

Золотухіна О.А. Державний університет телекомунікацій, Київ
Курилко О.Б. Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ
Тушич А.М., Коба А.Б., Яцков А.С. Державний університет телекомунікацій, Київ

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ПОКУПЦІВ В ТОРГОВИХ ПРИМІЩЕННЯХ В УМОВАХ СОЦІАЛЬНОГО ДИСТАНЦЮВАННЯ

Анотація: В роботі розглядається задача моделювання руху покупців в торгових приміщеннях в умовах соціального дистанціювання, що викликано вимогами щодо запобігання зараженню та подальшому розповсюдженню коронавірусної інфекції COVID-19. Розроблено дискретну модель приміщення, модель покупця, модель руху покупців за принципами функціонування двовимірного клітинного автомату без пам'яті. Модель приміщення дозволяє врахувати ключові об'єкти торгового приміщення типу супермаркет/гіпермаркет: стелажі, каси, вхід, вихід з приміщення. На відміну від класичних моделей представлення людини за допомогою клітинних автоматів, модель покупця забезпечує врахування соціальної дистанції за рахунок розширення околиці Мура до порядку 2. При цьому околиця Мура порядку 1 використовується для безпосередньо переміщення клітини автомату, що представляє покупця, а клітини околиці порядку 2 застосовуються для визначення дотримання обмежень соціального дистанціювання. Модель поведінки покупця враховує ситуації з реального життя: так само, як і люди, клітини автомату можуть «порушувати» правила соціального дистанціювання. Набір правил моделі покупця ґрунтується на загальній стратегії обходу об'єктів торгового приміщення та містить додаткові обмеження, які стосуються конфліктних ситуацій для випадку порушення соціальної дистанції, а також опис поведінки в умовах звичайного руху та руху при виникненні екстремальних ситуацій. Зазначені моделі реалізовано програмно, що дозволяє керувати налаштуваннями параметрів моделювання. Для візуального представлення результатів моделювання використовуються теплові карти, які демонструють зони забруднення та зони випадків порушення соціальної дистанції. Результати моделювання демонструють, що навіть при незначному збільшенні імовірності допущення порушення покупцями соціальної дистанції кількість випадків порушення дистанції зростає експоненціально.

Ключові слова: модель руху людини, дискретна модель торгового приміщення, покупець, клітинний автомат, соціальна дистанція.

Zolotukhina O.A. State University of Telecommunications, Kyiv
Kurylko O.B. Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv
Tushych A.M., Koba A.B., Yatskov A.S. State University of Telecommunications, Kyiv

MODELING THE MOVEMENT OF CUSTOMERS IN RETAIL SPACE UNDER CONDITIONS OF SOCIAL DISTANCING

Abstract: The paper considers the problem of modeling the movement of customers in retail space under conditions of social distancing, which is caused by the requirements to prevent infection and further spread of the coronavirus infection COVID-19. A discrete model of a retail space, a model of a customer, a model of customers' movement according to the principles of functioning of a two-dimensional cellular automaton without memory have been developed. The retail space model allows to take into account the key objects of a retail space such as a supermarket/hypermarket: racks, cash desks, entrance, exit from the premises. In contrast to the classical models of representing a person using cellular automata, the customers' model ensures that social distance is taken into account by expanding the Moore neighborhood to about 2. In this case, the Moore neighborhood of order 1 is used to directly move the cell of the automaton representing the customer, and the cells of the neighborhood of order 2 are used to determining compliance with social distancing restrictions. The model of the customer behavior takes into account real-life situations: just like people, the cells of an automaton can "violate" the rules of social distancing. The set of rules for the customer's model is based on the general strategy of bypassing the retail space and contains

additional restrictions regarding conflict situations for violating social distance, as well as a description of behavior in normal traffic and movement in the event of extreme situations. These models are implemented in software, which allows to control the settings of the simulation parameters. Heatmaps are used to visually represent the simulation results, showing the zones of pollution and zones of violation of social distance. The simulation results show that even with a slight increase in the probability of customers violating social distance, the number of distance violation cases grows exponentially.

