, докторант

Захист відбудеться «____» _____ 2012 р. о ____ годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 64.051.09 Харківського національного університету
імені В.Н.Каразіна: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. ____

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці
Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна за адресою: 61022,
м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий «____» _____ 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С. І. Шматков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У комплексі забезпечення безпеки багатьох об'єктів природоохоронної зони, промисловості, вузлів зв'язку і транспорту, в тому числі залізничного, істотну роль відіграють заходи щодо зниження ризиків від пожеж у транспортній інфраструктурі. Крім глобального завдання - збереження природних ландшафтів (лісів, луків, річок, посадок і рослинності смуги відчуження) як одного з домінуючих чинників екологічної, кліматичної та промислово-сировинної стабільності регіону, існує і ряд локальних задач оцінки і прогнозу ситуацій з погрозами від ландшафтних пожеж на основі моделювання розвитку їх параметрів у часі та просторі. Така оцінка часто дозволяє визначити, як пожежа в тій або іншій місцевості (для різних варіантів ландшафту) вплине на безпеку функціонування важливого об'єкта, а також прогнозувати, які об'єкти можуть постраждати від пожежі, спричиненої порушенням нормального функціонування, наприклад, підсистем транспортної або навігаційної інфраструктури. В обох випадках для проведення розрахунків необхідні прогностичні дані фактичних параметрів, що характеризують поширення пожежі для місцевості, на якій проводяться дослідження. Місцевість, з розташованими підсистемами транспортної або навігаційної інфраструктури, має специфічну топологію. Це вузька і протяжна частина ландшафту, на якій розташовані компоненти інфраструктури. Внаслідок особливостей розташування приладів транспортної або навігаційної інфраструктури для оцінки небезпеки від процесу поширення горіння по такій місцевості, крім контуру пожежі, є суттєвою температура на висоті 0,25 - 1,75 м від поверхні. Це потрібно для визначення небезпечного і шкідливого впливу процесу окислення на транспортну й навігаційну інфраструктуру. Експериментальні дослідження процесів ландшафтних пожеж в природних умовах є незворотнім процесом і, як наслідок, малоефективним і неприпустимим способом отримання даних про параметри, що характеризують поширення пожежі. Практично єдиною можливістю отримати такі дані на множині вхідних параметрів і оцінити загрози транспортній системі при поширенні ландшафтної пожежі є теоретичні методи дослідження на основі моделювання процесів розповсюдження. Існували: аналітичні, детерміновані та стохастичні методи обчислення витрат горючих матеріалів, контуру пожежі, тепловиділення, швидкості розповсюдження пожежі з урахуванням ландшафту і впливу вітру на площині. Серед відомих методів і способів отримання прогностичних даних про параметри розповсюдження ландшафтних пожеж не було об'єднуючої математичної й комп'ютерної моделі, що дозволила б врахувати всі згадані раніше параметри пожежі в тривимірному просторі. Тому, видається актуальною розробка нових математичних і комп'ютерних моделей, відповідних обчислювальних методів, процедур і програмного забезпечення для моделювання макропроцесу ландшафтної пожежі за допомогою його подання множиною адекватних мікропроцесів горіння. При цьому обчислюються наступні параметри: об'ємний контур пожежі, витрата горючих матеріалів, тепловиділення, швидкість розповсюдження пожежі з урахуванням параметрів ландшафту і вітру для вироблення й прийняття рішення. Саме ці обставини визначають вирішення

науково–прикладної задачі, яка полягає в розробці моделей та методів прогнозування розвитку об'ємної пожежі на основі клітинних автоматів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. У державній цільовій науково-технічній програмі створення державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами (затвердженої Постановою Кабінету Міністрів України № 834 від 17.09.2008 далі-Програма) зазначено: "Сучасні досягнення в області інформаційних технологій, зв'язку, навігації та спостереження, їх інтеграція у межах єдиної інформаційної системи дають можливість забезпечити належний рівень безпеки руху, підняти ефективність використання всіх видів транспорту". У програмі також, зазначено: "Основним способом вирішення проблеми є виконання науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, проведення організаційно-технічних заходів та розробка нормативно-правових актів". Так, п'яте завдання (додаток 3) Програми, сформульоване як: "Створення та розвиток інтегрованих систем і пристроїв навігації". Моделювання розвитку пожеж, з раннім виявленням їх параметрів, дозволяє зменшити ймовірність їх шкідливого впливу на важливі об'єкти залізничної і навігаційної інфраструктури і, як наслідок, підвищити працездатність і безпеку таких об'єктів інфраструктури.

Дисертаційна робота виконана на факультеті автоматики, телемеханіки та зв'язку Української державної академії залізничного транспорту. Тематика, якій присвячена робота, пов'язана з участю співробітників факультету і кафедри обчислювальної техніки та систем управління разом з автором дисертації в роботі над НДР України «Математичні та комп'ютерні моделі процесу розповсюдження лісових пожеж» номер державної реєстрації ДР 0110U004146, "Розробка пропозицій по удосконаленню верхнього рівня мікропроцесорної системи гіркової автоматичної централізації (МП ГАЦ)" номер державної реєстрації ДР 0107U007061 та «Дослідження та розробка дослідного зразка напівпровідникового реле напруги» номер державної реєстрації ДР 0110U000731, де автор був дослідником.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є визначення параметрів пожежі та оцінки наявності загроз об'єктам транспортної інфраструктури на основі розробки та удосконалення математичних моделей і методів теорії кліткових автоматів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання дослідження**:

— проаналізувати дослідження в області моделювання ландшафтних пожеж на базі клітинних автоматів, провівши критичну оцінку з виявленням сутності та особливостей існуючих методів і засобів такого моделювання. Вибрати напрямки дослідження для створення моделей, що враховують об'ємний контур пожежі, витрати горючих матеріалів, тепловиділення, швидкість поширення пожежі;

— синтезувати математичну модель процесів тепло- і масообміну на базі елементів фізичних і хімічних моделей процесу горіння рослинних горючих матеріалів в обмеженому обсязі у вигляді клітинного автомата;

— розробити модель об'ємної пожежі на базі сукупності запропонованих клітинних автоматів, які враховують вплив вітру з ціллю визначення швидкості розповсюдження вогню у всіх напрямках;

— розробити метод дослідження загроз від горіння лісосмуг у безпосередній близькості від важливих об'єктів транспортної і навігаційної інфраструктури для визначення параметрів розповсюдження вогню в тривимірному просторі на основі врахування паралельних процесів горіння;

— провести порівняння результатів моделювання з еталонним експериментом і впровадити отримані результати у навчальний процес та на дослідних підприємствах галузі з метою розробки пропозицій по корегуванню нормативних документів для підвищення безпеки.

Об'єкт дослідження – процес розповсюдження ландшафтної пожежі в системах транспортної інфраструктури.

Предмет дослідження – моделі та методи прогнозування загроз (руйнування будівель, колій, вихід з ладу устаткування автоматки) від поширення ландшафтної пожежі у системах транспортної інфраструктури на основі клітинних автоматів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовувалися теоретичні методи формалізації для подання пожежі у вигляді множини мікропроцесів, що проходять паралельно, гіпотези про доцільність представлення процесу горіння безліччю мікропроцесів, системного підходу для комплексного уявлення пожежі як системи паралельних мікропроцесів. Також використовуються теорія графів і алгебра предикатів, методи представлення диференціальних рівнянь різницевами.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертації вирішена наукова задача розробки моделей процесу поширення ландшафтної пожежі уздовж транспортної інфраструктури на основі подання макропроцесу пожежі адекватною систематизованою множиною паралельних мікропроцесів горіння для прогнозування можливих загроз.

Наукова новизна отриманих результатів визначається наступними положеннями:

1) вперше розроблена математична модель об'ємного макропроцесу поширення пожежі, побудована на основі взаємодіючих між собою моделей паралельних мікропроцесів горіння, роль яких виконують клітинні автомати; ця модель, на відміну від відомих моделей, враховує фізику процесу горіння, більш точно відображує умови місцевості, що відповідають полігонам транспортної інфраструктури і є основою для прогнозування наслідків пожеж;

2) отримав подальший розвиток метод врахування впливу вітру на розповсюдження пожежі за рахунок обчислення коефіцієнтів вітру по всіх напрямках тривимірної моделі, що, на відміну від існуючих методів, дає можливість обчислювати швидкість поширення вогню у всіх напрямках;

3) вдосконалено імітаційний метод обчислення параметрів розповсюдження вогню в об'ємі на базі процесів горіння, що ідуть паралельно, який, на відміну від відомих методів, додатково враховує склад повітря та температуру по висоті зони горіння, що дозволило отримати просторово-часові залежності параметрів пожежі для залізничної транспортної інфраструктури.

Практичне значення одержаних результатів. На основі сукупності розроблених моделей і методів запропонована імітаційна модель розповсюдження пожежі з можливістю обчислення температури та інших характеристик об'ємної зони пожежі. Отримані результати впроваджені на залізничному транспорті в Державному науково-дослідному центрі залізничного транспорту (акт про впровадження ДП ДНЦ УЗ УЗ від 07.09.2010).

