

УДК 004.94:355.426.4:623.618

Г. А. Дробаха, Л. В. Розанова, В. Е. Лісіцин

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДІЙ НАТОВПУ У ЗАДАЧАХ ДОСЛІДЖЕННЯ ЙОГО ПОВЕДІНКИ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ МАСОВИХ ЗАХОДІВ

Розглянуто методи моделювання дій натовпу, визначені їх недоліки. Запропоновано підхід до розроблення математичної моделі дій натовпу із застосуванням теорії клітинних автоматів, призначеної для дослідження поведінки натовпу у русі та під час зіткнення з перешкодами.

К л ю ч о в і с л о в а: моделювання натовпу, методи клітинних автоматів, кластерний аналіз.

Постановка проблеми. У деяких випадках при дослідженні складних систем потрібно детально моделювати їх дії та докладно аналізувати умови функціонування, причому важливо виявити тенденції розвитку процесів, властивих таким системам, і оперативно отримати оцінки значень показників їх можливостей. Для цього доцільно використовувати моделі, які зберігають адекватність з оригіналом у рамках прийнятих менш жорстких припущень та мають високу швидкість отримання результату.

Таким чином, необхідність дослідження цієї тематики на сьогодні сумніву не викликає. Попередження та подолання наслідків негативних подій під час масових заходів потребує від сил охорони правопорядку вміння передбачати їх розвиток, прогнозувати можливий характер дій натовпу у різних конфліктних ситуаціях і на цій основі знаходити раціональні способи дій у відповідь. Це обумовлює актуальність вирішення проблем вдосконалення та створення таких моделей, які достатньо адекватно відображатимуть розвиток досліджуваних подій у просторі та часі. В даній статті розглядаються методи моделювання дій натовпу та програма моделі дій натовпу під час масових заходів. Програма реалізує детерміновану імітаційно-статистичну модель натовпу, яка призначена для автоматизації розрахунків просторово-часових параметрів дій натовпу та прогнозування можливої динаміки розвитку подій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сторінках наукових видань [1, 2, 3] неодноразово розглядалися питання моделювання дій натовпу різними методами. Так, у методах на основі клітинних автоматів простір, у якому переміщується натовп (індивіди), представляється у вигляді набору клітин, що утворюють деяку періодичну сітку із заданими правилами переходу, які визначають стан клітини в наступний момент часу через стан клітин, що знаходяться від неї на деякі відстані у попередній момент часу. У методах на основі ньютонівської механіки всі соціальні сили, що діють на індивіда у натовпі, виражаються у вигляді фізичних сил, тому рух індивіда описується на основі другого закону Ньютона. Мультиагентний метод моделювання передбачає не описування динамічної системи в цілому, а створення набору елементарних правил, яким підкоряється будь-який індивід у натовпі. У методі на основі фізичних процесів (молекулярної) динаміки рідини кожен індивід натовпу є часткою, стан якої описується рівняннями динаміки рідини (наприклад, рівняннями Нав'є-Стокса). Методи, що ґрунтуються на даних, отриманих з реальних спостережень за поведінкою натовпу в різних умовах, частіше мають вузьку спрямованість (застосовуються, наприклад, тільки для моделювання евакуації на випадок пожежі). У графоаналітичному методі за отриманими даними математично описуються прості закономірності поведінки руху натовпу у разі виникнення певного набору базових ситуацій. Така модель може описувати лише набір статистичних параметрів натовпу, таких як середня швидкість і середня щільність на певній ділянці, а також час досягнення мети дій. У гібридних методах використовують комбінацію декількох вищезазначених підходів.

У деяких наукових працях [4] для моделювання поведінки натовпу використано чисельний метод. Відповідно до вибраного методу розроблено набір інструментальних і алгоритмічних засобів, що дозволяють візуалізувати поведінку віртуального натовпу і аналізувати отримані результати.

Більш детальний аналіз розглянутих методів проведений у працях [5, 6, 7]. Так, до недоліків методів на основі ньютонівської механіки можна віднести неможливість моделювання гетерогенного (різнорідного) натовпу. Мультиагентний метод у процесі моделювання не дає можливості описувати динамічну систему в цілому, що вкрай необхідно для побудови комплексної динамічної моделі масових заходів (дії натовпу та дії сил охорони правопорядку у єдиному середовищі). Недоліками графоаналітичного методу є складність розрахунків, на відміну від його уявної простоти, а також

проблеми із заданням поведінки натовпу, що не дозволяє виконати чітку і однозначну декомпозицію дій. Недоліком гібридного методу є складність поєднання декількох підходів у рамках однієї моделі, що обумовлено різними методами описування взаємодій усередині натовпу.

Модель дій натовпу, що розглядається у статті, розробляється як складник комплексної динамічної імітаційної моделі масових заходів. Вона повинна враховувати не тільки дії натовпу, а й реакцію на них сил охорони правопорядку. Проведений аналіз показує, що для відображення таких різнорідних дій у єдиному просторі моделювання доцільно використати метод клітинних автоматів.

Основною позитивною якістю такого підходу є відносна простота реалізації самого автомата і нескладний опис правил, що є позитивним для одночасного моделювання дій натовпу та сил охорони правопорядку у єдиному просторовому середовищі. Гомогенність (однорідність) модельованого натовпу також може дати додаткову перевагу при вивченні однорідного натовпу. Незважаючи на свою простоту, на практиці клітинні автомати показують достатньо високу відповідність результатів моделювання результатам натурних експериментів. Наприклад, у роботі [8] викладені результати моделювання потоків пасажирів у метро Токіо, за якими була проведена перевірка їх достовірності шляхом порівняння з реальними даними. Результат перевірки показав високу відповідність досліджуваної моделі реальній поведінці пасажирів у метро.

