

УДК 004.942

В. В. Мезеря, П. І. Щербатюк

*НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»*

## МЕХАНІЧНИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ НАТОВПУ

В роботі представлена реалізація механічного підходу до моделювання поведінки натовпу. Проведені модифікації, які дозволили розширити область її застосування та підвищити точність моделювання. Проаналізовані переваги та недоліки модифікованої моделі та намічені шляхи подальшого покращення та розвитку моделі з метою підвищення її придатності до реальних застосувань.

**Ключові слова:** *динаміка натовпу; алгоритми пошуку шляху; паніка; поведінка людини.*

В работе представлена реализация механического подхода к моделированию поведения толпы. Проведенные модификации, которые позволили расширить область ее применения и повысить точность моделирования. Проанализированы преимущества и недостатки модифицированной модели и намечены пути дальнейшего улучшения и развития модели с целью повышения ее пригодности к реальным приложениям.

**Ключевые слова:** *динамика толпы; алгоритмы поиска пути; паника; поведение человека.*

In modern society, the problem of moving large masses of people in the premises is very relevant. With the development of globalization and the rapid growth of the planet's population, the question of studying the laws of the crowd is becoming more acute. In modern cities, population density is very high, even higher in crowded places: public transport, stadiums, concert venues, mass events on the streets of the city, etc. Usually this does not cause problems, but when an emergency occurs (fire, terrorist act), large crowds of people in a confined space become a source of great danger. Modeling and predicting their behavior in these conditions is a very important task in the context of designing buildings and organizing mass events in terms of safety and comfort. The analytical solution of this problem is difficult to obtain not so much because of the complexity of the mathematical model, but because of the large number of unknown parameters and external factors. The approach used in this work is based on potential forces of a social nature and ordinary physical effects such as friction, elastic collisions, and others. This approach originates from the works of famous mathematician Dirk Helbing. As part of this article,

we will try to improve this approach and expand the scope of its possible use through the use of path search algorithms on the plane. This will allow the method to be used in places with complex geometry, many inputs and outputs, and to simulate additional effects by varying the parameters of the algorithm. An algorithm for finding the shortest path on the plane  $A^*$  was chosen as the base one. The purpose of the article is to implement a mechanical approach to modeling the dynamics of the crowd, analysis of its work, modifications, which will expand the scope of its application and improve the accuracy of modeling. The following aspects of the problem were considered in the article: modeling on the basis of a mechanical model of the dynamics of the crowd, the use of algorithms for finding the shortest path on the plane to expand the scope of the model, visualizing the modeling process, estimating the model by quantitative and qualitative parameters. As a result, the implementation of this model was developed, experiments carried out and demonstrated its strengths and weaknesses.

**Key words:** *crowd dynamics; pathfinding algorithms; panic; pedestrian dynamics.*

**Вступ.** У сучасному суспільстві проблема переміщень великих мас людей у приміщеннях є дуже актуальною. Моделювання та передбачення їх поведінки у цих умовах – дуже важлива задача в контексті проектування будівель та організації масових заходів з точки зору безпеки та комфорту. Аналітичний розв'язок цієї задачі важкий не стільки через складність математичних моделей, скільки через велику кількість невідомих параметрів (настрій, темперамент, психічна стійкість кожної людини) та зовнішніх сил.

Комп'ютерне імітаційне моделювання натовпу в обмеженому просторі – це ефективний спосіб проаналізувати поведінку людей. У статті розглядається модель, що вперше була запропонована Діркком Хелбінгом у статті «Simulating dynamical features of escape panic» [1]. Вона заснована на русі масивних тіл під дією сил психосоціальної природи та чисто фізичних сил, тому підхід був названий механічним.

**Огляд аналогів.** У процесі підготовки роботи було розглянуто два альтернативних підходи до вирішення поставленої задачі. Перший, описаний у роботі [2], заснований на понятті клітинного автомату. Перевагою методу є дискретність станів моделі, що спрощує аналіз її стану. Прості правила переходу між станами значно зменшують складність обчислень, водночас їхня правильна комбінація може дати високу достовірність результатів моделювання. До недоліків моделі можна віднести той факт, що рух людей за своєю природою є неперервним і дуже залежить від чисто фізичних ефектів (інертність, тертя та ін.), а у моделі клітинних автоматів ці складові не

моделюються безпосередньо.