Отримані в роботі модель та методи використовуються в процесі навчання і підвищення кваліфікації кадрів Інституту підвищення кваліфікації та перепідготовки кадрів Української державної академії залізничного транспорту (акт про впровадження № 10 від 05.10.2010 ППК УкрДАЗТ).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення, розробки та результати досліджень, які виносяться на захист, отримані особисто автором. Наукові праці [3, 5] виконані автором без співавторів. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора такий.

У роботі [1] синтезований клітинний автомат на базі предикатів з висловлюванням, що моделює процес поширення пожежі на площині в загальному випадку з розташованими на ній горючими матеріалами різної температури займистості.

У роботі [2] запропоновано математичні та комп'ютерні моделі клітинних автоматів, здатних моделювати мікроскопічні процеси горіння лісової пожежі.

У роботі [4] синтезована автором система клітинних автоматів реалізує модель макропроцесу розповсюдження пожежі як систему взаємодіючих між собою мікропроцесорних процесів горіння, роль яких виконують клітинні автомати.

У роботі [6] запропоновано ідею створення на базі двополярного ключа-вимикача двополярного універсального перемикача, виконуючого функцію трійника контактів.

У роботі [7] запропоновано математичний апарат для ранжирування ризиків небезпечної діяльності у випадках відсутності однозначних кількісних оцінок.

У роботі [8] запропоновано синтез математичного апарату для оцінки й прогнозування кількості порушень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та схвалені на науково-технічних конференціях:

— міжнародна науково-практична конференція "Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте 2010". Одеський національний морський університет, 2010 р., (м. Одеса);

— десята науково-практична конференція "Перспективи впровадження технічних засобів безпеки руху на залізницях України". Міністерство транспорту та зв'язку України. Державна адміністрація залізничного транспорту України, 2010 р., (м. Хмельник);

— 22-а, 23-а міжнародні науково-практичні конференції "Перспективні комп'ютерні, керуючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України" (2009, 2010 роки), (м. Алушта);

— науково-технічні конференції і семінари УкрДАЗТ упродовж 2004-2010 років.

Дисертація повністю доповідалась на семінарі кафедри обчислювальної техніки та систем управління Української державної академії залізничного транспорту, а також на семінарі кафедри мехатроніки автотранспортних засобів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету та на науково-технічній нараді в Державному науково-дослідному центрі залізничного транспорту.

Публікації. За результатами проведених дисертаційних досліджень автором опубліковано 12 наукових робіт, з них: сім статей у спеціалізованих виданнях переліку ВАК України; три тези міжнародних науково-практичних конференцій; одна доповідь на галузевій науково-практичній конференції Головного управління інформаційних технологій Державної адміністрації залізничного транспорту України (Уркзалізниці); одна доповідь на десятій науково практичній конференції Головного управління безпеки руху та екології Укрзалізниці та один патент України.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел із 178 найменувань та 6 додатків. Обсяг роботи 140 сторінок, у тому числі 139 сторінок машинописного тексту, 25 рисунків, 15 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено об'єкт та предмет дослідження, сформульовано його мету, задачі, новизну та практичну значущість отриманих результатів. Викладено основні наукові результати, що виносяться на захист, визначено особистий внесок дисертанта, подано відомості про апробацію результатів дослідження, вказано кількість публікацій.

У першому розділі проведено критичний аналіз досліджень математичних моделей процесу розповсюдження пожеж взагалі та ландшафтних зокрема. На базі статистичних даних електронних джерел показано доцільність подальшого дослідження небезпечного та некерованого природного явища – ландшафтної пожежі. Проведено класифікацію моделей пожеж, починаючи від досліджень Курбатського Н.П. (60-70-і роки минулого століття), які вираховували вплив природного середовища на окремі показники розповсюдження пожеж, до сучасних більш загальних моделей динаміки пожеж, як зарубіжних авторів (Гарднер, Бьорк, Sullivan, Янсети), так і вітчизняних (Абрамов Ю.А., Тарасенко А.А, Гвоздь В.М. й інші). Виділено моделі оперативної оцінки показників розповсюдження пожежі, отримано наступні результати: проаналізовано існуючі моделі кліткових автоматів розповсюдження полум'я, виявлені головні недоліки наявних моделей, визначено актуальні задачі розробки моделей представлення макропроцесу розповсюдження пожежі адекватною множиною мікропроцесів горіння. Розроблено логічну схему синтезу математичних і комп'ютерних моделей ландшафтної пожежі на територіях транспортної інфраструктури.

Обґрунтовано доцільність досліджень із застосування для математичного моделювання процесу розповсюдження пожежі в системах транспортної інфраструктури детермінованих, прогностичних математичних моделей на базі тривимірного кліткового автомата.

У **другому розділі** синтезується клітковий автомат розповсюдження пожежі. Описується склад зони до початку та під час протікання горіння. Далі враховуються фізичні та хімічні процеси, які має моделювати автомат: сушку, піроліз і горіння. Встановлено залежності, за допомогою яких вони моделюються.

При сушінні відбувається зміна масової концентрації води ρ_2 , пов'язаної з сухою органічною речовиною (пов'язана з сухою органічною речовиною вода випаровується з РГМ). Позначаючи $\Delta\rho_2$ зміну ρ_2 за одиницю часу. Для опису сушки РГМ використали наступну модель :

$$-\Delta\rho_{2суш} = -k_2 \rho_{2суш} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \quad (1)$$

де $\Delta\rho_{2суш}$ – масова швидкість зникнення води, пов'язаної з сухою органічною речовиною (кг/с), k_2 , (c^{-1}) E_2 , (К) – постійні, отримані експериментально для різних типів РГМ; R – газова постійна; T – температура в кельвінах.

Кількість тепла, що поглинається при сушці:

$$\Delta Q_{суш} = 2240 \text{ Дж/кг}. \quad (2)$$

Маса сухої органічної речовини ρ_1 зменшується при піролізі. Позначимо $\Delta\rho_{1пір}$ зміну ρ_1 за одиницю часу. Для опису піролізу РГМ будемо використовувати наступну модель:

$$-\Delta\rho_{1пір} = k_1 \rho_{1пір} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad (3)$$

де k_1 , (c^{-1}) E_1 , (К) – постійні, отримані експериментально для різних типів РГМ; R – газова постійна; T – температура в кельвінах.

У процесі піролізу виділяється коксик. Позначимо масу коксика, що виділяється, як ρ_3 , та позначимо як $\Delta\rho_3$ зміну ρ_3 за одиницю часу. Тоді вираз матиме вигляд:

$$\Delta\rho_3 = a_c k_1 \rho_{1пір} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) = a_c \Delta\rho_{1пір}, \quad (4)$$

де $\Delta\rho_{1пір}$ – масова швидкість зміни сухої органічної речовини при піролізі (кг/с); ρ_1 (кг) – поточна маса сухої органічної речовини в елементі РГМ; $\Delta\rho_{3пір}$ – масова швидкість зміни коксика при піролізі (кг/с), k_1 , (c^{-1}) E_1 , (К) a_c (коксове число) – постійні, отримані експериментально для різних типів РГМ; R – газова постійна; T – температура в кельвінах.

В процесі піролізу тепло може як поглинатись, так і виділятись. Кількість тепла, що поглинається або виділяється $\Delta Q_{пір}$, залежить від температури піролізу:

$$\Delta Q_{\text{пир}} = \begin{cases} -370000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} & \text{при } T < 593 \text{ К} \\ 0 & \text{при } T = 593 \text{ К} \\ 1000000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} & \text{при } T > 593 \text{ К} \end{cases} \quad (5)$$

Крім коксиду в процесі піролізу виділяються горючі газоподібні продукти піролізу (монооксид вуглецю CO , водень H_2) з масовою концентрацією ρ_7 . Позначимо $\Delta \rho_7$ зміну ρ_7 за одиницю часу. Тоді в процесі піролізу масова швидкість зміни $\Delta \rho_7$ має вигляд:

$$\Delta \rho_7 = D_{\text{горгаз}} \Delta \rho_1, \quad (6)$$

де $\Delta \rho_{1\text{пир}}$ – масова швидкість зміни сухої органічної речовини при піролізі (кг/с); $D_{\text{горгаз}}$ – постійні, отримані експериментально для різних типів РГМ.

При горінні відбувається зменшення масової концентрації горючих газів – ρ_7 , і збільшення CO_2 – ρ_9 , а також води в вигляді пару ρ_{10} , як продуктів процесу горіння. Для розрахунку швидкості екзотермічної реакції окислення вуглеводневого палива киснем використовується сумарне кінетичне рівняння в формі Аррениуса:

$$\Delta \rho_{7\text{гор}} = -A_T \sqrt{T} \rho_7^{\nu_T} \rho_8^{\nu_0} \exp\left(-\frac{E_T}{RT}\right), \quad (7)$$

де $\Delta \rho_{7\text{гор}}$ – кількість палива, що згорає за одиницю часу в одиниці об'єму; A_T – постійна; ρ_7 , ρ_8 – масової концентрації відповідно горючих газів і кисню; E_T , (К) – постійні, отримані експериментально; ν_T , ν_0 – порядки реакції по паливу і кисню.