Незначним недоліком клітинних автоматів можна вважати дискретність поведінки елементів натовпу в часі та просторі, що накладає деякі обмеження на врахування факторів свободи руху натовпу [9].

Мета статті – розкрити зміст підходу до розроблення із застосуванням теорії клітинних автоматів математичної моделі дій натовпу для дослідження можливої поведінки натовпу в русі і зіткненні з перешкодами в рамках моделі масових заходів.

Виклад основного матеріалу. Клітинні автомати широко застосовують для створення фізичних, біологічних, хімічних і інших моделей тому, що саме поняття “клітинний автомат” ототожнюється з поняттям “поле”. В зв’язку з цим клітинний автомат виявляється ідеальним середовищем для розв’язування диференціальних рівнянь і рівнянь у часткових похідних: рівняння Нав’є-Стокса, рівняння теплопровідності і хвильового рівняння [10]. Клітинні автомати також показали свою високу ефективність у виконанні завдання затвердіння за наявності фазових переходів складної структури [11], що дозволяє ефективно використовувати їх для описування поведінки динамічних систем на дискретній мові клітинних автоматів. Т. Тоффоли і Н. Морголус запропонували використати для моделювання руху натовпу клітинний автомат, що описує дифузійні процеси. М. Е. Степанцов розробив клітинно-автоматну модель руху, засновану на рівнянні газодинаміки, і розвинув її шляхом додавання до дифузійного складника спрямований рух [12]. Крім того, у моделюванні руху натовпу значне місце займає питання описування поведінки людини в екстремальних ситуаціях на мові клітинних автоматів [13], що спричинює необхідність визначення ймовірності переходів у кожен напрямок. Ймовірність може бути обчислена з урахуванням міри знання геометрії простору, бажання рухатися в певному напрямі, властивості людей триматися на відстані від інших людей і від перешкод, які варіюються залежно від ситуації. Також необхідно передбачити правила вирішення конфліктних ситуацій, пов’язаних з тим, що на те саме місце може претендувати кілька чоловік одночасно.

Основні гіпотези та допущення, прийняті при моделюванні дій натовпу.

1. Завчасно відомий склад натовпу, що бере участь у масових заходах, та його початкове розташування на місцевості.

2. Завчасно відомі очікувані напрямки дій натовпу.

3. Процеси управління натовпом, що відображаються у моделі, обмежуються отриманням даних про натовп і про обстановку, що склалася, та обробленням цих даних.

Дані моделі сформовані у вигляді кількох реляційних таблиць і зберігаються у базі даних геоінформаційної системи (ГІС) внутрішніх військ (ВВ) “Інструмент”. Модель містить:

1) таблицю MDL3_CITIZ із характеристиками натовпу та параметрами кожного індивіда;

2) таблицю MDL3_SYSTEM із загальними параметрами моделювання, розміром зони моделювання, растровою картою місцевості, для якої створюють модель, даними про погодні умови та умови освітлення тощо;

3) таблицю MDL3_TARGET цільових точок, до яких буде рухатись натовп (окремі групи у моделі можуть мати різні цільові точки на карті);

4) таблицю MDL3_ENVIR, у якій містяться нерухомі об’єкти та забудови навколишнього

середовища, що прив'язані до електронної карти.

Масив даних електронної карти моделі будується за допомогою створення найпростішої карти за даними чотирьох, зазначених вище, таблиць.

Результати моделювання відображаються на екрані комп'ютера, зберігаються у таблицях моделі в ГІС ВВ "Інструмент" та у подальшому використовуються при відпрацюванні документів. Збережена модель може бути знову відкрита та відтворена (рис. 1).

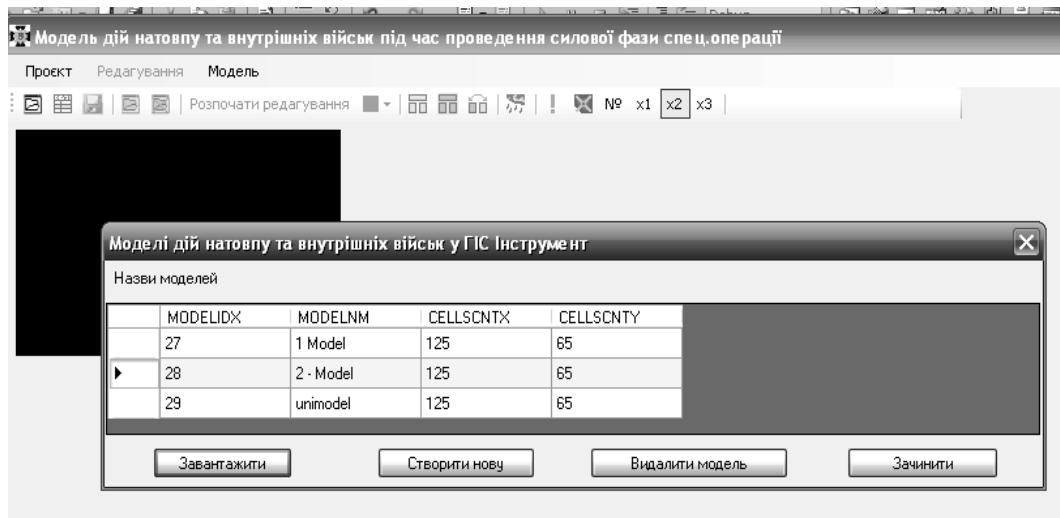


Рис. 1. Вибір із списку та відкриття у базі даних ГІС ВВ "Інструмент" моделі дій натовпу

У режимі дослідження просторово-часових параметрів дій натовпу відображається електронна карта місцевості, на яку автоматично наносяться умовні позначки та елементи натовпу за сформованими вхідними даними. В інтерактивному режимі ці дані можуть змінюватись з метою уточнення параметрів натовпу, вибору потрібного варіанта та оцінювання результатів моделювання. Для цього необхідно здійснити кілька "прогонів" моделі і отримати стійкий результат, що повторюється у кожному наступному циклі моделювання (рис. 2).