Keywords: *human movement model, discrete model of retail space, customer, cellular automaton, social distance.*

Золотухина О.А. *Государственный университет телекоммуникаций, Киев*

Курилко А.Б. *Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев*

Тушич А.Н., Коба А.Б., Яцков А.С. *Государственный университет телекоммуникаций, Киев*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОКУПАТЕЛЕЙ В ТОРГОВЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ В УСЛОВИЯХ СОЦИАЛЬНОГО ДИСТАНЦИРОВАНИЯ

Аннотация: *В работе рассматривается задача моделирования движения покупателей в торговых помещениях в условиях социального дистанцирования, что вызвано требованиями по предотвращению заражения и дальнейшему распространению коронавирусной инфекции COVID-19. Разработана дискретная модель помещения, модель покупателя, модель движения покупателей по принципам функционирования двумерного клеточного автомата без памяти. Модель помещения позволяет учесть ключевые объекты торгового помещения типа супермаркет/гипермаркет: стеллажи, кассы, вход, выход из помещения. В отличие от классических моделей представления человека с помощью клеточных автоматов, модель покупателя обеспечивает учет социальной дистанции за счет расширения окрестности Мура до порядка 2. При этом окрестность Мура порядка 1 используется для непосредственно перемещения клетки автомата, представляющей покупателя, а клетки окрестности порядка 2 применяются для определения соблюдения ограничений социального дистанцирования. Модель поведения покупателя учитывает ситуации из реальной жизни: так же, как и люди, клетки автомата могут «нарушать» правила социального дистанцирования. Набор правил модели покупателя основывается на общей стратегии обхода объектов торгового помещения и содержит дополнительные ограничения, касающиеся конфликтных ситуаций для нарушения социальной дистанции, а также описание поведения в условиях обычного движения и движения при возникновении экстремальных ситуаций. Указанные модели реализованы программно, что позволяет управлять настройками параметров моделирования. Для визуального представления результатов моделирования используются тепловые карты, демонстрирующие зоны загрязнения и зоны нарушения социальной дистанции. Результаты моделирования показывают, что даже при незначительном увеличении вероятности допущения нарушения покупателями социальной дистанции количество случаев нарушения дистанции растет экспоненциально.*

Ключевые слова: *модель движения человека, дискретная модель помещения, покупатель, клеточный автомат, социальная дистанция.*

1. Вступ

В умовах пандемії коронавірусної інфекції COVID-19 змінюються шаблони поведінки людей, що обумовлено необхідністю дотримування соціальної дистанції, як засобу запобігання зараженню та подальшому розповсюдженню вірусу. Соціальне дистанціювання представляє собою комплекс санітарно-епідеміологічних заходів не медикаментозного характеру, спрямований на зупинку або уповільнення поширення заразної хвороби [1]. Оскільки уникнення відвідування торговельних точок повністю неможливе, тому актуальним стає питання забезпечення безпеки людей у приміщеннях торговельних залів магазинів та супермаркетів. Відповідно до розпорядження МОЗ України № 32 від 18.05.2020 «Про проведення громадського обговорення деяких вимог до протиепідемічних заходів при послабленні карантину», кожне підприємство повинно вживати заходи, спрямовані на зниження ймовірності контакту між інфікованими і неінфікованими людьми, зменшення рівня передачі інфекції, захворюваності та, врешті, смертності, зокрема «організувати роботу

таким чином, щоб зменшити контакт між особами, забезпечити необхідну відстань між фізичними особами із розрахунку їх робочих місць», «підтримувати належну гігієну виробничого середовища та необхідне використання вентиляції в приміщеннях» [2]. Зважаючи на те, що отримання статистичних показників за результатами натурного моделювання для визначення критичних зон взаємодії людей, зон максимального забруднення, зон потенційного порушення соціальної дистанції та інших показників пов'язане із значними ризиками для здоров'я людей, актуальним є вирішення зазначених задач засобами математичного та комп'ютерного моделювання.

2. Аналіз досліджень

Переміщення людей в деякому фізичному просторі традиційно моделюється із використанням чотирьох підходів: фізико-математичні моделі, теорія масового обслуговування, багатоагентні моделі, клітинні автомати. Використовуються також гібридні моделі, які комбінують окремі елементи зазначених підходів.