Кількість кисню, що згорає при окисленні $\Delta \rho_7$ палива:

$$\Delta \rho_{8\text{гор}} = l_0 \Delta \rho_7, \quad (8)$$

де l_0 (кг/кг) – кількість кисню (в кг) необхідне для повного згорання 1 кг палива. При згоранні $\Delta \rho_7$ палива виділяється тепло в кількості:

$$\Delta Q_{\text{гор}} = H_0 \Delta \rho_7, \quad (9)$$

де H_0 – нижча теплотворна здатність палива.

Продукти реакції окислення палива це вуглекислий газ і вода. Швидкість появи вуглекислого газу CO_2 :

$$\Delta \rho_{9\text{гор}} = \frac{11}{3} C \Delta \rho_7. \quad (11)$$

Швидкість появи води $\text{H}_2 \text{O}$:

$$\Delta \rho_{10\text{гор}} = 9H \Delta \rho_7. \quad (12)$$

Визначений набір базових формул для відображення процесу горіння в КАПРП (клітковому автоматі процесу розповсюдження пожежі). Синтезований КА шляхом визначення набору: $A = \{Z^3, M, E_n, K, \phi\}$,

де Z^3 – множина векторів (z_1, z_2, z_3) , що визначають положення кліткового автомата в однорідній структурі та відображають положення відповідного об'єму в просторі полігону, на відміну від існуючих плоских моделей;

M – множина кортежів виду $(a_1, a_2, \dots, a_{16})$, що є параметрами, що визначають склад зони горіння і температуру, в відомих клітинних автоматах не більше чотирьох параметрів;

E_7 – множина станів кліткового автомата $= \{0, 1, \dots, 6\} = \{\text{Passive, Drying, DryingBurn, Pyrolysis, PyrolysisBurn, Burn, AfterBurn}\}$, її елементи – стани КА, що відображають процес горіння, на відміну від існуючих, де обмежуються трьома станами { не горіло, горить, згоріло };

$K = \{k_1, k_2, \dots, k_{n-1}\}$ – множина конфігурацій сусідства кліткового автомата в тривимірному просторі, що визначають для кожної клітини її околицю;

$\Phi: A \rightarrow A$ – локальна функція правил переходу кліткового автомата зі стану в стан, що відображає зміну параметрів і станів кліткового автомата, як внаслідок взаємодії з сусідами, так і внаслідок перерахунку значень параметрів під дією процесів у самій клітині.

КАППП – $\vec{a}(t) = \{ (z_1, z_2, z_3), (a_1, a_2, \dots, a_{16}) e(t) \} \in A$

Визначено набір параметрів кліткового автомата процесу розповсюдження пожежі та стани (таблиця 1), які враховують особливості транспортної інфраструктури.

Таблиця 1

Зв'язок параметрів класу Cell зі складовими зони пожежі

НАБІР ПАРАМЕТРІВ	НАБІР СТАНІВ
<p>T – Температура z – маса сухого РГМ першої складової w – вологість РГМ першої складової ρ_1 Md1 – маса сухого РГМ другої складової ρ_2 Md2 – вологість РГМ другої складової ρ_3 Md3 – масова частка коксиду ρ_4 Md4 – масова частка попелу ρ_5 Md5 – масова частка сажі в об'ємі ρ_6 Md6 – масова частка попелу в об'ємі ρ_7 Md7 – масова частка горючих газоподібних продуктів піролізу в об'ємі ρ_8 Md8 – масова частка кисню повітря ρ_9 Md9 – масова частка вуглекислого газу ρ_{10} Md10 – масова частка водяного пару ρ_{11} Md11 – масова частка інертних газів dEn – приріст енергії Sost – стан кліткового автомата</p>	<p>Орієнтований граф G переходів між станами кліткового автомата</p>

У відповідності з процесами, що потребують відображення, визначено набір станів КАППП :

Passive 1 - пасивний стан, стан клітини до горіння, температура від

початкової (поточна температура повітря) до нижньої температури сушіння, завантаження РГМ і вологість співпадає з початковою.

Drying 2 - сушіння, температура від нижньої температури сушіння, завантаження РГМ співпадає з початковою, вологість зменшується.

DryingBurn 3 - сушіння + горіння, температура від нижньої температури горіння, завантаження РГМ співпадає з початковим, вологість зменшується, горіння йде за рахунок горючих газів, що надходять з сусідніх клітин.

Pyrolysis 4 - стан піролізу, температура від нижньої температури піролізу до нижньої температури горіння, завантаження РГМ зменшується, вологість дорівнює нулю.

PyrolysisBurn 5 - стан піролізу + горіння, температура від нижньої температури горіння, завантаження РГМ зменшується, вологість дорівнює нулю.

Burn 6 - стан горіння, температура від нижньої температури горіння завантаження РГМ менше або дорівнює масі залишку, що не згорає, вологість дорівнює нулю, горіння йде за рахунок залишків горючих газів.

AfterBurn 0 - стан після горіння, температура зменшується, завантаження РГМ менше або дорівнює масі залишку, що не згорає, вологість дорівнює нулю, залишків горючих газів менше ніж необхідно для підтримання горіння.

Матриця суміжності A_{SM} графа G з кінцевим числом вершин n (пронумерованих числами від 0 до $n-1$) - це квадратна матриця A розміру n , в якій значення елемента a_{ij} дорівнює числу ребер з i -ї вершини графа в j -ту вершину. У даному випадку

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{якщо ребро і-ї вершини в } j\text{-у} \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad \text{і тоді } A_{SM} = \begin{pmatrix} 1000000 \\ 0110000 \\ 0011110 \\ 0001110 \\ 0000111 \\ 0000011 \\ 1000001 \end{pmatrix}.$$

Матриця композиції відношення $A^2 = A \circ A = (a^2_{ij})_{n \times n} = (\sum_k a_{ik} a_{kj}) = (a_{i1} \wedge a_{1j}) \vee (a_{i2} \wedge a_{2j}) \vee \dots \vee (a_{in} \wedge a_{nj})$, де \wedge — кон'юнкція, а \vee — диз'юнкція. Матриця A^k композиції $\underbrace{A \circ \dots \circ A}_k$ для $k: 1 \leq k \leq n$, визначає наявність переходів довжини k з i -го стану КА в j -е.

$$A^2_{SM} = \begin{pmatrix} 1000000 \\ 0111110 \\ 0011110 \\ 0001110 \\ 1000110 \\ 1000010 \\ 1000000 \end{pmatrix} \dots A^7_{SM} = \begin{pmatrix} 1000000 \\ 1111110 \\ 1011110 \\ 1001110 \\ 1000110 \\ 1000010 \\ 1000000 \end{pmatrix}$$

Матриця досяжності $A^* = A \vee A^2 \vee \dots \vee A^n = (a^*_{ij})_{n \times n} = ((a_{ij} \vee a^2_{ij} \vee \dots \vee a^n_{ij}))$

$$A^*_{SM} = A_{SM} \vee A^2_{SM} \vee \dots \vee A^7_{SM} = \begin{pmatrix} 100000 \\ 111111 \\ 101111 \\ 100111 \\ 100011 \\ 100001 \\ 100000 \end{pmatrix}$$

$$a^*_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{якщо перехід } i \rightarrow j \text{ у} \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases}$$

визначає наявність переходів будь-якої довжини з i -го стану КА в j -ий.

При переході від моменту часу t до моменту $t + \Delta t$ правила зміни стану клітинного автомата (функція $\phi(a)$) повинні враховувати, як взаємодію між сусідніми клітинами, так і стан самої клітини і відповідний йому процес всередині. Введемо дві функції P_1 , що визначає взаємодію клітини з сусідами, і P_2 , що обчислює зміну параметрів внаслідок процесу всередині клітини і визначає стан клітини на наступному кроці.

Тоді функцію ϕ можна визначити, як суперпозицію функцій P_1 і P_2 :

$$\phi(a) = P_2(P_1(a))$$

У свою чергу $P_2(a)$ матиме вид:

$$P_2(a(t, \epsilon_t)) = \begin{cases} T_P(a), & \text{якщо } \epsilon_t = \text{Passive} \\ T_D(a), & \text{якщо } \epsilon_t = \text{Drying} \\ T_{DB}(a), & \text{якщо } \epsilon_t = \text{DryingBurn} \\ T_{PZ}(a), & \text{якщо } \epsilon_t = \text{Pyrolysis} \\ T_{PZB}(a), & \text{якщо } \epsilon_t = \text{PyrolysisBurn} \\ T_B(a), & \text{якщо } \epsilon_t = \text{Burn} \\ T_A(a), & \text{якщо } \epsilon_t = \text{AfterBurn} \end{cases}$$

так як пов'язаний зі станами клітинного автомата.

