

УДК 004.94:355.426.4:623.618

Г. А. Дробаха, Л. В. Розанова

МОДЕЛЮВАННЯ ДІЙ НАТОВПУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВОЇ ФАЗИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ОПЕРАЦІЇ З ПРИПИНЕННЯ МАСОВИХ ЗАВОРУШЕНЬ

Розглянуто методи моделювання дій натовпу, визначено їх недоліки. Запропоновано підходи до розроблення математичної моделі дії натовпу із застосуванням теорії клітинних автоматів, призначеної для дослідження поведінки натовпу під час руху і його зіткнення з перешкодами.

Ключові слова: моделювання натовпу, методи клітинних автоматів, моделі натовпу.

Постановка проблеми. За минулі роки масові страйки охопили всі куточки земної кулі: Греція (Афіни) – 2008 і 2010 рр.; Франція – 2009 і 2010 рр.; Північна Ірландія – 2009 і 2012 рр.; Велика Британія, Литва, Латвія та Молдова – 2009 р.; Іспанія, Португалія, Гаїті, Бразилія, Киргизстан, Німеччина, Сербія, Бельгія та Україна – 2010 р.; Грузія, Канада та Греція – 2011 р.; Єгипет – 2011, 2012 і 2013 рр.; Туніс, Лівія, Тегеран, Бахрейн, Ірак та Йемен – 2011 р., Азербайджан – 2013 р.

Як переконали гіркий досвід історії, майже всі ці соціально-політичні конфлікти переростали у масові заворушення, що призводило до застосування силової фази для їх подолання. Суспільна небезпека таких заворушень полягає у тому, що вони спроможні, хоча й тимчасово, паралізувати діяльність органів державної влади та управління, призвести до масштабних порушень громадського порядку, поставити під загрозу громадську безпеку, мати наслідком людські жертви, завдати суттєвої економічної шкоди державі, суспільству або конкретним особам. Зазвичай такі заворушення характеризуються участю в них великої кількості осіб незалежно від наявності чи відсутності попередньої змови і заздалегідь розробленого плану злочинних дій. Але ж у кожній окремій події можливо відокремити початкові мотиви і цілі, а саме: незадоволеність соціально-економічною ситуацією, діяльністю органів влади та управління (Литва, Латвія, Велика Британія – 2009 р.; Франція, Іспанія, Португалія, Данія, Німеччина – 2010 р.; Грузія – 2011 р.); націоналістичні спонуки (Франція – 2008 р.; Туреччина – 2009–2010 рр.; Киргизстан – друга половина 2010 р.; Азербайджан – 2013 р.); політичний екстремізм (Молдова – 2009 р., Греція та Киргизстан – 2010 р., Греція – 2001 р.; Єгипет – 2011, 2012 і 2013 рр.); хуліганські спонукання (Росія, Бразилія, Сербія – 2010 р.; Канада – 2011 р.); суперечності на релігійному підґрунті (Північна Ірландія – 2009 і 2012 рр.)

© Г. А. Дробаха, Л. В. Розанова

та ін. Проведений аналіз зазначених подій свідчить, що всі вони мають майже однаковий сценарій початкових передумов: економічні, соціальні, політичні – стихійні акції протесту; керовані або некеровані – погроми, підпали та знищення майна, опір представникам влади, що спричиняє жертви серед населення та великі матеріальні збитки.

Таким чином, потреба дослідження цієї тематики на сьогодні сумніву не викликає. Вона визначається збільшеною соціальною активністю мас і необхідністю вироблення формалізованого, систематизованого підходу до найбільш точного прогнозування і підбору методів управління масовою поведінкою з метою уникнення негативних соціальних вибухів.

Попередження і подолання негативних подій під час заворушень потребують від сил охорони правопорядку вміння передбачати їх розвиток, прогнозувати можливий характер дій натовпу (учасників заворушень) у різних конфліктних ситуаціях і на цій основі знаходити раціональні способи дій у відповідь. Це обумовлює актуальність розв'язування проблем удосконалення та створення таких моделей, які достатньо адекватно відображували б розвиток досліджуваних подій у просторі й часі. У цій статті розглядаються методи моделювання дій натовпу під час заворушень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У більшості створених раніше моделей люди у натовпі розглядалися як частинки [1; 2; 3], що взаємодіють за законами фізики. У напрямку руху таких людей-частинок діяла сила притягання, а під час зіткнення з іншими людьми або стінами “спрацьовувала” сила відштовхування. Такі моделі більш-менш адекватно описують поведінку натовпу, що складається з відносно невеликої кількості людей, але у міру збільшення щільності людського потоку необхідні рівняння стають дедалі складнішими – для того, щоб коректно описати те, що відбувається, треба вводити в

них дедалі більше нових параметрів.