Другий – у статті [3] оснований на агентному підході, в такому підході визначаються стани агентів з їх характеристиками, правила взаємодії агентів та правила прийняття рішень. Це дозволяє змоделювати динаміку стану системи як результат взаємодії автономних агентів. Перевага методу полягає в тому, що зникає необхідність розв’язання складної системи рівнянь, замість цього розв’язок задається безпосередньо за допомогою предикатів. Недолік, як і у попереднього – недостатнє врахування фізичних ефектів.

**Постановка задачі.** Механічний підхід заснований на взаємодії агентів як твердих тіл малого розміру (у даному випадку – сфер), на які діють фізичні сили та сили психосоціальної природи.

Основне рівняння цієї моделі, яка більш детально розглядається в статті [5], має вигляд:

$$m_i \frac{d\vec{V}_i}{dt} = \overline{F_i^{nan}} + \sum_{i \neq j} \overline{F_{ij}} + \sum_m \overline{F_{im}^{cm}}$$

У це рівняння входять 3 доданки:

– Перший – це так звана «сила паніки», що зумовлена бажанням людини покинути приміщення  $\overline{F_i^{nan}}$ , ця сила направлена найкоротшим шляхом від поточного положення агента до найближчого виходу;

– Другий – сила взаємодії між людиною та іншими людьми  $\overline{F_{ij}}$ , що направлена в іншу сторону від агента;

– Третій – сила взаємодії між людиною та перешкодами  $\overline{F_{im}^{cm}}$  – направлена в іншу сторону від перешкоди.

Перший доданок виглядає так:

$$F_i^{nan} = M_i \frac{\overset{\rightarrow \text{баж}}{V_i} - V_i}{\Delta t_i}, \quad (1)$$

де  $M_i$  – маса і-го агента, кг;

$\Delta t_i$  – параметр, що характеризує час залучення індивіда в натовп, який панікує, с;

→ *баж*

$V_i$  – бажана швидкість руху *i*-го агента, м/с;

→

$V_i$  – фактична швидкість руху *i*-го агента, м/с. Сила (1)

влаштована таким чином, що в разі перевищення бажаної швидкості над актуальною людина прискорюється. Як бачимо, саме невідповідність бажаної швидкості з актуальною і формує основну силу, що створює рух.

Крім сили (1), яка має психологічний характер і в загальному випадку формується незалежно від групової динаміки, в процесі переміщення на людину діють інші сили, пов'язані зі взаємодією людини з іншими людьми і перешкодами. Розглянемо силу, що діє на індивіда *i* з боку індивіда *j*:

$$\vec{F}_{ij} = A \vec{n}_{ij} \exp \frac{D_{ij}}{B} + kH(D_{ij})D_{ij} \vec{n}_{ij} + kH(D_{ij})D_{ij} ((\vec{V}_j - \vec{V}_i) \vec{\tau}_{ij}) \vec{\tau}_{ij}, \quad (2)$$

де  $D_{ij} = R_i + R_j - |\vec{r}_i - \vec{r}_j|$ , м;

$\vec{n}_{ij}$  і  $\vec{\tau}_{ij}$  - нормальний і тангенціальний одиничні вектори;

$A, B, k$  - параметри, що регулюють різні аспекти поведінки людини у натовпі,

→ →

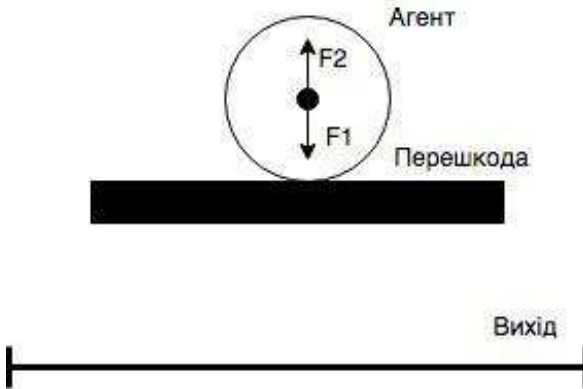
$V_j - V_i$  - різниця швидкостей *i*-го та *j*-го агентів, м/с;

$H()$  - функція Гевісайда.

Перший доданок в (2) являє собою силу, так само як і у формулі (1), психосоціальної природи. Вона описує небажання людини вступати в занадто тісний фізичний контакт з іншими людьми. Друга і третя складові в (2) мають традиційний для механіки вид, одна з них описує пружне відштовхування при лобовому зіткненні між індивідами, а друга – силу тертя при дотичному русі.