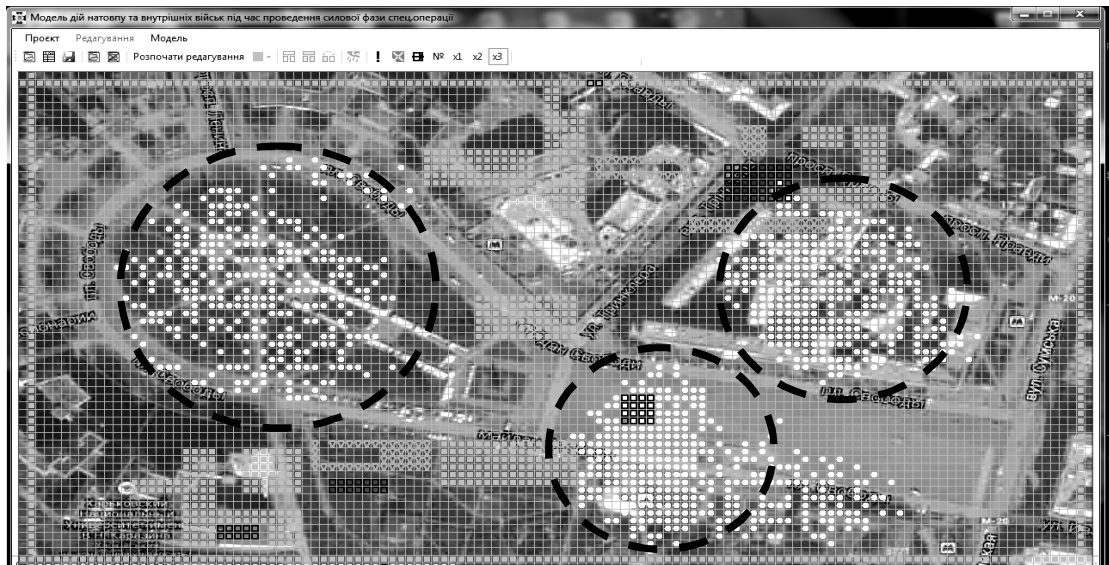


Рис. 2. Результати моделювання по закінченню чергового циклу роботи програми.
Сформовано три чітких кластера натовпу

Показниками, значення яких одержують під час моделювання, можуть бути:

- кількість створених кластерів натовпу, їх форма і взаємне розташування;
- щільність створених кластерів натовпу;
- взаємне розташування центрів кластерів натовпу;

- чисельність та склад створених кластерів натовпу;
- кількість поранень та ушкоджень у результаті дій натовпу;
- час досягнення натовпом цільових точок;
- напрями переміщення груп натовпу;
- відсоток агресивних та активних кластерів натовпу.

У розробленні моделі дій натовпу під час масових заходів на основі методу клітинних автоматів з урахуванням суттєвих для дослідження ознак оригіналу моделі прийняті такі гіпотези, допущення та обмеження:

- 1) за один такт роботи моделі індивід (окрема людина) здатен або переміститися на одну клітину, або залишатися на місці;
- 2) переміщення індивіда на площині відповідно до даного середовища згідно з маршрутом (на сусідню клітину), тобто рух відбувається уздовж напрямків від 0 до 7 і визначається ймовірностями $P_0 \dots P_7$ того, що ним буде прийнято рішення на переміщення в одному з напрямків;
- 3) за неможливості рухатися в заданому i -му напрямку (наявності на шляху непереборних перешкод, значної кількості інших індивідів тощо) ймовірність руху індивіда в цьому напрямку дорівнює нулю ($P_i = 0$), індивід змінює напрямок руху, вибираючи той, на якому перешкоди мінімальні;
- 4) як модель обмеженого середовища (площа, де відбуваються заворушення тощо) використовується ортогональна сітка, що задає усі можливі напрями руху індивіда від 0 до 7 (уздовж ліній сітки і по діагоналях);
- 5) стан кожної клітини цієї сітки відповідає наявності або відсутності індивіда в цій точці, наявності або відсутності перешкод і т. п.;
- 6) характеристики індивідів задаються у вхідних даних для відповідних груп зі складу натовпу;
- 7) усі величини, про які йтиметься, належать множині цілих чисел;
- 8) розмір однієї клітини приймається рівним розміру середнього поля, що може займати один індивід;
- 9) середовище дій натовпу є замкнутим двовимірним евклідовим простором з розмірністю $m \times n$.

Структура імітаційної моделі дій натовпу наведена на рис. 3.