У свою чергу функція $P_2(a)$ визначається функціями з множини T , які відображають збільшення, пов'язані з джерелами усередині клітини. Приріст маси, імпульсу і енергії прийме вигляд:

$$\begin{cases} M_{\text{внутр}} = \int_{\tau-\Delta\tau}^{\tau+\Delta\tau} dt \int_{\Delta V} \Delta \rho_i dV \text{ при } i=1, 11 \\ I_{\text{внутр}} = \int_{\tau-\Delta\tau}^{\tau+\Delta\tau} dt \int_{\Delta V} \Delta P dV \\ W_{\text{внутр}} = - \int_{\tau-\Delta\tau}^{\tau+\Delta\tau} dt (\Delta Q_{\text{гор}} + \Delta Q_{\text{оп}} + \Delta E_{\text{власн}} - \Delta Q_{\text{еуц}}) dM \end{cases}$$

де $\Delta \rho_i$ – об'ємна потужність джерела i -го компонента в елементі dV ; ΔP – об'ємна потужність джерела імпульсу, що передається потоку суміші газоподібних компонентів від твердої фази, що розкладається; $\Delta Q_{\text{гор}}$, $\Delta Q_{\text{еуц}}$ – об'ємна

потужність стоку джерела енергії за рахунок горіння палива та випаровування у факелі, $\Delta Q_{\text{пир}}$ – об'ємна потужність джерела енергії при піролізі, $\Delta E_{\text{влас.випр.}}$ – об'ємна потужність стоку джерела енергії за рахунок випромінювання в об'ємі ΔV . Для конденсованої фази при $i=1, 2, 3, 4$ приріст маси цим i обмежується. Початкові умови в клітині, що не є джерелом вогню (момент часу $\tau=0$):

$$\begin{cases} T|_{\tau=0} = T_{\text{ноч}} \\ \rho_i|_{\tau=0} = \rho_{i\text{ноч}} \text{ при } i = 1, 1, 1 \\ \Delta \Psi|_{\tau=0} = 0 \end{cases}$$

Кожну з функцій $T_j()$ множини T можна уявити, як суперпозицію функцій $f_j(): \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A}$, і $q_j(): \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A}$, для $j=0, 1, \dots, 6$:

$$T_j(\vec{a}) = f_j(q_j(\vec{a})),$$

де функція $q_j()$ відображає процеси, відповідні j -му стану, а функція $f_j()$ визначає перехід у новий стан з j -го стану. Функції $q_j()$ і $f_j()$ мають вигляд вектора:

$$q_j(\vec{a}) = \{q_{j1}(\vec{a}), q_{j2}(\vec{a}), \dots, q_{j19}(\vec{a})\}, \quad f_j(\vec{a}) = \{f_{j1}(\vec{a}), f_{j2}(\vec{a}), \dots, f_{j19}(\vec{a})\},$$

де аргумент функції $\vec{a}(t) = \{(r, c, s), (a_1, a_2, \dots, a_b), e(t)\}$,

($q_{j1}()$, $q_{j2}()$, $q_{j3}()$) та ($f_{j1}()$, $f_{j2}()$, $f_{j3}()$) визначають положення автомата і тому:

$$q_{j1}(\vec{a}) = r, q_{j2}(\vec{a}) = c, q_{j3}(\vec{a}) = s,$$

$$f_{j1}(\vec{a}) = r, f_{j2}(\vec{a}) = c, f_{j3}(\vec{a}) = s,$$

так як функція положення автомата не змінює.

Також у цьому розділі подано у вигляді графів і функцій правила переходу між станами з урахуванням умов, що накладаються на значення параметрів, що входять до складу функції $P_2(a)$, а саме функції $f_j()$, що визначає перехід у новий стан. Наприклад функції переходу з стану *Passiv*, та зі стану *Drying*:

$$f_{P19}(\vec{a}) = \begin{cases} \text{Passive} & T < T_{\text{Dr}} \\ \text{Drying} & T \geq T_{\text{Dr}} \end{cases}$$

$$f_{D19}(\vec{a}) = \begin{cases} \text{Drying} & Md \geq 0 \wedge (T < T_{\text{Bu}} \vee Md \leq \text{ost_Md}) \\ \text{DryingBurn} & T < T_{\text{Bu}} \wedge Md \geq 0 \wedge Md > \text{ost_Md} \\ \text{PyrlsBurn} & T \geq T_{\text{Bu}} \wedge Md \geq 0 \wedge Md > \text{ost_Md} \\ \text{Pyrolys} & Md \leq 0 \wedge (T < T_{\text{Bu}} \vee Md \leq \text{ost_Md}) \end{cases}$$

Умовні позначення і смислові значення параметрів і констант, що використовуються в функціях наведені в таблиці 2.

На рис.1 подано правила переходу зі стану *Passiv* і *Drying* у вигляді графів з урахуванням умов, що накладаються на значення параметрів.

Умовні позначення і смислові значення параметрів і констант, наведені в графах переходів КАПРП

Умовні позначення	Смислові значення
T	Температура в КАПРП
T_Dry	Температура, при якій починається процес сушки
T_Bur	Температура, при якій починається процес горіння
Md1	Маса сухого РГМ в КАПРП
Md2	Масова частина вологи в КАПРП
Md7	Маса горючих газів в КАПРП
ost_Md1	Мінімально необхідна маса сухого РГМ для продовження процесу піролізу
ost_Md7	Мінімально необхідна маса горючих газів для продовження процесу горіння

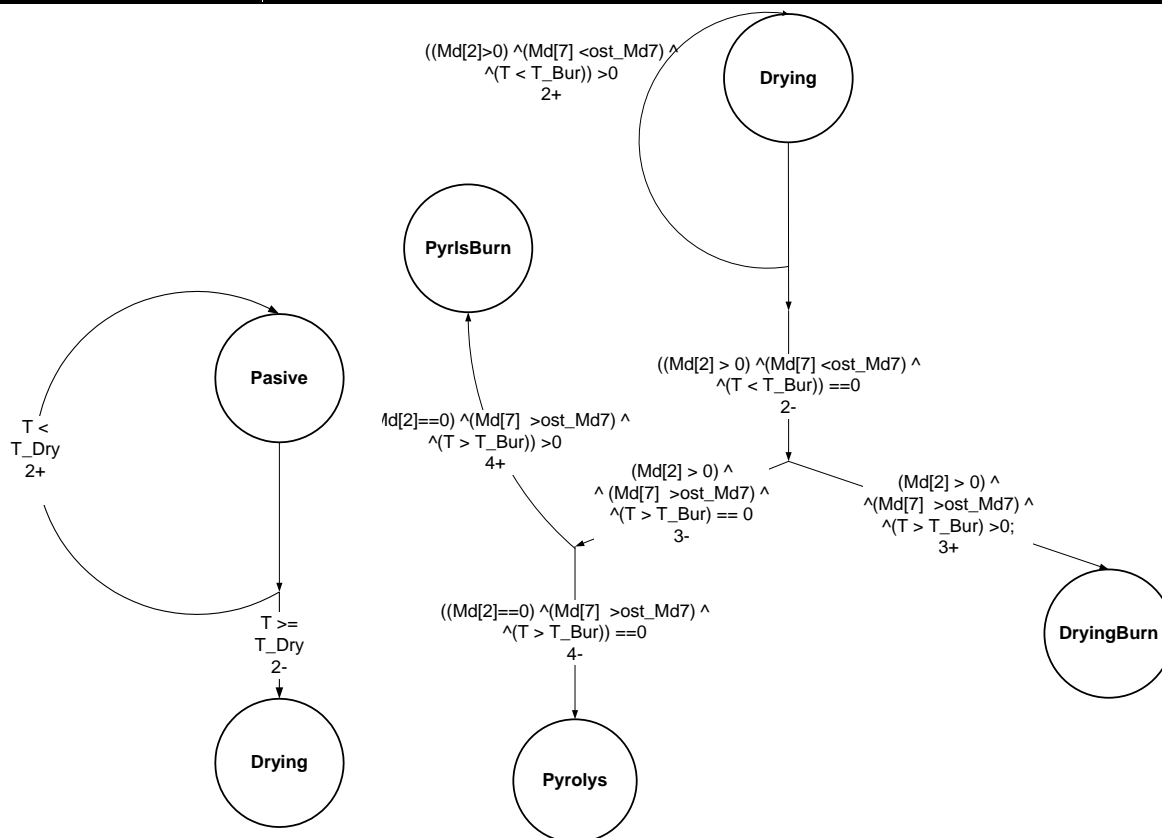


Рис 1. Графи переходів: а) зі стану Passiv, б) зі стану Drying

Таким чином, у другому розділі синтезовано клітковий автомат розповсюдження пожежі, в якому враховуються фізичні та хімічні процеси, що моделює автомат, а саме: сушку, піроліз і горіння. Встановлено залежності, за допомогою яких вони моделюються. Описано склад зони до початку та під час протікання горіння.