В основі фізико-математичних моделей лежать математичні та фізичні рівняння. Наприклад, одна з них будується на фізичній формулі руху, де умовні пішоходи мають такі характеристики, як поточне місце розташування і швидкість. Поняття сили використовується для пояснення рухів пішоходів. Застосовуються такі показники сили, як прискорення, ефекти відштовхування від межі і об'єктів, від інших пішоходів, ефекти тяжіння до інших груп та об'єктів. Д. Хелбінг [3] використав поняття тяжіння і відштовхування для моделювання мікроповедінки, розробив комплексні рівняння для різноманітних варіантів поведінки пішоходів. Ці розробки отримали загальну назву концепції «соціальних сил», у рамках якої при моделюванні враховується ряд внутрішніх передумов визначених дій (рухів) індивіда, а також їх наступний вплив на динамічні атрибути пішоходів (швидкість, прискорення, інтервали) [4]. Визначено, що потоки пішоходів мають властивість збиратися у натовпи, а потім знову розпадатися на окремі потоки. Фізико-математичні моделі пішохідних потоків реалізовані у таких програмних продуктах, як PTVVision®, Viswalk, Citilabs Cube Dynasim, Quadstone Paramics, SIMWALK. Суттєвим недоліком таких моделей є їх складність.

Багатоагентні моделі розглядають пішохода у якості абсолютно незалежного суб'єкта, який має здатність до пізнання. Наприклад, в роботі [5] робиться акцент на характер таких явищ у поведінці людей, як слідування один за одним по коридорах або коливання мас у місцях звужування коридорів («пляшкових шийок»), при виникненню труднощів і навіть блокування рухів у надзвичайних ситуаціях.

Третій варіант моделювання пішохідного руху опирається на теорії масового обслуговування. Тут прийнято припущення, що усі пішоходи знаходяться під контролем суб'єкта, який вказує їм час і напрямок руху. Такий прийом корисний для загальних моделей, оскільки дозволяє звести воедино усі необхідні дані. У подібних моделях для умовного представлення середовища беруться основні елементи теорії графів, де можливі коридори руху представлені у вигляді ребер, а точки прийняття рішення – у вигляді вершин. Варто відзначити, що методи теорії масового обслуговування, не знайшли широкого застосування у комерційних програмних продуктах для моделювання переміщення потоків людей.

Клітинні автомати використовуються, коли на умовному клітковому полі кожен пішохід займає одну клітину і переміщується відповідно до ряду простих правил у рамках цього поля. Так, в роботі [6] використано принцип клітинних автоматів для створення моделі пішохідних проходів з рухом у двох напрямках. Отримані авторами результати свідчать про те, що навіть малий набір правил здатен ефективно передати поведінку пішоходів на мікро рівні. В роботі [7] клітинні автомати використовуються для моделювання евакуації пішоходів з урахуванням поширення надзвичайної ситуації та паніки пішоходів. Суттєвою перевагою клітинних автоматів перед іншими моделями є простота реалізації моделей клітин як в сенсі визначення їх станів, так і з точки зору формування набору правил, що визначають поведінку автомату. При цьому, вирішення задачі моделювання на мікрорівні (поведінка

окремих людей) комбінується з можливістю отримання статистичних даних на макрорівні (загальні показники переміщення людей, показники окремих зон простору руху тощо).

3. Мета дослідження.

Метою даного дослідження є моделювання руху людей у замкненому просторі торгового приміщення на основі математичного апарату клітинних автоматів з урахуванням вимог соціального дистанціювання.

3. Основна частина

3.1 Розробка моделі приміщення

Моделювання є доцільним для торгівельних приміщень достатньо великого розміру з багатьма траєкторіями (супермаркети, гіпермаркети), оскільки для приміщень невеликої площі достатньо врахувати лише загальну кількість відвідувачів, що одночасно знаходяться всередині приміщення магазину. В якості модельного приміщення в роботі буде розглядатися умовний магазин, в якому обслуговування клієнтів (покупців) виконується через каси. За необхідності модель може бути змінена шляхом суміщення зон торгівельних прилавків та кас (обслуговування безпосередньо в зоні торгівельного прилавку). Стратегія переміщення покупця по магазину передбачає відвідування мінімального набору ключових зон: вхід до магазину, стелажі (прилавки), каса та вихід з магазину. Вхід та вихід у переважній більшості випадків відповідають одному й тому же самому об'єкту, тому припустимо можливість суміщення цих зон в одну. Таким чином, модель приміщення може бути представлена як дискретний простір, фрагментами якого є об'єкти: стелажі, каси, вхід/вихід, покупці та вільний простір. Об'єкти типу стелаж, каса, вхід/вихід не можуть змінювати свого місця розташування у просторі приміщення, об'єкт покупець переміщується по вільному простору поміж інших об'єктів. Об'єкти, що представляють обслуговуючий персонал в моделі розглядатися не будуть, оскільки їх кількість є занадто малою у порівнянні з кількістю покупців.