На сторінках наукових видань неодноразово розглядалися питання моделювання натовпу різними методами. Так, у методах на основі *клітинних автоматів* простір, по якому переміщуються агенти, представляється у вигляді набору клітинок, що утворюють деяку періодичну сітку із заданими правилами переходу, які визначають стан клітинки у наступний момент часу через стан таких клітинок, що знаходяться від неї на відстані не більше деякої, у попередній момент часу. У методах на основі *ньютонівської механіки* всі соціальні сили, що діють на агента у натовпі, виражаються у вигляді фізичних сил, тому рух агента описується на основі другого закону Ньютона. Відповідно *мультиагентний* метод моделювання передбачає не опис динамічної системи у цілому, а створення набору елементарних правил, яким підкоряється будь-який агент у натовпі. У методі на основі *фізичних процесів* (“молекулярної”) динаміки *рідини* кожен елемент натовпу є частинкою, стан якої описується рівняннями динаміки рідини (наприклад, рівняннями Нав’є-Стокса). Методи, що ґрунтуються на даних, отриманих з реальних спостережень за поведінкою натовпів у різних умовах, частіше мають вузьку спрямованість (застосовуються, наприклад, тільки для моделювання пожежної евакуації). У *графоаналітичному* методі на підставі отриманих даних математично описуються прості закономірності у поведінці потоку натовпу у разі виникнення певного набору базових ситуацій. Ця модель поведінки натовпу може описати лише набір його статистичних параметрів, таких, як середня швидкість і середня щільність на певній ділянці, а також час досягнення мети. У *гібридних* методах використовується комбінація кількох згаданих вище підходів.

У деяких наукових працях [4] для моделювання поведінки натовпу прийнято рішення використати *чисельний метод*. Відповідно до вибраного методу було розроблено набір інструментальних і алгоритмічних засобів, що дозволяють візуалізувати поведінку віртуального натовпу і проводити аналіз отриманих результатів.

Детальніше аналіз розглянутих методів було проведено у працях [5; 6; 7]. Так, до недоліків методів на основі *ньютонівської механіки* варто віднести неможливість моделювання гетерогенних (різнорідних) натовпів.

Мультиагентний метод у процесі моделювання, як згадується вище, не дає можливості описувати динамічну систему в цілому, що вкрай необхідно для побудови комплексної динамічної моделі силової фази спеціальної операції. До мінусів *графоаналітичного методу* належать висока складність розрахунків, незважаючи на уявну простоту цього методу, а також проблеми із заданням поведінки натовпу, що не дозволяє зробити чітку й однозначну декомпозицію дій. До недоліків *гібридного підходу* варто віднести складність поєднання кількох підходів у рамках однієї моделі через різні методики опису взаємодій усередині натовпу тощо.

Модель дії натовпу, що розглядається у статті, розробляється як складова частина комплексної динамічної імітаційної моделі силової фази спеціальної операції, що повинна враховувати не тільки дії натовпу, але й реакцію на них сил охорони правопорядку для відповідного середовища. Проведений аналіз свідчить, що для відображення таких різнорідних дій у єдиному просторі моделювання доцільним стає використання методу клітинних автоматів.

Основна перевага підходу на підставі клітинних автоматів – це відносна простота реалізації самого автомата і нескладний опис правил, що є досить позитивним для одночасного моделювання дій як натовпу, так і сил охорони правопорядку у єдиному просторовому середовищі. Також гомогенність (однорідність) модельованого натовпу може дати перевагу під час вивчення однорідних натовпів. Незважаючи на свою простоту, на практиці клітинні автомати показують достатньо високий ступінь відповідності результатів моделювання і натурних експериментів. Наприклад, у праці [8] було проведено моделювання потоку пасажирів у метро м. Токіо на середній розмір станції Хамачи, а також перевірку достовірності отриманих результатів на основі реальних даних. Результат показав високий відсоток відповідності досліджуваної моделі до поведінки справжніх пасажирів у метро.