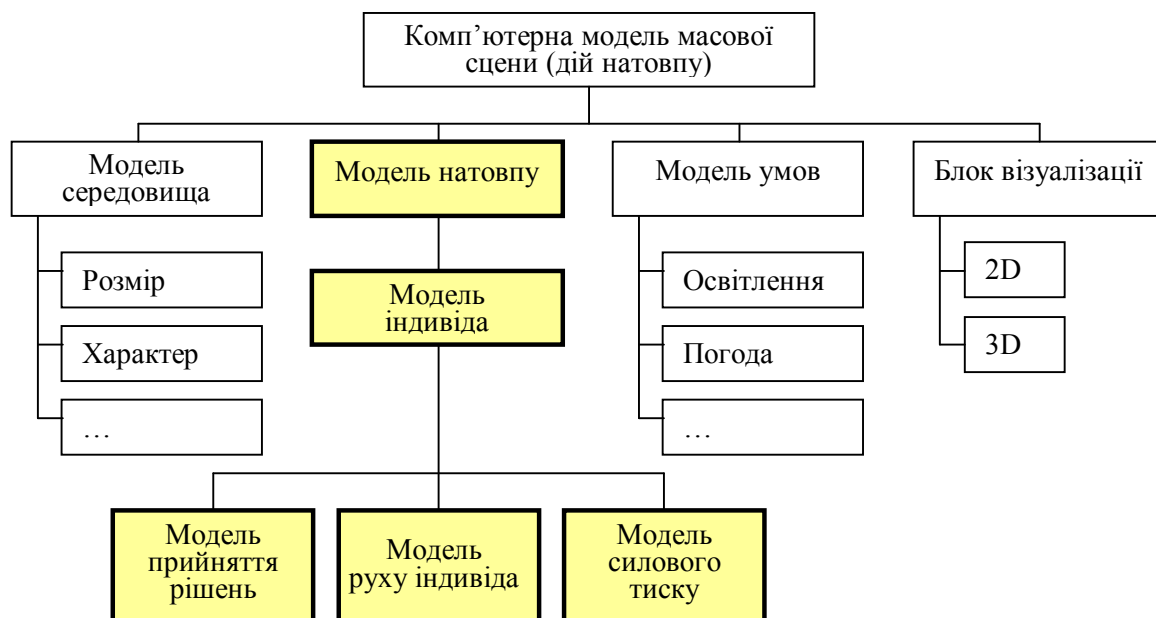


Рис. 3. Структурна схема імітаційної моделі дій натовпу

Модель натовпу включає моделі окремо взятих індивідів, кожна з яких складається з трьох моделей.

1. Модель прийняття рішення на рух, яка визначає: рухається або знаходиться на місці індивід, а якщо рухається, то в якому напрямку.

2. Модель руху індивіда, яка визначає порядок його переміщення з однієї клітинки в іншу.

3. Модель силового тиску, яка визначає з якою силою індивід рухається або прагне подолати перешкоду.

Як оригінал моделі середовища розглядається обмежений простір у вигляді площі або іншого місця, де відбуваються масові заходи. Візуально така модель представлена ортогональною сіткою, що задає простір моделювання та можливі напрями руху індивіда (уздовж ліній сітки та по діагоналях). У простішій моделі середовище розглядається як замкнений двовимірний евклідов простір розмірністю $m \times n$. Розмір однієї клітини на полі дій дорівнює розміру середнього індивіда, він заданий в обмеженнях на початку моделювання.

Кожна клітинка ортогональної сітки має свої ознаки, що формуються або як вхідні дані перед початком моделювання, або змінюються за певними правилами під час функціонування моделі:

- 1) зайнята стаціонарним об'єктом (будинки, споруди, пам'ятники тощо);
- 2) зайнята рухомими об'єктами (сторонні люди, машини тощо);
- 3) рух заборонений (заборонені зони, обгороджування, перешкоди);
- 4) рух не бажаний (існують правила обмеження руху);
- 5) зайнята індивідом;
- 6) вільна.

Модель умов, в яких відбуваються дії натовпу, відображає ознаки фізичних умов, у яких відбуваються події: освітлення, погодні умови, час доби, пора року тощо.

Модель натовпу включає блок формування даних про натовп, блок управління моделюванням дій натовпу та базу даних про натовп. Блок формування даних про натовп за вхідними даними – характеристиками натовпу, що моделюється (кількість людей, процентне співвідношення за категоріями учасників, вихідне положення, стан тощо), формує початковий стан операційного масиву (масиву індивідів), розмірність якого визначається вхідним (заданим користувачем) розміром натовпу. Якщо загальну кількість людей у натовпі прийняти рівною u , а операційний масив розглядати як кортеж K , тоді масив індивідів матиме вигляд:

$$K = (k_1; k_2; \dots; k_i; \dots; k_u),$$

де k_i – елемент кортежу, що містить дані про кожного індивіда або групи індивідів (елементи натовпу) та їх ознаки.

Кожному індивіду відповідатиме ряд ознак та даних про нього. Загальна ознака для всіх індивідів згідно з визначеними обмеженнями залишається незмінною – це заданий середній розмір однієї клітини на полі. Ознаки та дані, які можуть змінюватися залежно від особливостей індивіда та його поведінки такі:

- 1) належність (до якого політичного руху належить індивід і т. п.);
- 2) стать, вік;
- 3) активність;
- 4) агресивність;
- 5) поточні координати у просторі моделювання ($x; y$);
- 6) локальний напрямок можливого руху $[0 \dots 7]$;
- 7) імовірність руху;
- 8) цільовий напрямок руху (до якого пункту прагне рухатися).

Блок управління моделюванням дій натовпу призначений для формування у кожному такті роботи моделі поточного стану операційного масиву відповідно до алгоритму моделі індивіда, що розглядається далі, визначення умов закінчення моделювання та розрахунку значень інтегрованих характеристик натовпу. При цьому у кожному такті здійснюється послідовний перебір елементів операційного масиву (масиву індивідів) та за допомогою моделі індивіда для умов, що склалися, формується їх нове значення.

Модель прийняття рішення на рух. Її призначення – визначити, рухається індивід або стоїть на місці. Переміщення індивіда імітується клітинками вздовж можливих напрямів $[0 \dots 7]$ та визначається ймовірностями $P_0; P_1; P_2; P_3; P_4; P_5; P_6; P_7$, де P_i – ймовірність того, що k індивід у поточному такті переміститься в l клітинку (див. рис. 4).