Математично, модель приміщення опишемо множиною клітин P , розміщених у вигляді решітки, де фрагменти решітки – клітини $p_{(i,j)}$:

$$p_{(i,j)} \in P. \quad (1)$$

Множина клітин P приміщення задається сукупністю множин 5-ти типів, які не перетинаються:

$$P = P_{io} \cup P_g \cup P_c \cup P_p \cup P_{empty}, \quad (2)$$

$$P_{io} \cap P_g \cap P_c \cap P_p \cap P_{empty} = \emptyset,$$

де P_{io} – множина клітин входу/виходу;

P_g – множина клітин стелажів;

P_c – множина клітин кас;

P_p – множина клітин покупців;

P_{empty} – множина інших клітин (вільний простір).

Множини P_{io} , P_g та P_c є константними та не змінюють свого вмісту (об'єкти стелажі, каси та вхід/виходи не пересуваються). У множин P_p та P_{empty} можуть змінюватися склад (покупець переміщується) та потужність (покупець з'явився у магазині, або покупець покинув магазин), однак об'єднання множин є константною множиною (покупець може пересуватися тільки вільним простором, не перетинаючись з іншими об'єктами).

Приклад графічного представлення моделі приміщення наведено на рис.1. Для спрощення використано прямокутну матрицю. Приміщення більш складної форми можуть бути визначені шляхом заміни клітин вільного простору клітинами стелажів, що заблоковані. Елементи множини P_g позначені чорним кольором (стелажі), елементи множини P_c – червоним (каси), елементи множини P_{io} – зеленим (вхід/виходи), елементи множини P_p – синім (покупці) та елементи множини P_{empty} – білим кольором.

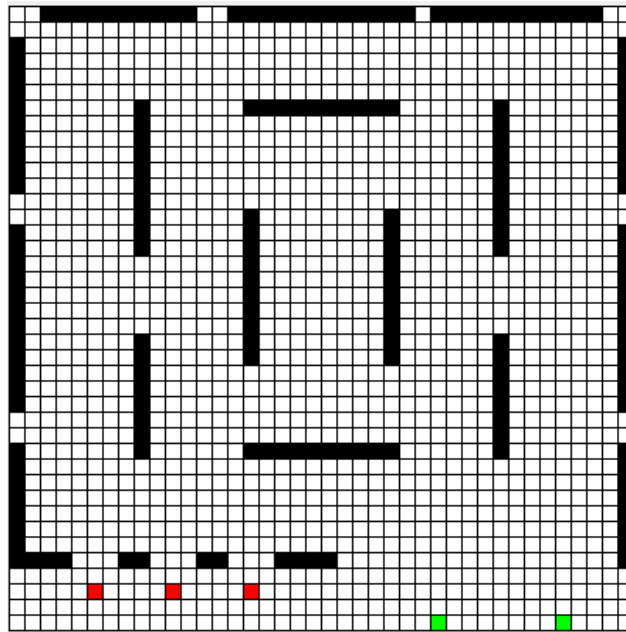


Рис.1. Приклад моделі приміщення

3.2 Розробка моделі покупця

Модель покупця представимо множиною властивостей та відповідної поведінки. До властивостей об'єкту віднесемо інформацію щодо поточного місцезнаходження (координати клітини на решітці) та цілі прямування (координати клітини на решітці). Поведінка покупця у загальному розумінні – це переміщення (зміна поточного місцезнаходження) між об'єктами стелажів, кас, вхід/виходів, досягаючи їх (що у реальному світі відповідає входу до магазину, обранню товару, розрахунку на касі та виходу з магазину), та іншими цілями покупців. Покупець переміщується постійно, прямуючи від одного до іншого нерухомого об'єкту у певній послідовності, найкоротшим шляхом та дотримуючись певних правил, що пов'язані в даній задачі із дотриманням умов соціального дистанціювання стосовно інших об'єктів-покупців.