Незначним недоліком цього підходу можна вважати дискретність поведінки елементів натовпу як у часі, так і у 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 дії натовпу для дослідження можливої поведінки натовпу під час руху і зіткнення з перешкодами у рамках моделі силової фази спеціальної операції з припинення масових заворушень.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Клітинні автомати широко застосовують для створення фізичних, біологічних, хімічних та інших моделей унаслідок того, що саме поняття клітинного автомата ототожнюється з поняттям "поле". У зв'язку з цим клітинний автомат виявляється ідеальним середовищем для вирішення диференціальних рівнянь і рівнянь у часткових похідних: рівняння Нав'є-Стокса, рівняння теплопровідності і хвильового рівняння [10]. З іншого боку, клітинні автомати показали свою високу ефективність для вирішення завдання твердіння за наявності фазових переходів складної структури [11], що дозволяє їх ефективно використати для опису поведінки динамічних систем на дискретній мові клітинних автоматів. Для моделювання руху натовпу Т. Тоффоли і Н. Морголуз запропонували використати клітинний автомат, що описує дифузійні процеси. Автор наукової праці М. Є. Степанцов розробив клітинно-автоматну модель руху, яка ґрунтується на рівнянні газодинаміки, і розвинув її надалі шляхом додавання до дифузійної складової спрямованого руху [12]. Крім того, у процесі моделювання руху натовпу значне місце займає питання опису поведінки людини в екстремальних ситуаціях мовою клітинних автоматів [13], що призводить до визначення ймовірності переходів у кожний напрямок. Ймовірність може бути обчислена з урахуванням міри знання геометрії простору, бажання рухатися у певному напрямку, властивості людей триматися на відстані від інших людей і від перешкод, які варіюються залежно від ситуації. Необхідно також передбачити правила вирішення конфліктних ситуацій, пов'язаних з тим, що на одне й те ж саме місце може претендувати кілька осіб одночасно.

Таким чином, у процесі розроблення моделі дій натовпу під час силової фази спеціальної операції на основі методу клітинних автоматів з урахуванням суттєвих для дослідження ознак оригіналу моделі слід визначити такі гіпотези, припущення й обмеження:

1) за один такт роботи моделі індивід (окрема людина) здатний або переміщуватися на одну клітину, або залишатися на місці;

2) переміщення індивіда на площині відповідно до даного середовища згідно з маршрутом (на сусідню клітину), тобто рух упродовж наперед заданим напрямкам від 0 до 7 і визначається ймовірностями $P_0 \dots P_7$ того, що ним буде прийнято рішення на переміщення у даному напрямку;

3) за неможливості рухатися у заданому i -му напрямку (наявності на шляху непереборних перешкод або значної кількості інших індивідуумів тощо) ймовірність руху індивіда у цьому напрямку дорівнюватиме 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 всі можливі напрямки руху індивіда від 0 до 7 (уздовж ліній сітки і по діагоналях);

5) стан кожної клітини цієї сітки відповідає наявності або відсутності індивіда у цій точці, наявності або відсутності перешкод і т. ін.;

6) характеристика індивіда задана заздалегідь;

7) усі величини, про які йтиметься, належать множині цілих чисел;

8) розмір однієї клітини приймається таким, що дорівнює розміру середнього поля, яке може займати один індивідуум;

9) середовище дії натовпу є замкненим двовимірним евклідовим простором з розмірністю $m \times n$.

Структура імітаційної моделі дій натовпу наведена на рис. 1.