У третьому розділі визначаються ті положення, які дозволяють синтезувати з кліткових автоматів систему, що моделює поширення пожежі. На

першому етапі побудована концепція плоскої моделі пожежі на основі гібридних клітинних автоматів. Далі розроблена конфігурація сусідства кліткових автоматів у системі конкретного полігону з заданими розмірами вже в тривимірному об'ємі. Просторова область процесу поширення пожежі (полігон) являє собою об'єм, представлений тривимірним масивом з наступними максимальними значеннями по кожному вимірюванню: numRows - число індексів з вимірювання "r" (row); numCols - число індексів з вимірювання "c" (column); numSt - число індексів з вимірювання "s" (stratum). Тому клітина може знаходитись на куті, на ребрі, на стороні, або ж і в середині полігону. Відповідно клітина матиме три, чотири, п'ять або шість сусідів. Конфігурація вказує відповідні обмеження на індекси.

Процеси масообміну та теплопередачі передаються в моделі за рахунок взаємодії між клітинами. У розділі подані формули для обчислення зміни повної внутрішньої енергії суміші газів у залежності від зміни енергії компонент, теплоємність, теплопровідність суміші газів, що використовуються при побудові моделі:

$$\begin{cases} M_{\text{взаєм}} = \int_{\tau-\Delta\tau}^{\tau+\Delta\tau} dt \left[\int_{\Delta S} (G + \rho_i v) n dS \right] \text{ при } i=5, 11 \\ I_{\text{взаєм}} = \int_{\tau-\Delta\tau}^{\tau+\Delta\tau} dt \left[- \int_{\Delta S} \left[p n + \sum_i P_i + c_d s \sum_i \rho_i (\vec{v}_i \cdot \vec{n}) \vec{v}_i - \right] dS \right] \\ W_{\text{взаєм}} = \int_{\tau-\Delta\tau}^{\tau+\Delta\tau} dt \left[\int_{\Delta S} \sum_i \left[(\vec{Q}_i \cdot \vec{n}) + \rho_i (\vec{v}_i \cdot \vec{n}) \left(\varepsilon_i + \frac{1}{2} V_i^2 + \frac{P_i}{\rho_i} \right) \right] dS - \int_{\Delta S} (\Delta E_{\text{власна}} - \Delta E_{\text{зовнішня}}) dS \right] + \int_{\tau-\Delta\tau}^{\tau+\Delta\tau} F_{\text{онп}} y d\tau \end{cases}$$

де \vec{n} - одиничний нормальний зовнішній вектор до елемента dS поверхні ΔS , що обмежує об'єм ΔV ; \vec{G}_i - вектор потоку маси, що переносить i -та компонента на елемент dS за рахунок молекулярної й турбулентної дифузії; ρ_i , \vec{v}_i - щільність i швидкість, що переносить i -та компонента на елемент dS поверхні ΔS ; $\rho_i \vec{v}_i$ - вектор масової швидкості i -тої компоненти; \vec{P}_i - вектор імпульсу маси, що переносить i -та компонента на елемент dS за рахунок молекулярної й турбулентної дифузії; c_d - коефіцієнт аеродинамічного опору крони дерева; s - питома поверхня РГМ у насаджень даного виду; p - тиск у суміші газоподібних компонентів факела; \vec{Q}_i - вектор потоку енергії, що переносить i -та компонента на елемент dS за рахунок молекулярної й турбулентної теплопровідності; ε_i , p_i - питома теплова внутрішня енергія і тиск i -ї компоненти на елемент dS поверхні ΔS ; $\vec{E}_{\text{зовнішня}}$ - частина зовнішнього випромінювання, що потрапляє до об'єму ΔV через елемент поверхні dS , і яку поглинає об'єм ΔV ; $\vec{E}_{\text{власна}}$ - власне випромінювання об'єму ΔV , що проходить через елемент поверхні dS .

Визначено значення параметрів на границі полігону. Границя полігону складається з верхньої границі - Γ_v , нижньої - Γ_n , бічної - Γ_b . Середовище вище Γ_v має значення параметрів для часу $\tau \geq 0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} T|_{\Gamma_B} = T_{ноч} \\ \rho_1|_{\Gamma_B} = 0 \text{ при } i = 1, 7 \\ \rho_8|_{\Gamma_B} = \rho_{O_2} \\ \rho_9|_{\Gamma_B} = \rho_{CO_2} \\ \rho_{10}|_{\Gamma_B} = \rho_{H_2O} \\ \rho_1|_{\Gamma_B} = \rho_{I} \\ \Delta U|_{\Gamma_B} = 0 \end{array} \right. ,$$

де $\rho_{O_2}, \rho_{CO_2}, \rho_{H_2O}$ і ρ_I – щільність відповідно кисню, вуглекислого газу, пару та інертних газів повітря.

Середовище зовні полігону і на межі з Γ_B має значення параметрів для часу $\tau \geq 0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} T|_{\Gamma_B} = T_{ноч} \\ \rho_1|_{\Gamma_B} = \rho_{ноч} \text{ при } i = 1, 2 \\ \rho_1|_{\Gamma_B} = 0 \text{ при } i = 3, 7 \\ \rho_8|_{\Gamma_B} = \rho_{O_2} \\ \rho_9|_{\Gamma_B} = \rho_{CO_2} \\ \rho_{10}|_{\Gamma_B} = \rho_{H_2O} \\ \rho_1|_{\Gamma_B} = \rho_I \\ \Delta U|_{\Gamma_B} = 0 \end{array} \right. .$$

Середовище нижче межі Γ_H полігону має значення параметрів для часу $\tau \geq 0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} T|_{\Gamma_H} = T_{ноч} \\ \rho_1|_{\Gamma_H} = 0 \text{ при } i = 1, 11 \\ \Delta U|_{\Gamma_H} = 0 \end{array} \right. .$$

При побудові системи КА, що моделює пожежу, має бути врахований вплив вітру. Для цього використовується індикатриса $\chi_n(\alpha, v)$, спеціального виду функція від змінної α - кута між вектором нормалі і напрямом вітру і v - величини швидкості вітру. Потрібно розкласти її на напрямки відповідно до сторін світу. Напрямок на північ:

$$\chi_n(s) = \begin{cases} \chi_n(\pi/2 + \omega) \text{ при } \pi/2 \leq \omega \leq \pi; \\ \chi_n(3\pi/2 + \omega) \text{ при } \pi \leq \omega \leq 3\pi/2; \\ \chi_n(\pi/2 + \omega) \text{ при } 0 \leq \omega \leq \pi; \end{cases}$$

$$\text{Напрямок на південь: } \chi_n(w) = \begin{cases} \chi_n(\pi - \omega) \text{ при } \pi \geq \omega \geq 0; \\ \chi_n(\pi + \omega) \text{ при } 0 \geq \omega \geq -\pi; \end{cases}$$

$$\text{Напрямок на схід: } \chi_n(e) = \chi_n(\omega) \text{ при } -\pi \leq \omega \leq \pi$$

$$\text{Напрямок на захід: } \chi_{n(N)} = \begin{cases} \chi_n(\pi/2\omega) \text{ при } 0 \leq \omega \leq \pi/2; \\ \chi_n(\omega - \pi/2) \text{ при } \pi/2 \leq \omega \leq \pi; \\ \chi_n(\pi/2 - \omega) \text{ при } -\pi/2 \leq \omega \leq 0; \\ \chi_n(3\pi/2 + \omega) \text{ при } -\pi \leq \omega \leq -\pi/2. \end{cases}$$

Це дає змогу присвоїти значення вектора вітру: $v[1] = (1 + \varphi_{v_B}) \times \chi_{n(E)}$; $v[2] = (1 + \varphi_{v_B}) \times \chi_{n(S)}$; $v[3] = (1 + \varphi_{v_B}) \times \chi_{n(W)}$; $v[4] = (1 + \varphi_{v_B}) \times \chi_{n(N)}$.

Таким чином, у третьому розділі визначений вектор впливу вітру, що дає можливість визначити швидкість поширення пожежі в будь-якому напрямку. Також подано формули процесів масообміну та теплопередачі, що передаються в моделі у вигляді взаємодії між клітинами, і розроблено конфігурацію сусідства тривимірних кліткових автоматів у системі конкретного полігону. На основі цих положень у розділі синтезовано систему кліткових автоматів, що моделює поширення пожежі. Матеріали розділу опубліковано в роботах [1,2].

У четвертому розділі проведено імітаційне моделювання та наведено методи дослідження його результатів.