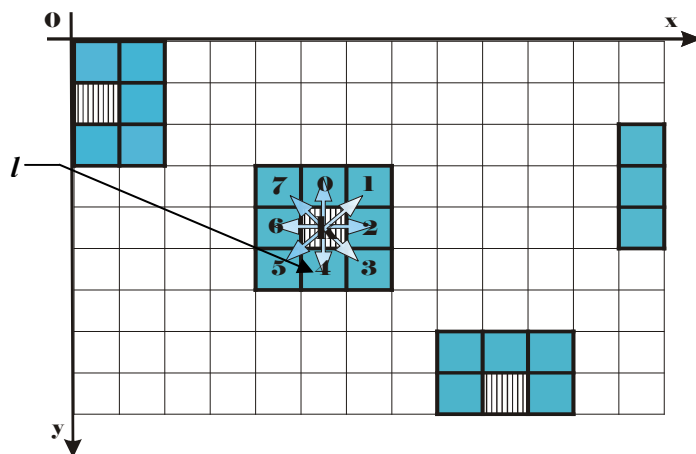


Рис. 4. Порядок імітації переміщення k індивіда в l клітинку уздовж напрямків $[0 \dots 7]$, які визначаються осередками плаваючого вікна розміром 3×3 клітинки

Нехай k – деякий заданий нами індивід, що має координати (i, j) у початковий момент часу t і бажає рухатися у напрямку q (мета, до якої прагне k індивід), а стан середовища, розміром $m \times n$, описується функцією стану F_{ij} , де f_{ij} містить інформацію про стан клітини з координатами (i, j) (рис. 5).

$$f_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{якщо клітина з координатами } (i, j) \text{ вільна;} \\ 1, & \text{якщо клітина з координатами } (i, j) \text{ зайнята.} \end{cases}$$

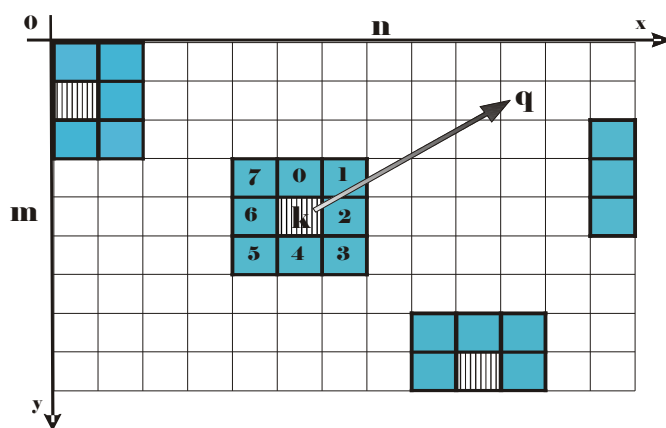


Рис. 5. Приклад стану k індивіда, який бажає рухатись у напрямку q , у початковий момент часу t та його положення у координатах (x, y)

Тоді правила обчислення ймовірності переміщення індивіда $P_{ij}(0) \dots P_{ij}(7)$ з однієї клітини в сусідню має сенс застосовувати тільки до тих клітин, для яких $f_{ij} = 0$, тобто клітина не зайнята перешкодами або іншими індивідами. З урахуванням цього ймовірність переміщення k індивіда на один крок у заданому напрямку визначатиметься так:

$$P_{kl} = P_{kq} \cdot P_{kd} \cdot P_{lf},$$

де P_{lf} – ймовірність того, що шлях у l напрямку вільний, $l = \{0 \dots 7\}$ (клітина l не зайнята); P_{kd} – ймовірність того, що k індивід рухатиметься (задається в початкових даних); P_{kq} – ймовірність того, що індивід рухатиметься у напрямку q .

Припустимо, що ймовірність того, що шлях буде вільний, дорівнює:

$$P_{lf} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } f_{ij} = 1; \\ 1, & \text{якщо } f_{ij} = 0, \end{cases}$$

а ймовірність того, що індивід переміщується вперед, дорівнює:

$$P_{kd} = \begin{cases} 0, & \text{індивід не переміщується;} \\ 1, & \text{індивід переміщується.} \end{cases}$$

Для обчислення P_{kq} доцільно вибрати нормальний розподіл, зрізаний на інтервалі $[0; 2\pi]$ із щільністю ймовірності $r(\alpha)$, яка наведена на рис. 6.

$$\int_0^{2\pi} r(\alpha) d\alpha = 1,$$

де математичне сподівання дорівнює π , а середнє квадратичне відхилення $\frac{2\pi}{8}$.

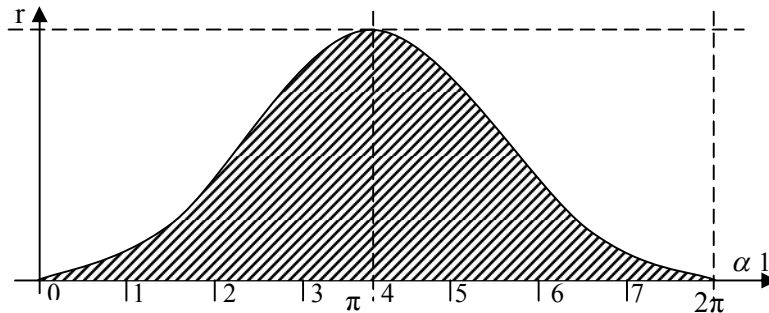


Рис. 6. Щільність імовірності для нормального розподілу, зрізаного на інтервалі $[0; 2\pi]$

Отже, ймовірність P_{kq} визначається таким чином:

$$P_{kq} = \int_{Z_n}^{Z_v} r(\alpha_q) d\alpha,$$

де Z_n, Z_v –нижня і верхня межі інтегрування; α_q – азимут напрямку на ціль q ; $r(\alpha_q)$ – щільність розподілу на інтервалі $[0; 2\pi]$.