Модель натовпу включає моделі окремо взятих індивідуумів, кожна з яких складається з таких моделей:

– модель прийняття рішення на рух, яка визначає, рухається або знаходиться на місці індивід, а якщо рухається, то в якому напрямку і куди;

– модель руху індивідуума, яка визначає порядок переміщення індивіда з однієї клітини на іншу;

– 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 заворушення. Візуально таку модель подано у вигляді ортогональної сітки, що задає простір моделювання та можливі напрямки руху індивіда (уздовж ліній сітки та по діагоналях). У простішій моделі середовище розглядається як замкнений двовимірний евклідовий простір

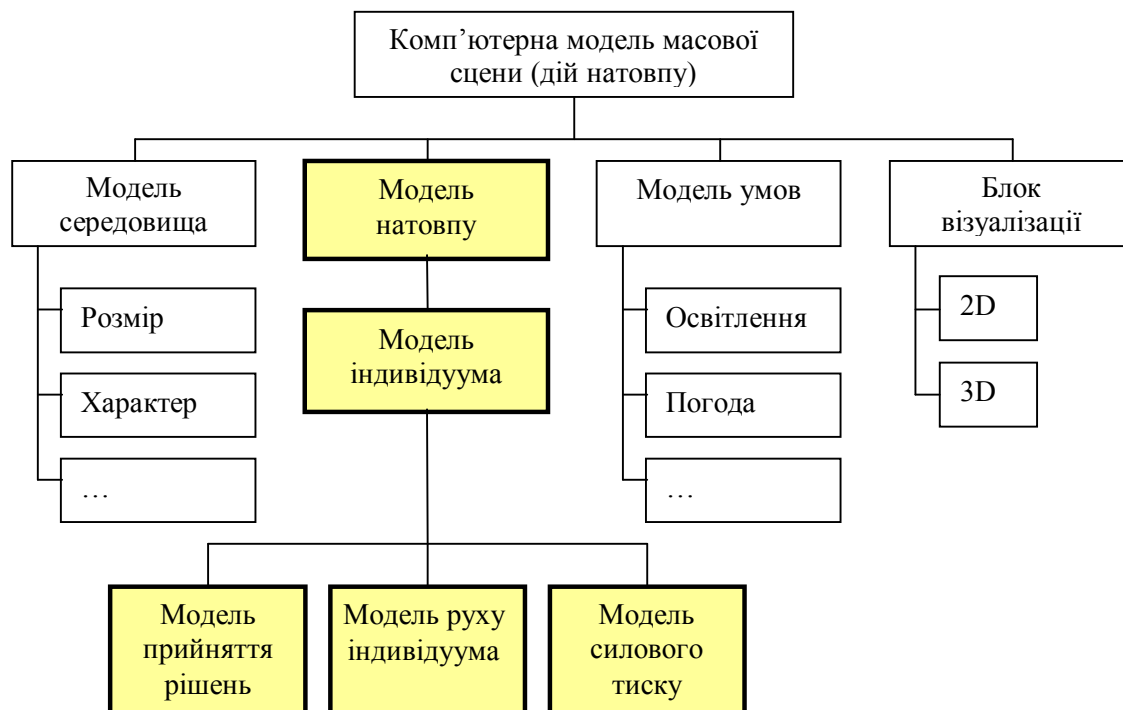


Рис. 1. Структурна схема імітаційної моделі дій натовпу

розмірністю $m \times n$. Розмір однієї клітини на полі дій дорівнює розміру середнього індивідуума і заданий в обмеженнях з початку моделювання.

Кожна клітина ортогональної сітки має свої ознаки, які або формуються 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, загородження, перешкоди);
- 4) рух не бажаний (існують якісь правила обмеження руху);
- 5) зайнята індивідуумом;
- 6) вільна.

Модель умов, у яких відбуваються дії натовпу, відображує ознаки як фізичних умов, у яких відбуваються події (освітлення, погодні умови, час доби, пора року тощо), так і умов, за яких організовані групи індивідуумів можуть перетворюватися на панічний натовп. Наведемо їх.

1. Соціальні умови – напруженість у суспільстві, викликана природними, економічними, політичними лихами, що сталися або можуть бути. Інколи напруженість

обумовлена пам'яттю про трагедію і (або) передчуттям трагедії, що насувається.

2. Фізіологічні умови (втома, голод, тривале безсоння, алкогольне і наркотичне сп'яніння) знижують рівень індивідуального самоконтролю, що у разі масового скупчення людей загрожує особливо небезпечними наслідками.

3. Загальнопсихологічні умови (несподіванка, здивування, переляк), викликані недостатністю інформації про можливі небезпеки і способи протидії.

4. Соціально-психологічні та ідеологічні умови – відсутність ясної і високозначущої загальної мети, ефективних та таких, що мають загальну довіру, лідерів, і відповідно низький рівень групової згуртованості.