В рамках цього підходу [1] кожен учасник руху в натовпі розглядається як тверде пружне тіло, а правила взаємодії між людьми задаються за допомогою спеціально підібраних потенційних сил психологічного, соціального і фізичного походження. Людина – складна система, поведінку якої складно описати набором простих взаємодій. Однак в умовах паніки свідомість індивіда змінюється, і він починає діяти подібно до автомата, рефлекторно відповідаючи на зовнішні подразники.

**Підзадача пошуку шляху.** При моделюванні динаміки натовпу у просторі зі складною геометрією було виявлено такий недолік, як неспроможність інтелектуально спланувати свій маршрут, наприклад, обминання перешкод, перпендикулярних до руху агента. Це обумовлено тим, що рівнодіюча усіх сил, що впливають на агента, залежить тільки від механічного впливу з боку середовища та психосоціальної сили, що завжди направлена в бік виходу. Це ускладнює навігацію агента у просторі зі складною геометрією. Уявимо ситуацію, що зображена на рис. 1 – рівнодіюча сил, що діють на агента –  $F_1$  направлена перпендикулярно перешкоді, що знаходиться на шляху до виходу. Коли агент досягне перешкоди, з'явиться протидіюча сила  $F_2$ , яка скомпенсує силу  $F_1$  та призведе до зупинки агента. З плином часу вона не буде змінюватися за напрямком та модулем, а якщо і змінюватиметься, то незначно (наприклад, коли інші агенти сткатимуться з ним), тому агент залишиться на місці, що в більшості випадків не відповідає поведінці людини.



**Рисунок 1 – Приклад геометрії простору, при якій агент не в змозі дістатись виходу**

Тому постала задача, як, залишивши незмінним механізм розрахунку величин цих сил, можна скорегувати спосіб визначення їхнього напрямку таким чином, щоб агенти у будь-якому за складністю середовищу змогли знайти шлях до виходу (якщо він існує).

Для інтелектуального планування маршруту та обминання перешкод було застосовано алгоритми пошуку найкоротшого шляху на площині –  $A^*$  [6]. Для коректної роботи алгоритмів цього класу їм на вхід необхідно подати дискретну матрицю, в якій координати комірок –

цілі числа, та комірка може бути або перешкодою, або вільним місцем, але в нашій моделі простір, яким рухаються агенти, має неперервні координати, тому ми вводимо деяку величину – «крок сітки», яка показує скільки реального простору вміщуються в одну комірку матриці. Ми розбиваємо простір на комірки відповідно до цього кроку. Координатою комірки на реальному полі вважається центр кожної комірки. За допомогою алгоритму визначення приналежності точки багатокутнику заповнюємо комірки матриці наступним чином: якщо центр комірки належить перешкоді – то комірка відмічається як перешкода на вихідній матриці.

Після побудови матриці для кожного агента будується найкоротший шлях до виходу відповідно до алгоритму. Шлях складається з координат комірок, ці координати ми переводимо назад в реальні, вважаючи що цільова точка маршруту знаходиться в центрі комірки.

Щоб мати змогу визначати поточний напрямок сили  $\overline{F^{nan}}$ , вводимо поняття проміжного пункту, який встановлюється в центр комірки, яка входить до знайденого алгоритмом найкоротшого шляху. Коли агент досягає чергового проміжного пункту, він перемикається на наступний, тобто сила  $\overline{F^{nan}}$  буде направлена вздовж прямої, що з'єднує центр агента та новий проміжний пункт. Останній пункт завжди лежить на прямій, що представляє вихід. Тобто агент рухається під дією все тієї ж сили  $\overline{F^{nan}}$ , але при цьому прямує прокладеним маршрутом та може знайти вихід.

#### **Формування кількісних оцінок результатів симуляції**

Для оцінки адекватності моделі доцільно використати кількісні оцінки [5]. Модель дозволяє розрахувати наступні параметри натовпу, такі як:

- середнє та максимальне навантаження на агента (для усіх агентів), Н;
- середня та максимальна швидкість, м/с;
- кількість травмованих агентів (таких, що перенесли навантаження, що перевищує граничне допустиме значення), од.

За цими параметрами можна кількісно оцінювати придатність поточної конфігурації приміщення до сценарію подій, що моделювалися. Ці дані можна використати для експертної оцінки щодо відповідності приміщення нормам пожежної безпеки.

**Якісні оцінки результатів симуляції.** Окрім кількісних

характеристик симуляції модель дозволяє візуалізувати процес симуляції, тобто якісно оцінити вдалість конфігурації. Це спрощує сприйняття людиною інформації та розширює спектр параметрів, за якими можна зробити оцінку симуляції.