На практиці замість такого підходу до розрахунку оптимального напрямку переміщення пропонується спрощений, але більш швидкий алгоритм. Його сутність полягає у тому, що на першому етапі розраховуються косинуси кутів у напрямках до цільової точки для кожного осередку плаваючого вікна розміром 3×3 клітинки. Зрозуміло, що максимальне позитивне значення косинуса відповідатиме осередку, який найбільше відповідає напрямку до цільової точки. У більшості випадків значення косинуса буде менше 1. У протилежному від цільової точки напрямку розрахований косинус кута матиме від'ємне значення, що також може не досягати величини -1. Область визначення для напрямків, що розраховуються, відповідає інтервалу $[0; 2\pi]$.

Як співвіднести ці розраховані значення із щільністю ймовірності руху, наведеною на рис. 5? Для цього у імітаційному моделюванні застосовують підхід, в якому криву гауссового розподілу замінюють фрагментом косинусоїди. Необхідно тільки значення косинусів, які розраховані на попередньому етапі, співвіднести із значеннями ймовірності:

- максимальне позитивне значення косинуса перетворюється у значення ймовірності 1 та відповідає найвигіднішому напрямку переміщення до цільової точки;
- інші позитивні значення косинусів, розраховані для осередків плаваючого вікна, відображаються на інтервалі ймовірностей $[0.2 - 1]$;
- мінімальне негативне значення косинуса перетворюється у значення ймовірності 0 та відповідає переміщенню вздовж осередків плаваючого вікна у напрямку, протилежному від цільової точки;
- інші негативні значення косинусів, розраховані для осередків плаваючого вікна, відображаються на інтервалі ймовірностей $]0 - 0.2[$.

Модель руху індивіда. Перед початком імітації руху індивіда з однієї клітини в іншу вибирається

напрямок руху (див. рис. 4) у діапазоні $[0...7]$, який відповідає умові досягнення максимальної ймовірності переміщення зі знайдених $P(0)...P(7)$. Якщо всі ймовірності руху з цього діапазону дорівнюють нулю, координати k індивіда не змінюються.

Якщо існує задана умова руху (тобто рішення прийнято), тоді координати переміщення k індивіда в одну з вільних клітин будуть розраховані за правилом визначення приросту координат, дані у операційному масиві щодо поточних координат k індивіда у просторі моделювання $(x; y)$ будуть замінені на нові.

Кожне подальше переміщення k індивіда в наступну клітину за час такту Δt визначається лінійними рівняннями:

$$\begin{cases} x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta x \\ y(t + \Delta t) = y(t) + \Delta y \end{cases}$$

Слід виділяти три види ситуацій, за яких переміщення k індивіда у клітину, матиме різний результат.

1. Переміщення у вільну клітину, що не викликає ніяких труднощів.
2. Переміщення у клітину, зайняту іншим індивідом, що спричинює ситуацію витиснення останнього з клітини без травм.
3. Переміщення у клітину, зайняту іншим індивідом, який має попереду себе перешкоду, що не дає йому можливості рухатися. У цьому випадку можуть статися зупинка руху або отримання травм внаслідок силового тиску.

Друга та третя ситуації для їх урахування у моделі потребують моделювання силового тиску в натовпі.

Модель силового тиску. У момент, коли інші індивіди починають тиснути на k індивіда, який не має можливості відступити від перешкоди, на нього починає діяти сила тиску \overline{F}_i , що дорівнює сумі сил тиску кожного з індивідів $k_1, k_2, k_3, \dots, k_i$, де середня сила тиску визначається за другим законом Ньютона і дорівнює $\overline{F}_i = \overline{m}_i \times \overline{a}_i$ (m – маса; a – прискорення).

Однак сила тиску \overline{F}_i на k_i індивіда матиме певні межі, про що свідчать результати дослідження, наведені у статті [14], де зроблено висновок про зменшення внеску задніх рядів індивідів у силу опору руху вже приблизно на 12-му індивіді. Таким чином, у разі збільшення кількості людей, їх сили тиску на індивіда, який знаходиться попереду, вирівнюються, що також слід ураховувати в алгоритмах моделі.

По-перше, необхідно враховувати активність та агресивність кожного індивіда, який створює тиск у натовпі. Для того, щоб мати можливість використовувати ці два показники у обчисленні кінцевої ймовірності переміщення індивіда в іншу клітинку, слід визначати їх на інтервалі $[0...1]$ або у процентах із наступним відображенням на зазначеному інтервалі ймовірності (рис. 7).

У моделі активний, але не агресивний індивід більш завзято переміщується до цільової точки. При цьому він майже не намагається витиснути іншого індивіда і у більшості випадків шукає іншу, незайняту клітинку для переміщення. Агресивний індивід, навпаки, створює тиск та передає його по ланцюжку вздовж напрямку переміщення. Якщо активність та агресивність групи індивідів визначаються випадковими значеннями (рис. 7), то імітаційне моделювання натовпу стає більш реалістичним. За допомогою моделі можливо створити групи людей з великим (малим) показником агресивності або активності (агресивні кластери натовпу).