Модель натовпу містить у собі блок формування даних про натовп, блок управління моделюванням дій натовпу та базу даних про натовп. Блок формування даних про натовп на підставі вхідних даних про характеристики натовпу, що моделюється (кількість людей, процентне співвідношення за категоріями учасників, вихідне положення та стан тощо), формує початковий стан операційного масиву (*масиву індивідуумів*), розмірність якого визначається вихідним (заданим користувачем) розміром натовпу. Якщо загальну кількість людей у натовпі прийняти рівною u , а

операційний масив розглядати як кортеж K , то масив індивідуумів матиме вигляд

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

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

Кожному індивідуові відповідатиме низка ознак і даних про нього. Загальна ознака для всіх індивідуумів згідно з поставленими обмеженнями залишається незмінною – це розмір, який у середньому дорівнює заданій розмірності $L \times R$ однієї клітини на полі (рис. 2).

Передбачаються такі ознаки і дані, які можуть змінюватися залежно від особливостей індивіда та його поведінки:

- 1) належність (до якого політичного руху належить індивід і т. ін.);
- 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).

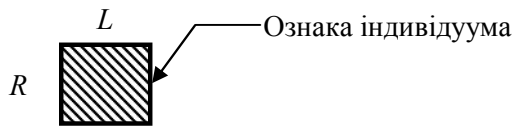


Рис. 2. Розмірність індивідуума

Блок управління моделюванням дій натовпу призначений для формування у кожному такті роботи моделі поточного стану операційного

масиву відповідно до алгоритмів моделі індивідуума, що розглядаються далі, визначення умов закінчення моделювання та розрахунку значень інтегрованих характеристик натовпу. При цьому у кожному такті здійснюється послідовний перебір елементів операційного масиву (масиву індивідуумів), і за допомогою моделі індивідуума для тих умов, що склалися, формується їх нове значення.

Модель прийняття рішення на рух. Її призначення – визначити, рухається індивід або стоїть на місці. Переміщення індивіда імітується по клітинках уздовж можливих напрямків $[0 \dots 7]$ і визначається ймовірностями $P_0; P_1; P_2; P_3; P_4; P_5; P_6; P_7$, де P_i – імовірність того, що k -й індивід у поточному такті переміститься в l -ту клітину (рис. 3).

У ортогональної двовимірної сітки сусідами заданої клітини-індивіда будуть чотири клітини, що мають з даною загальну сторону (окіл фон Неймана), і ще чотири, що лежать по діагоналі (окіл Мура).

Нехай k – це деякий заданий нами індивід, що має координати (i, j) у початковий момент часу t , який “бажає” рухатися у напрямку q (мета, до якої прагнутиме k -й індивід), а стан середовища розмірністю $m \times n$ описується функцією стану F , де f_{ij} містить інформацію про стан клітини з координатами (i, j) (див. рис. 4):

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

де f_{ij} – стан однієї з клітин з координатами (i, j) .

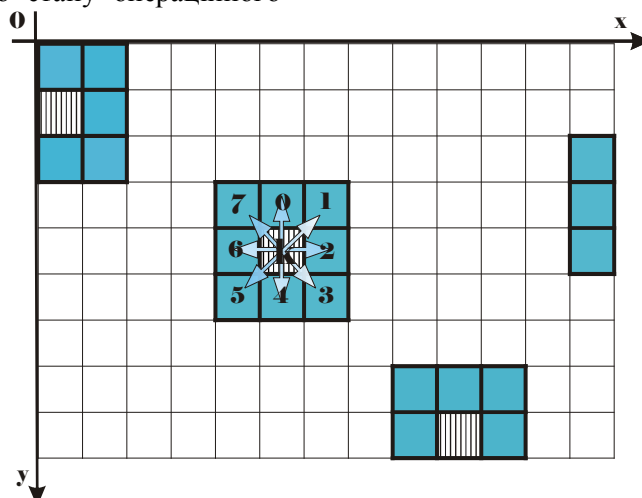


Рис. 3. Порядок імітації переміщення k -го індивіда в l -ту клітину уздовж можливих напрямків $[0 \dots 7]$