У роботі наведено визначення кромки пожежі A^{KP} , площі, пройденої пожежею, для результатів моделювання. Наведено вираз для обчислення відстані між двома клітинами від $\bar{a}^{**}(t)$ до клітини $\bar{a}^*(t)$:

$$d(\bar{a}^*, \bar{a}^{**}) = \sqrt{(r^* - r^{**})^2 + (c^* - c^{**})^2},$$

де $\bar{a}^{**}(t)$ має координати (r^{**}, c^{**}, s^{**}) і стан $e^{**}(t)$, а $\bar{a}^*(t)$ – координати (r^*, c^*, s^*) і стан $e^*(t)$. Швидкість проходження пожежі від $\bar{a}^{**}(t)$ до клітини $\bar{a}^*(t)$:

$$V(\bar{a}^*, \bar{a}^{**}) = \frac{d(\bar{a}^*, \bar{a}^{**})}{t^* - t^{**}},$$

і виконано:

$$\exists t^*: 0 < t^* \leq T \mid \bar{a}^*(t^*) \in A^{KP} \Rightarrow e^*(t^*) \in E_{top} \text{ і}$$

$\exists t^{**}: 0 < t^{**} \leq T \mid \bar{a}^{**}(t^{**}) \in A^{KP} \Rightarrow e^{**}(t^{**}) \in E_{top}$, тобто кромка проходить $\bar{a}^*(t)$ у момент часу t^* , і $\bar{a}^{**}(t)$ у момент часу t^{**} .

Нехай $A^{KP}(t^*)$ кромка при $t = t^*$, і $A^{KP}(t^{**})$ кромка $t = t^{**}$. Виконано:

$$t^{**} = \max\{t': t' < t^* \mid A^{KP}(t^*) \cap A^{KP}(t') = \emptyset\}.$$

Для кожної клітки $\bar{a}^*(t) \in A^{KP}(t^*)$, знайдемо $\bar{a}^{**}(t) \in A^{KP}(t^{**})$:

$$d(\bar{a}^*, \bar{a}^{**}) = \min_{\bar{a} \in A^{KP}(t^{**})} d(\bar{a}^*, \bar{a}).$$

Швидкістю кромки $A^{KP}(t^*)$ в момент часу t^* в клітині $\bar{a}^*(t)$ по визначенню будемо вважати $V(\bar{a}^*, t^*) = \frac{d(\bar{a}^*, \bar{a}^{**})}{t^* - t^{**}}$.

$$\text{Позначимо } V_{\max}(A^{KP}(t^*)) \text{ як } V_{\max}(A^{KP}(t^*)) = \max_{\bar{a}^* \in A^{KP}(t^*)} V(\bar{a}^*, t^*).$$

Множина $A^{FP}(t^*)$, яка входить до $A^{KP}(t^*)$, називається моделлю фронту ландшафтної пожежі по визначенню, якщо виконано: $\forall \bar{a}^* \in A^{FP}(t^*): V(\bar{a}^*, t^*) = V_{\max}(A^{KP}(t^*))$.

Таким чином, за допомогою додаткових формул визначається швидкість у кожній точці кромки та множина точок кромки, що утворюють фронт пожежі A^{FP} .

Для побудови комп'ютерної моделі були синтезовані два основні класи Poligon і Cell та допоміжний Coordinate, які представлені на рис. 2.

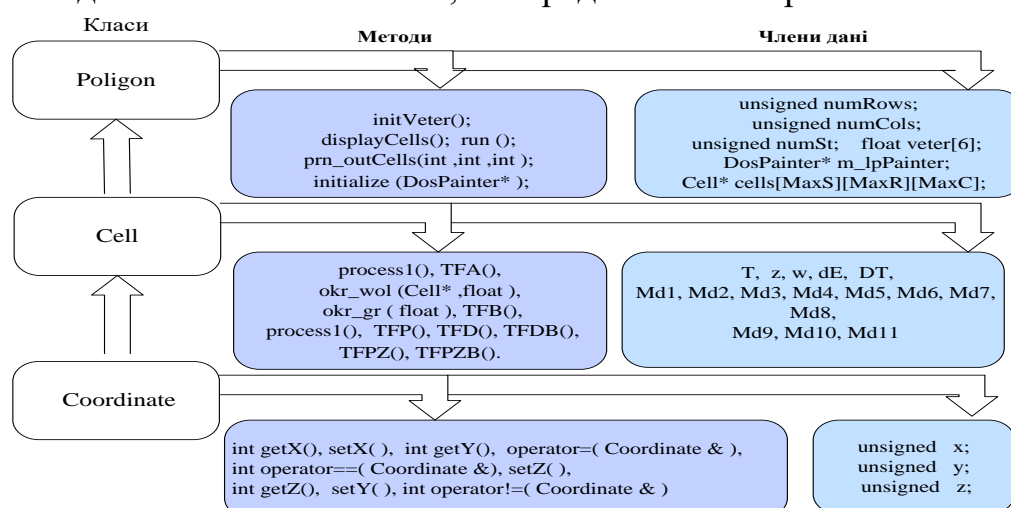


Рис. 2 Структура класів

Клас Poligon реалізує процес поширення пожежі у тривимірному просторі. Члени даних і методи класу Poligon оголошені як:

unsigned numRows, unsigned numCols, unsigned numSt - максимальні значення вимірювань r, c, s, (полігону);

float veter [6] - коефіцієнти обліку впливу вітру;

Cell * cells [MaxS] [MaxR] [MaxC] - масив КА, де MaxS, MaxR, MaxC - значення numRows, numCols, numCols;

initVeter () - метод обчислення значення вектора veter [6];

prn_outCells (int, int, int) - метод виведення інформації на екран;

initialize (DosPainter *) - метод, який здійснює введення даних та ініціалізацію параметрів;

run () - метод моделювання процесу пожежі та візуалізації результатів на екран.

Клас Cell реалізує горіння, синтезуючи КАПРП. Члени даних відображають температуру і склад обсягу КА. Методи класу:

process1 () - відбиває взаємодію КА з сусідами за допомогою prtcl_intrNghb(), okr_wol (Cell *, float), okr_gr (float);

process2 () - обчислення змін параметрів КАПРП, як результат процесу горіння;

TFP (), TFD (), TFDB (), TFPZ (), TFPZB (), TFB (), TFA () - процедури для обчислення в залежності від стану КАПРП параметрів класу Cell.

Клас Coordinate реалізує координати КА в мережі та полігоні.

У процедурах, що реалізують взаємодію з сусідами, визначений порядок використання вектора впливу вітру.

Для відображення на екрані введено двокомпонентне кодування кожної клітини на поточний час.

Таким чином, у розділі сформовано класи, що реалізують клітку автомата процесу поширення пожежі; систему КАПРП, побудовано комп'ютерну модель представлення місцевості, визначено терміни (фронт, кромка пожежі, зона, пройдена пожежею), що характеризують зону пожежі за результатами

моделювання; розроблено програму імітації розповсюдження пожежі з використанням математичної моделі КАПРП на об'єктно-орієнтованій мові C++ і отримано програмний продукт "Fire". Результати розділу опубліковано в роботах [3,4].

У п'ятому розділі проведено постановку обчислювального експерименту. Визначено місце математичної моделі розповсюдження пожеж у загальній структурі системи транспортної інфраструктури (рис. 3)



Рис. 3 Узагальнена структура системи моделювання та прогнозування

Подано методику кодування місцевих умов для вхідних даних програми. На рис. 4 наведено початковий фрагмент файлу даних D-SLOI.txt у середовищі Visual C++ для програми моделювання пожежі, що містить у першому рядку: numSt = 4 - число індексів з вимірювання "s" (шари); numRows = 60 - число індексів із вимірювання "r" (рядок); numCols = 108 - число індексів з вимірювання "c" (колонка); сторону куба dl = 0.5 м; обсяг кожного куба - dV = 0.125 м³.

Кожний наступний рядок файлу містить дані конкретного кубика: температуру, завантаження РГМ першої складової, її вологу, завантаження РГМ другої складової та, відповідно, її вологу, починаючи з кубика з індексами (s = 0, r = 0, c = 0).

Проведено обчислювальний експеримент для ділянки смуги відчуження з водопропускною трубою і з об'єктом залізничної інфраструктури, зображеним на рис.4 а).

На основі отриманих результатів можна зробити висновки: у водовідвідній трубі щільність залишків відмерлої рослинності не повинна перевищувати 1.9 кг/м² інакше це сприяє розповсюдженню вогню з одного боку залізниці на інший, а також для повного виключення пожежної загрози з боку лісопосадки (4) по обидві сторони полотна (рис. 5) об'єкту залізничної інфраструктури (2) густина навколишнього трав'яного шару (3) не повинна перевищувати 1.9 кг/м².