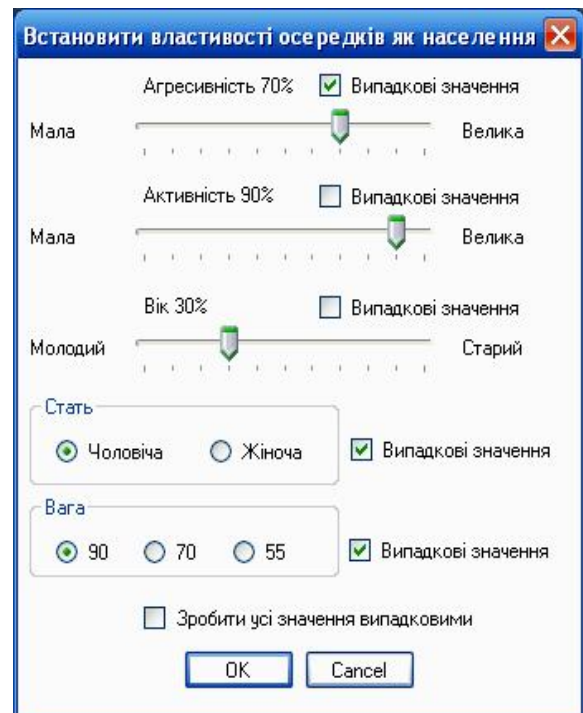


Рис. 7. Параметри моделі натовпу

По-друге, використовуючи показники активності та агресивності, слід розглядати два можливих варіанти поширення тиску у натовпі.

1. Тиск на індивіда з малим показником агресивності. За припущень, наведених вище, такий індивід не прикладатиме додаткове зусилля, а тільки передаватиме іншому індивіду по ланцюжку зусилля, що отримав. При цьому передане зусилля буде зменшене на $1/12$ [14]. Тобто на дванадцятому індивіду у ланцюжку таке зусилля буде майже повністю демпфоване.

2. Тиск на індивіда з великим показником агресивності. Припустимо, що у ланцюжку знаходяться послідовно кілька агресивних індивідів. Така ситуація можлива, наприклад під час формування кластера агресивних учасників натовпу, які виконують прорив загородження. Кожен з індивідів у такому ланцюжку додає зусилля у сумарний тиск, який поступово збільшується. Якщо на іншому кінці ланцюжка індивід сприймає такий величезний тиск та має можливість перейти у незайняту клітинку, то він буде витіснений. Якщо ж у цього індивіда немає шляху для відходу, існує ймовірність, що він буде травмований. У цьому випадку ймовірність травмування залежить від точкового, отриманого по ланцюжку, зусилля. Щоб кількісно оцінити його, можливо, наприклад, використати показник перевантаження $8g$, який є критичним під час польотів на літаках. Із поправкою на те, що об'єктом моделювання є менш фізично підготовлене цивільне населення та, враховуючи той факт, що у натовпі тиск буде точковим, а не розподіленим рівномірно по всій поверхні тіла, слід зменшити цей показник до значень $6-7g$.

Також під час моделювання тиску обов'язково необхідно враховувати стать та вагу індивіда. У моделі (див. рис. 7) є можливість вибирати три типових значення ваги, встановлювати чоловічу або жіночу стать для індивідів будь-якого фрагмента натовпу або моделювати випадкові значення цих параметрів.

Загальний алгоритм переміщення індивіда у моделі наведений на рис. 8.