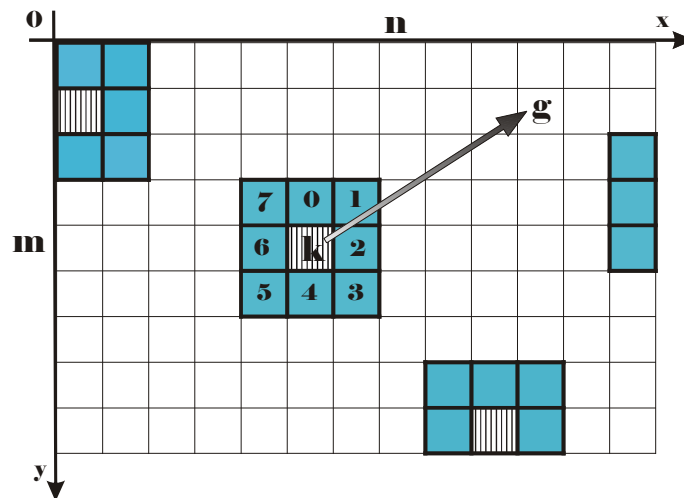


Рис. 4. Приклад стану k -го індивіда, “бажаючого” рухатись у напрямку q у початковий момент часу t , та його положення у координатах (x, y)

Тоді правила обчислення ймовірності переміщення індивіда $P_{ij}(0) \dots P_{ij}(7)$ із цієї клітини у сусідні має сенс застосовувати тільки до тих клітин, для яких $f_{ij} = 0$, тобто клітина не зайнята перешкодами або іншими індивідуумами. З урахуванням цього ймовірність переміщення k -го індивіда на один крок у заданому напрямку буде визначатися таким чином:

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

де P_{lf} – ймовірність того, що шлях у l -му напрямку доступний, $l = \{0 \dots 7\}$ (клітина l не зайнята);

P_{kl} – ймовірність того, що k -й індивід рухатиметься (задається у початкових даних);

P_{kq} – ймовірність того, що цей індивід рухатиметься у напрямку q .

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

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

а ймовірність того, що індивід переміщається, наперед задана:

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

Для обчислення P_{kq} ймовірності того, що k -й індивід рухається у напрямку q , доцільно вибрати нормальний розподіл, зрізаний на інтервалі $[0; 2\pi]$ із щільністю ймовірності $r(\alpha)$, яка наведена на рис. 5:

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

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

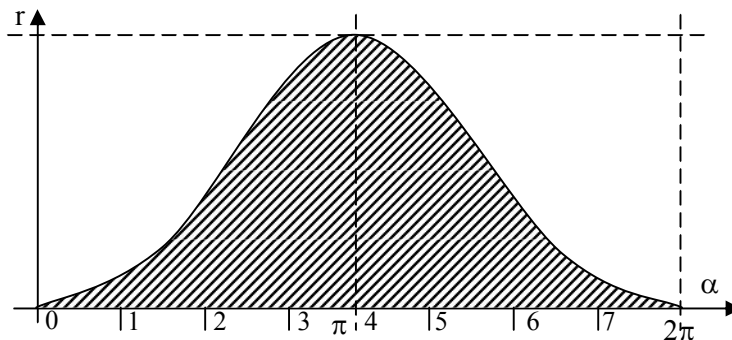


Рис. 5. Щільність ймовірності для нормального розподілу, зрізаного на інтервалі $[0; 2\pi]$

Отже, ймовірність P_{kq} того, що k -й індивід рухатиметься у тому чи іншому напрямку, визначається як

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

де Z_n, Z_e – верхній і нижній межі інтегрування; α_q – азимут напрямку на ціль q ; $r(\alpha)$ – щільність розподілу на інтервалі $[0; 2\pi]$.

У таблиці 1 подано межі інтегрування у напрямках руху k -го індивідуума.

Модель руху індивідуума. Перед початком імітації руху індивіда з однієї клітини в іншу вибирається напрямок руху (див. рис. 3) 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, то координати k -го індивіда не змінюються.

Якщо є задана умова руху (тобто рішення прийнято), то координати переміщення k -го індивіда в одну з вільних клітин будуть розраховані згідно з правилом визначення приросту координат (табл. 2) і дані в операційному масиві щодо поточних координат k -го індивіда у просторі моделювання (x ; y) будуть змінені на нові.