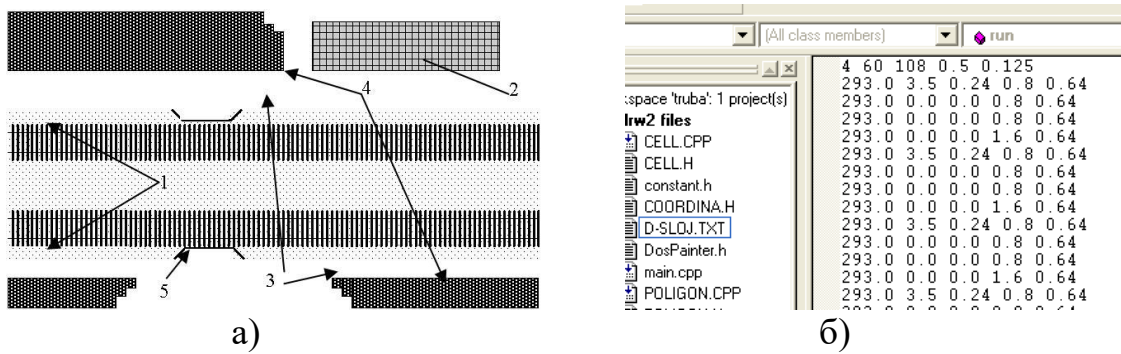


Рис. 4 Фрагменти: а) смуги відчуження з водопропускною трубою і з об'єктом залізничної інфраструктури; б) файлу даних D-SLOI.txt для програми моделювання пожежі

Для перевірки адекватності моделі було проведено моделювання за даними, наведеними в роботі Доррера* "Математические модели динамики лесных пожаров", і виконано порівняння отриманих результатів із контурами розвитку реальної лісової пожежі, представленими там же. Дану експериментальну пожежу можна вважати еталонною, оскільки з нею порівнюються раніше створені обчислювальні моделі побудови контуру. Накладка контурів поширення пожежі, наведених у Доррера*, на результати моделювання показані на рис. 5.

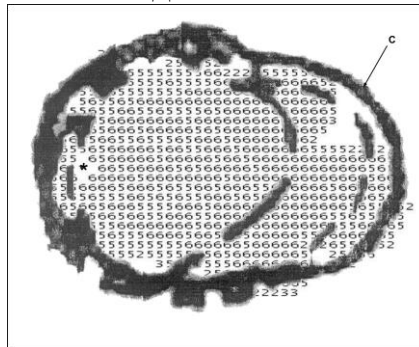


Рис. 5 Порівняння контурів поширення пожежі, наведених у Доррера, і процесу поширення пожежі на полігоні з реальним експериментальним контуром пожежі (С), наведеним у [1]

Розрахунки показують, що розбіжність між отриманими результатами і контурами розвитку реальної лісової пожежі складає в середньому 1.1 м, тобто 10–15% від зони.

Таким чином, шляхом порівняння результатів моделювання з контуром поширення пожежі, наведеним у Доррера*, доведено адекватність розробленої моделі та її вищу інформативність та точність. На прикладі розповсюдженого об'єкта транспортної інфраструктури – водопропускної труби під двоколіїним залізничним полотном – сформовано вхідні дані для моделювання та виконано моделювання умов розповсюдження пожежі з обчисленням граничного завантаження РГМ на цьому об'єкті. Отримані моделі дозволяють оцінити загрози та проаналізувати передумови транспортних подій, наприклад, отримати

* Доррер Г. А. Математические модели динамики лесных пожаров / Г. А. Доррер. – М.: Лесн. пром-сть, 1979. – 161с.

мінімальне допустиме завантаження РГМ, при якому можливе поширення пожежі між різними сторонами залізничної колії, рівну $1,95 \text{ кг/м}^2$.

Основні результати розділу опубліковано в роботах [5,6,7,8].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено науково-прикладну задачу розробки моделей процесу поширення пожежі на базі запропонованої концепції представлення макропроцесу розповсюдження вогню адекватною систематизованою множиною паралельних мікропроцесів горіння для обчислення просторово-часових залежностей пожежі та граничного мінімального завантаження РГМ при оцінці загроз об'єктам транспортної інфраструктури.

На підставі проведених наукових досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Аналіз раніше проведених досліджень у галузі оцінки і моделювання ландшафтних пожеж на базі клітинних автоматів виявив недоліки в існуючих моделях, що не дозволяють отримувати адекватні просторово-часові залежності поширення пожежі на полігонах залізничної інфраструктури. Для створення моделі, що відповідає цим вимогам, у роботі запропоновано метод розпаралелювання процесу горіння на окремих ділянках місцевості. Крім цього, такий підхід дозволив створити моделі, що враховують витрату горючих матеріалів, контур пожежі, тепловиділення, швидкість поширення пожежі, а також особливості ландшафту і вплив вітру.

2. Визначено модель процесу горіння рослинних горючих матеріалів. Для цього: описано зону потенційного горіння - елементарний об'єм, його розміри і складові; етапи розбиття процесу виникнення, протікання та завершення горіння рослинних горючих матеріалів і синтезовано математичну модель процесів масо- і теплообміну на базі елементів фізичних і хімічних моделей процесу горіння рослинних горючих матеріалів в обмеженому об'ємі у вигляді клітинного автомата з визначенням правил клітинного автомата - функції переходів ϕ .

3. Уперше створено математичну і комп'ютерну моделі макропроцесу поширення пожежі як системи взаємодіючих між собою паралельних мікропроцесів горіння, роль яких виконують кліткові автомати. На їх основі розроблено модель об'ємного пожежі, що враховує вплив вітру. Модель, на відміну від існуючих, враховує фізику процесу горіння, більш точно відображає умови місцевості, відповідні полігонам транспортної інфраструктури, і служить основою для прогнозування наслідків пожеж, дозволила розробити метод і програму моделювання процесу поширення пожежі для оперативного прогнозування наслідків.

4. Отримав подальший розвиток метод обліку впливу вектора вітру на процес розповсюдження пожежі за рахунок обчислення коефіцієнтів вітру за всіма напрямками тривимірної моделі, що, на відміну від існуючих методів, дає можливість обчислювати швидкість поширення вогню за всіма напрямками. Розроблено чисельний метод отримання характеристик вектора вітру для моделі,

що базується на системі клітинних автоматів, що дає можливість прогнозувати пожежі та запобігати їх наслідкам.

5. Розроблено метод дослідження загроз від горіння лісосмуг у безпосередній близькості від важливих об'єктів транспортної та навігаційної інфраструктури для визначення параметрів розповсюдження вогню в тривимірному просторі на основі розпаралелювання процесів горіння.

6. Проведено та проаналізовано порівняння результатів моделювання контурів розповсюдження пожежі, отриманих у дисертації, з еталонними експериментами Доррера*. Показано, що контур розповсюдження пожежі, розрахований методом, запропонованим у дисертації, співпадає з реальним контуром пожежі при заданих параметрах об'єкту пожежі моделювання. При цьому підвищилася точність отриманого контуру на 10 – 15%.

7. Розроблено програму імітації розповсюдження пожежі з використанням математичної моделі КАППІ на об'єктно-орієнтованій мові C++ і отримано програмний продукт "Fire", що моделює процес розповсюдження пожежі та дозволяє більш достовірно прогнозувати її контури.

8. Доопрацьовано імітаційний метод обчислення параметрів розповсюдження пожежі в просторі на базі розпаралелювання процесів горіння, що дозволив отримати просторово-часові залежності характеристик пожежі і створити процедуру моделювання пожеж на фрагментах транспортної та навігаційної інфраструктури, наприклад, отримати мінімально допустиме завантаження РГМ, при якому можливе поширення пожежі між різними сторонами залізничного шляху, рівному $1,95 \text{ кг/м}^2$. Отримані результати впроваджено в навчальний процес і на дослідних підприємствах галузі з метою підготовки пропозицій щодо корегування нормативних документів для підвищення безпеки.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій зумовлена правильністю постановки та вирішення завдань, обґрунтованістю вибору математичного та комп'ютерного апарату і використанням при моделюванні реальних даних натурного експерименту. Обґрунтованість наукових положень підтверджується порівнянням розроблених моделей з експериментальними даними.

Основні положення дисертації опубліковано в роботах.

Основні праці.

1. Головка А.В. Компьютерное моделирование процесса распространения пожара на плоскости / И. Г. Филиппенко, В. М. Бутенко, А. В. Головка // 36. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ. – 2008. – Вип. № 16. – С. 64 – 73.

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

3. Головка А.В. Влияние ветра на процесс распространения пожара в математической модели клеточного автомата /А.В. Головка //Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – №3(82). – С. 68 – 71.

4. Головка А.В. Математическая и компьютерная модель процесса

распространения пожара /И.Г.Филиппенко, А.В.Головко //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. - № 4/3 (46) - С. 22 – 28.

5. Головко А.В. Разработка методики прогностичной оценки угроз от лесных пожаров /А.В. Головко //Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – №4(83). – С. 22 – 28.

6. Патент UA № 30066, МПК 7 Н 03 К 17/62, Двополярний ключ / Бутенко В.М., Блиндюк В.С., Головко О.В., Чуб В.С., Чуб С.Г. заявник і власник Українська державна академія залізничного транспорту. № u 200711340 від 12.10.2007; Опубл. 11.02.2008, Бюл. №3, 2008 – 6 с.: ил.; УДК 681.5.08:621.317.