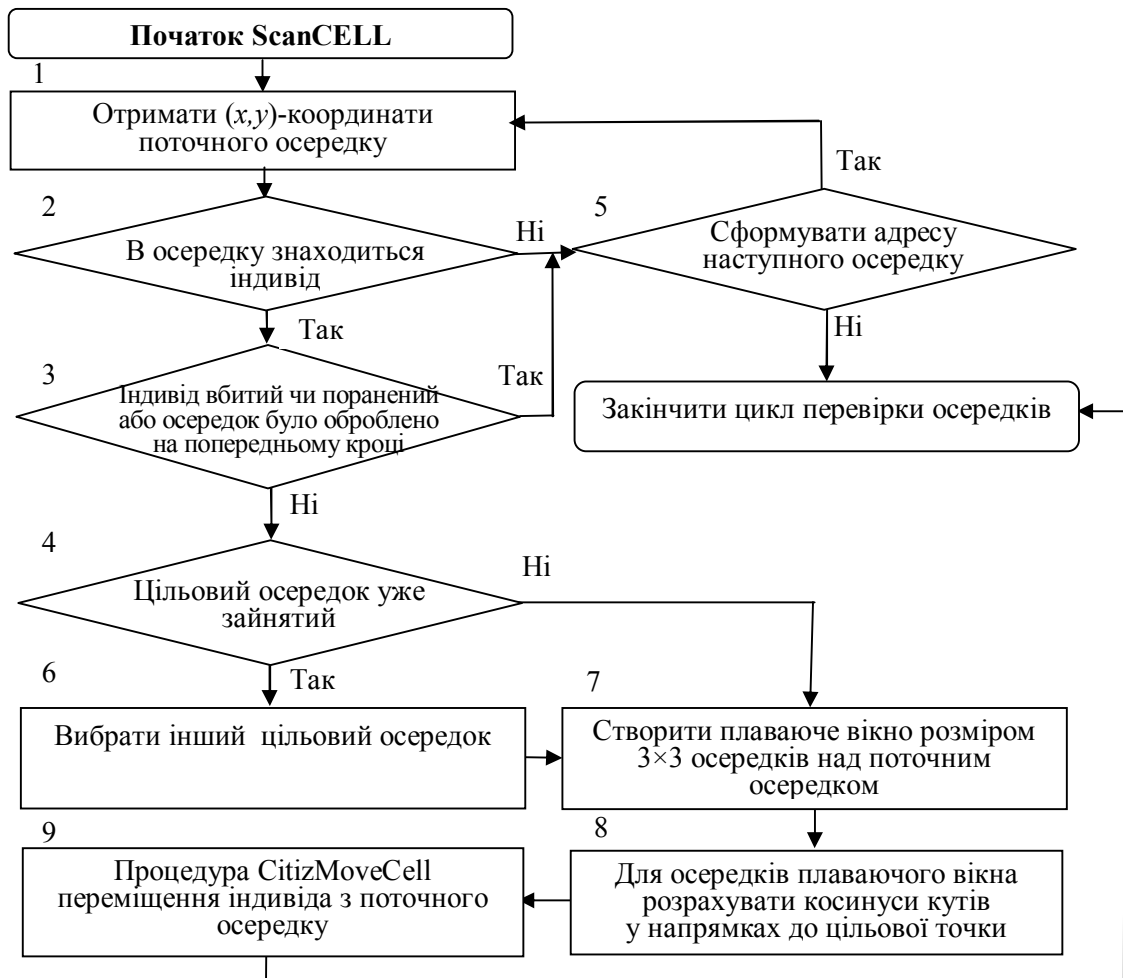


Рис. 8. Процедура ScanCell. Загальний алгоритм перевірки можливості переміщення індивіда з поточного осередку у напрямку до цільової точки

Як бачимо з рис. 8, головною частиною цього алгоритму є процедура *CitizMoveCell*, після виконання якої приймається рішення на переміщення індивіда у визначеному напрямку. У процесі сканування осередків декілька разів може бути здійснений рекурсивний виклик цієї процедури для визначення напрямку переміщення індивіда у натовпі.

Висновки

Модель дій натовпу, що розробляється як частина комплексної динамічної імітаційної моделі масових заходів, повинна враховувати не тільки дії натовпу, а й реакцію на них сил охорони правопорядку в єдиному середовищі. Проведений аналіз показує, що для відображення таких різномірних дій у єдиному просторі моделювання доцільно використовувати метод клітинних автоматів.

Наведені методи та підходи до реалізації такої моделі можуть скласти основу розроблення необхідного математичного та програмного забезпечення для дослідження можливої поведінки натовпу у русі і зіткненні з перешкодами в рамках моделі дій натовпу під час проведення масових заходів.

Список використаних джерел

1. Предтеченский, В. М. Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. М. Предтеченский, А. И. Милинский. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Стройиздат, 1979. – 376 с.
2. Гребенников, Р. В. Модель поведения толпы на основе локальных потенциальных полей [Текст] / Р. В. Гребенников // Интеллектуальные информационные системы : вестн. Воронеж. гос. ун-та. – 2009. – Вып. 1. – С. 46–50. – (Серия “Системный анализ и информационные технологии”).
3. Тоффоли, Т. Машины клеточных автоматов : пер. с англ. [Текст] / Т. Тоффоли, Н. Марголус. – М. : Мир, 1991. – 280 с.
4. Аптуков, А. М. Моделирование групповой динамики толпы, паникующей в ограниченном пространстве [Текст] / А. М. Аптуков, Д. А. Брацун // Вестн. Перм. гос. пед. ун-та. – 2009. – Вып. 3(29). – С. 18–23. – (Серия “Математика. Механика. Информатика. Механика. Математическое моделирование”).
5. Гребенников, Р. В. Обзор классических методов поведения толпы [Текст] / Р. В. Гребенников // Прикладные задачи моделирования и оптимизации. – Воронеж : ВГТУ, 2010. – С. 60.
6. Гребенников, Р. В. Обзор ADPLV и графоаналитического методов моделирования поведения толпы [Текст] / Р. В. Гребенников // Прикладные задачи моделирования и оптимизации. – Воронеж : ВГТУ, 2010. – С. 70.
7. Гребенников, Р. В. Способы оценки эффективности различных моделей поведения толпы [Текст] / Р. В. Гребенников // Вестник Воронежского государственного университета. – 2010. – Вып. 1. – С. 126–129. – (Серия “Системный анализ и информационные технологии”).
8. Moroshita, S. Evacuation of billboards based on pedestrian flow in the concourse of the station [Текст] / S. Moroshita, T. Shiraishi // Lecture notes in computer science. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. – № 4173. – P. 716–719.
9. Гребенников, Р. В. Моделирование поведения толпы с использованием локальных скалярных полей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Р. В. Гребенников. – Воронеж, 2011. – 113 с.
10. Нейман, Дж. Теория самовоспроизводящих автоматов [Текст] / Дж. Нейман. – М. : Мир, 1971. – 381 с.
11. Михайловская, Т. В. Применение клеточных автоматов для математического моделирования фазового перехода в эвтектических сплавах [Текст] / Т. В. Михайловская // Системные технологии: региональный межвузовский сб. науч. тр. – 2007. – Вып. 5(53). – С. 162–170.
12. Степанцов, М. Е. Математическая модель направленного движения группы людей [Текст] / М. Е. Степанцов // Математическое моделирование. – 2004. – Т. 16. – № 3. – С. 43–49.
13. Клеточные автоматы [Текст] : учебно-методич. пособие / Г. Б. Астафьев, А. А. Короновский, А. Е. Храмов. – Саратов : Колледж, 2003. – 24 с.
14. Кондратенко, О. П. Фізичне моделювання дії спецмашини для вилучення з натовпу особливо небезпечних груп [Текст] / О. П. Кондратенко, С. П. Мазін, Ю. О. Педько // Збірник наукових праць Академії ВВ МВС України. – Х. : Акад. ВВ МВС України, 2006. – № 1–2. – С. 16–20.

Стаття надійшла до редакції 04.11.2013 р.