Кожне подальше переміщення k -го індивідуума у 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, у яких переміщення індивідуума у потрібну для нього клітину матимуть різні результати. Наведемо

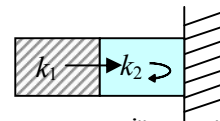
1. Переміщення k -го індивідуума у вільну клітину, що не викликає ніяких труднощів:



2. Переміщення k -го індивідуума у клітину, зайняту іншим індивідом, яке викликає ситуацію витіснення цього індивіда з клітини без травм:



3. Переміщення k -го індивідуума у клітину, зайняту іншим індивідом, який має попереду себе перешкоду, що не дає йому можливості рухатися. У результаті можуть статися зупинка руху, а у деяких випадках – отримання травм унаслідок силового тиску:



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

Модель силового тиску. Коли інші індивіди починають напірати на k -го індивіда, який не має можливості відступити від перешкоди, тоді на нього починає діяти сила тиску \bar{F}_4 , що дорівнює сумі сил тиску кожного з індивідуумів k_1, k_2, k_3 (рис. 6), де середня сила тиску визначається згідно з другим законом Ньютона і дорівнює $F = m \cdot a$ (m – маса; a – прискорення):

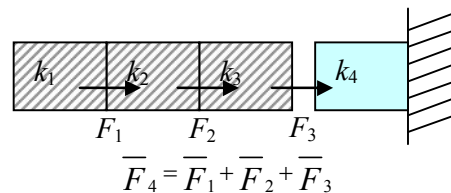


Рис. 6. Сила тиску \bar{F}_4 , що діє на k_4 індивідуума

Таблиця 1

Межі інтегрування у напрямках руху k -го індивідуума

Напрямок руху	0	1	2	3	4	5	6	7
Z_n	-22,5	22,5	67,5	112,5	157,5	-157,5	-112,5	-67,5
Z_e	22,5	67,5	112,5	157,5	-157,5	-112,5	-67,5	-22,5

Таблиця 2

Приріст координат переміщення k -го індивідуума в одну з вільних клітин

Номер клітини	0	1	2	3	4	5	6	7
Δx	0	1	1	1	0	-1	-1	-1
Δy	-1	-1	0	1	1	1	0	-1

приклад.

Однак сила тиску \bar{F}_4 на k_4 індивіда матиме певні межі, про що свідчать результати експертного дослідження, які описані у статті групою авторів (О. П. Кондратенко, С. П. Мазін, Ю. О. Педько) [14]. Із експерименту згідно зі статтею зроблено висновок про зменшення внеску задніх рядів індивідуумів у силу опору руху вже приблизно на 12-му індивідуумі. Таким чином, у разі збільшення кількості людей їх сили тиску на об'єкти, які знаходяться попереду, вирівнюються, що також слід ураховувати в алгоритмах моделі.

Висновки

Модель дѣй натовпу, що розробляється як складова частина комплексної динамічної імітаційної моделі силової фази спеціальної операції, повинна враховувати не тільки дѣй натовпу, але й реакцію на них сил охорони правопорядку для відповідного середовища. Проведений аналіз свідчить про те, що для відображення таких різнорідних дѣй у єдиному просторі моделювання доцільним стає використання методу клітинних автоматів.

Наведені методи і підходи до реалізації такої моделі можуть скласти основу розроблення необхідного математичного та програмного забезпечення для дослідження можливої поведінки натовпу під час руху і зіткнення з перешкодами у рамках моделі силової фази спеціальної операції з припинення масових заворушень.

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. Тоффолі, Т. Машины клеточных автоматов [Текст] / Т. Тоффолі, 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 // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. – 2010. – Вып. № 1. – (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. гос. ун-т. – 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 : регион. межвузов. 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] : учеб.-метод. пособие / Г. Б. Астафьев, А. А. Короновский, А. Е. Храмов. – Саратов : ГосУНЦ “Колледж”, 2003. – 24 с.

14. Фізичне моделювання дѣй спецмашини для вилучення з натовпу особливо небезпечних груп [Текст] / О. П. Кондратенко, С. П. Мазін, Ю. О. Педько // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. – Х. : Акад. ВВ МВС України, 2006. – № 1–2. – С. 16–20.

Стаття надійшла до редакції 11.06.2013 р.

Рецензент – доктор технічних наук, професор О. О. Морозов, Академія внутрішніх військ МВС України, Харків, Україна