7. Головко О.В. Ранжирование опасностей с нечеткими зонами межранговых переходов /В.І. Мойсеєнко, В.М. Бутенко, О.В. Головко //Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ. – 2008. – Вип. № 14. – С. 64 – 73

8. Головко О.В. Аналіз та програмування стану безпеки руху поїздів /В.І.Мойсеєнко, О.В.Головко //Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2005.– Вип. 4. – С. 5 – 13.

Додаткові праці.

1. Головко А.В. Клеточные автоматы – основа построения математической модели процесса распространения пожара /А.В. Головко // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции "Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте '2010". Том 3. Технические науки. – Одесса: Черноморье, 2010. - С. 87 – 90.

2. Головко А.В. Математическая и компьютерная модели процесса распространения пожара для оценки угроз и анализа предусловий транспортных событий /А.В. Головко // Збірник доповідей десятої науково-практичної конференції ["Перспективи впровадження технічних засобів безпеки руху на залізницях України"]. (Хмельник, 8-10 вересня 2010) / М-во транспорту та зв'язку України. Державна адміністрація залізничного транспорту України. – Медичний центр реабілітації залізничників, Хмельник:, 2010. - С. 35 – 39.

3. 22-а, 23-а міжнародні науково-практичні конференції "Перспективні комп'ютерні, керуючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України" (2009, 2010 роки Українська державна академія залізничного транспорту).

АНОТАЦІЯ

Головко О.В. Математичне моделювання процесу розповсюдження пожежі в системах транспортної інфраструктури. – **Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи - Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна, Харків, 2011.

Дисертація присвячена прогностичній оцінці загроз об'єктам транспортної інфраструктури від ландшафтної пожежі. Дані для визначення параметрів загроз обчислюються за допомогою розроблених математичної та комп'ютерної моделей процесу поширення пожежі. Для синтезу вищезгаданих моделей макропроцес пожежі представлений множиною адекватних мікропроцесів горіння. Для цього

розроблено моделі тривимірних клітинних автоматів, здатних моделювати мікроскопічні процеси горіння, використовуючи опис фізики горіння.

У дослідженні розроблено методику застосування моделі на конкретній місцевості. Детально показаний метод кодування природних даних місцевості.

У дисертації промодельоване розповсюдження пожежі через водопропускну трубу під залізничним полотном з обчисленням граничного завантаження РГМ, при якому можливий перехід пожежі під полотном.

Дисертаційне дослідження проводилося, як складова частина інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами, що складається з бази даних, моделі процесів поширення пожеж, процедури прийняття рішень та технічних засобів впливу на інфраструктуру. Розроблено програму імітації поширення пожежі з використанням цієї математичної моделі на об'єктно-орієнтованій мові C++ і отримано програмний продукт "Fire". Методики моделювання та програмний продукт "Fire", запропонований у цій роботі, були включені в навчальний процес.

Ключові слова: макропроцес пожежі, тривимірні клітинні автомати, системи транспортної інфраструктури, мікропроцес горіння рослинних горючих матеріалів, швидкість кромки пожежі, площа, яку пройшла пожежа.

АННОТАЦИЯ

Головко А.В. Математическое моделирование процесса распространения пожара в системах транспортной инфраструктуры. – **Рукопись.**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы - Харьковский национальный университет имени В.Н.Каразина, Харьков, 2011.

Диссертация посвящена прогностической оценке угроз объектам транспортной инфраструктуры от ландшафтного пожара. Данные для определения параметров угроз вычисляются посредством разработанных математической и компьютерной моделей процесса распространения пожара. Для синтеза вышеуказанных моделей макропроцесс пожара представлен множеством адекватных микропроцессов горения. Для этого разработаны модели трехмерных клеточных автоматом, способных моделировать микроскопические процессы горения, используя описания физических процессов горения из уже существующих работ. В известных моделях распространения пожара клеточные автоматы моделируют процесс горения в сильно упрощенном виде, игнорируя физику процесса.

На основе известной литературы определен микропроцесс горения растительных горючих материалов. Для этого: описаны зона потенциального горения – элементарный объем, его размеры и составляющие. На основе размеров и составляющих объема определены параметры клеточного автомата. Этапы возникновения, протекания и завершения горения растительных горючих материалов определены с точки зрения физики процесса и разделены на три

составляющих, а именно сушку, пиролиз и собственно пламенное горение. На базе этих составляющих определены семь состояний клеточного автомата, отражающих природу горения растительных материалов. Определена конфигурация системы клеточных автоматов, отражающих прямоугольный фрагмент трехмерного пространства – полигон, на котором пройдет моделирование. Для каждого автомата согласно его координатам в модели процесса горения задан набор соседних клеток. Синтезирована математическая модель процессов массо- и теплообмена на базе элементов физических и химических моделей процесса горения растительных горючих материалов в ограниченном объеме в виде клеточного автомата с определением правил клеточного автомата – функций переходов φ .

Впервые созданы математическая и компьютерная модели макропроцесса распространения пожара как системы взаимодействующих между собой параллельных микропроцессов горения, роль которых выполняют клеточные автоматы. На их основе разработаны модели плоскостного и объемного пожаров, учитывающие влияние ветра. Модели позволили получать параметры пожара в трёх измерениях и разработать метод и программу моделирования процесса распространения пожара для оперативного прогнозирования распространения процесса горения на однопоточковой вычислительной системе.

Для сравнения данных о реальных пожарах с результатами моделирования были введены понятия, связывающие части набора клеточных автоматов в различных состояниях с фронтом и другими составными частями процесса протекания ландшафтного пожара на местности. Для этого на результатах моделирования были определены контур пожара и зона, пройденная пожаром. Для клеток, принадлежащих зоне, пройденной пожаром, определены скорость прохождения огня между двумя клетками. На основе этого определено множество клеток в конкретный момент времени, содержащихся в контуре и являющихся в совокупности фронтом пожара.

В данном исследовании разработана процедура применения модели, базирующейся на системе клеточных автоматов, для изучения процесса распространения пожара на конкретной местности. Сравнительный анализ контуров распространения пожаров, рассчитанных в работе Доррера* и диссертации, а также с эталонным экспериментом, приведенным в работе Доррера*, показал, что контур распространения пожара, рассчитанный методом, предложенным в данной работе, ближе всех к реальному контуру пожара.

В диссертации произведено моделирование условий распространения пожара для распространенного объекта инфраструктуры – водопропускной трубой под двухпутным железнодорожным полотном с вычислением предельной загрузки РГМ, при которой возможен переход пожара под железнодорожным полотном. Опыты проводились многократно, с различной загрузкой растительного материала в зоне водопропускной трубы. Целью поставленных опытов было: выяснить при какой предельной минимальной загрузке возможно распространение пожара с одной стороны железнодорожного пути на другую.

Диссертационное исследование проводилось как составная часть интегрированной информационной системы обеспечения управления

подвижными объектами. Разработана программа имитации распространения пожара с использованием созданной математической модели на объектно-ориентированном языке C++ и получен программный продукт "Fire", моделирующий пожар.

Ключевые слова: макропроцесс пожара, трехмерные клеточные автоматы, системы транспортной инфраструктуры, микропроцесс горения растительных горючих материалов, скорость кромки пожара, площадь, пройденная пожаром.

ANNOTATION

Oleksandra V. Golovko. Mathematical modeling of fire in systems of transport infrastructure – Manuscript.

Thesis for a candidates degree by speciality 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods – V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2011.

The dissertation is devoted to prognostic estimate of threats to transport infrastructure objects from landscape fire. Date for determination of danger characteristics are calculated using the developed mathematical and computer models of the fire spreading process. For synthesis of the above models fire macroprocess is presented as a set of adequate burning microprocesses. Three-dimensional cellular automata models which are able to simulate microscopic processes of combustion, using the description of the physics of the above processes, are developed.

The method of applying the model on a specific area is carried out. The data encoding method of natural areas is shown in detail.

The thesis has simulated the spread of fire through culverts under the railway bed with the calculation of VF limit load, under which the transition of fire under the rail bed is possible.

Dissertation research was conducted as a part of an integrated informational system of management by moving objects, consisting of database, model of the fire spreading, the decision making process and technical means influence on infrastructure. The simulation program of fire spreading using this mathematical model for object-oriented C ++ is developed to receive the "Fire" software. The proposed methodology and simulation software "Fire", were included in the training process.

Key words: macroprocess of fire, three-dimensional cellular automata, systems of transport infrastructure, burning microprocess of combustible plant materials, fire edge speed, the area that was fire.

Відповідальний за випуск С.І.Шматков

Підписано до друку 06.02 .2012 р.
Формат 60x84 1/16. Папір писальний.
Обсяг 0,9 друк. арк. Наклад 100 прим.
Зам. № . Безкоштовно

Виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК№2874 від 12.06.2007 р.