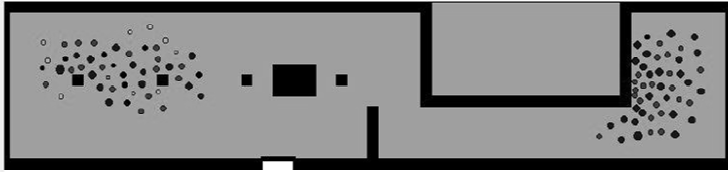


Рисунок 2 – Початкова стадія руху натовпу



Рисунок 3 – Кінцева стадія руху натовпу

На основі описаної моделі було розроблено програмний засіб з використанням мови програмування C++ та фреймворка Qt. Застосування дозволяє проводити симуляції, візуалізувати процес та обраховувати вищенаведені кількісні оцінки. На рисунках 2-3 зображені кадри з симуляції у деякому приміщенні. На них видно деякі з вказаних особливостей поведінки панікуючого натовпу.

Аналізуючи візуалізацію симуляцій, можемо зробити висновок, що модель успішно відтворює наступні особливості поведінки натовпу:

- агенти досить сильно сповільнюються при пересуванні вздовж перешкод. Це викликано тертям між агентами та перешкодами. Слід уникати вузьких проходів та предметів посеред проходу, які ущільнюють агентів та примушують їх сильно притискатись до перешкод;
- при обминанні гострих кутів перешкод виникають затори та збільшується ймовірність травмування агентів. Це трапляється тому, що найкоротший шлях, яким прямують люди, часто проходить вздовж перешкод, що підвищує тертя між агентами та перешкодами;

- великі затори біля виходів з приміщення, що сповільнюють процес евакуації, призводять до травмування;
- при великій різниці фактичної та бажаної швидкостей збільшується сила взаємодії між агентами, через те збільшується ймовірність травмування;
- якщо порівняти процентне співвідношення травмованих людей, то найбільша частина травмованих серед тих груп, що мають найменшу масу та розмір тіла.

В той самий час модель має вагомі недоліки, серед них можна виділити наступні:

- не враховується можливість знерухомлення окремих індивідів через травму та неможливість самостійної евакуації;
- агенти завжди «знають», де вихід, що часто не відповідає дійсності, в реальності люди можуть блукати в незнайомому середовищі або піддаватись паніці;
- немає динамічної зміни геометрії середовища під час симуляції;
- шлях вибирається на початку та не змінюється в процесі симуляції.

**Висновки.** У статті був розглянутий та реалізований механічний підхід до моделювання динаміки натовпу. Були зроблені деякі його модифікації та доповнення, що розширили сферу його застосування. Також оглянуті ефекти, які він успішно відтворює, та ті, які не враховує. Відповідно до цього намічений план подальшої модифікації методу, що дозволить змоделювати більше різноманіття ситуацій.

Механічний підхід добре відтворює фізику руху людей, але ігнорує деякі аспекти поведінки людини у натовпі. Для відтворення складної поведінки людей можна зробити наступні модифікації:

- додати сценарії, які будуть змінювати параметри моделі або геометрію простору в визначені моменти часу, що дозволить відтворити складну послідовність реальних подій;
- додати об'єкти, що мають унікальні властивості, які впливають на людей (осередки вогню, вибухи, обвали, травмонебезпечні об'єкти);
- додати евристичну складову в алгоритм пошуку шляху для відтворення поведінки людини у стресовій ситуації або незнайомому середовищі.



### Бібліографічні посилання

1. Dirk Helbing, Illés Farkas, Tamás Vicsek «Simulating dynamical features of escape panic» // Nature Journal, 2000/09/28
2. Иванова А. Д. «Эвакуационное моделирование на основе клеточных автоматов» // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» 2017. Том 9, № 3.
3. Белкарян А. Л., Акопов А. С. «Моделирование поведения толпы на основе интеллектуальной динамики взаимодействующих агентов» // Бизнес-информатика 2015. № 1 (31). С. 69–77.
4. Аптуков А. М., Брацуна Д. А., Люшнин А. В. «Моделирование поведения паникующей толпы в многоуровневом разветвленном помещении» // КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ 2013 Т. 5, № 3 С. 491–508.
5. Р. В. Гребенников «Способы оценки эффективности различных моделей поведения толпы» // Вестник Воронежского Государственного Университета. 2010. №1.
6. Red Blob Games – Implementation of A\* [Электронный ресурс] // <http://redblobgames.com/pathfinding/a-star/implementation.html>

*Надійшла до редколегії 01.12.18*