При відсутності обмежень соціального дистанціювання будемо вважати, що покупець може переміщатися тільки у сусідні клітини решітки околиці Мура 1 від поточного розміщення покупця, а також, що покупець може бачити клітини околиці Мура 2. На рис.2 наведено околицю переміщення покупця (а) та околицю, яку він може бачити (б). Множина клітин решітки куди може бути переміщено (за визначеними умовами) покупця на рис.2 (а) виокремлено сірим, множина клітин решітки, які оглядаються на предмет наявності інших покупців виокремлено сірим на рис.2 (б).



Рис.2. Множина клітин решітки переміщення покупця (а) та множина клітин бачення інших покупців (б)

Алгоритм переміщення покупця. Покупець переміщується у вільну область приміщення (у клітину решітки околиці 1 покупця) у найкоротшому напрямку до поточної цілі прямування. Якщо у найкоротшому напрямку немає вільної області, або у певній близькості (клітини решітки околиці 2 покупця) є інший об'єкт-покупець, покупець переміщується у

будь-яку вільну область навколо нього. Після досягнення цілі покупець обирає наступну для відвідування ціль. Наступна ціль для відвідування обирається випадковим чином, але після відвідування цілі типу каса, наступною ціллю може бути обрано або стелаж, або вихід. Після досягнення цілі, яка є виходом, покупець завершує пересування.

На рис.3 наведено приклад розміщення об'єктів та доступних областей для переміщення об'єкта. Чорним кольором позначено ціль переміщення, синім об'єкти-покупці, центральний синій об'єкт – покупець, що розглядається, рожевим – області, заборонені для переміщення, через близькість інших об'єктів-покупців, білим – області доступні до переміщення, зеленим – наступне місце розташування покупця, як найкоротший шлях до цілі серед доступних.

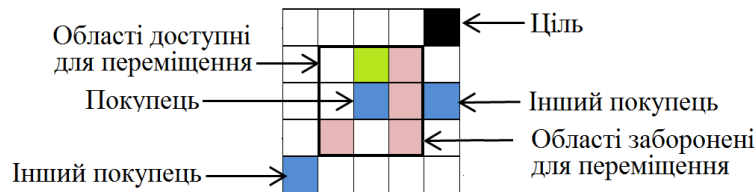


Рис.3. Приклад розміщення об'єктів та доступних областей для переміщення об'єкта покупця

У разі екстремальної ситуації покупець обирає у якості цілі об'єкт вихід та переміщується до нього за звичайним правилом переміщення, але за винятком виключення області, поблизу з іншим об'єктом-покупцем.

Математично, модель покупця C буде описуватися наступним чином:

$$C = \{p_{cur}, p_{purpose}, f\}, \tag{3}$$

- де p_{cur} – поточне місцезнаходження, $p_{cur} \in P_p$;
 $p_{purpose}$ – місцезнаходження цілі, $p_{purpose} \in P_{io} \cup P_g \cup P_c$;
 f – правила зміни місцезнаходження.

Опишемо математично правила зміни місцезнаходження:

- 1) правило переміщення у звичайному режимі:

$$p_{next}(i_{next}, j_{next}) \in \text{random}\{(k, l)\} \left\{ \begin{array}{l} |i_{cur} - k| + |j_{cur} - l| \leq 1; \\ (k, l) \neq (i_{next}, j_{next}); \\ (k, l) \in P_{empty}; \\ \text{distance}((k, l), (i_{purpose}, j_{purpose})) \rightarrow \min; \\ \left\{ \begin{array}{l} |k - m| + |l - n| \leq 1; \\ (m, n) \notin P_p. \end{array} \right. \end{array} \right. \tag{4}$$

- де: $p_{next}(i_{next}, j_{next})$ – наступне місцезнаходження об'єкту;
 $p_{purpose}(i_{purpose}, j_{purpose})$ – місцезнаходження цілі;
 2) правило переміщення у екстремальному режимі:

$$p_{nextEx}(i_{next}, j_{next}) \in \text{random}\{(k, l)\} \left\{ \begin{array}{l} |i_{cur} - k| + |j_{cur} - l| \leq 1; \\ (k, l) \neq (i_{next}, j_{next}); \\ (k, l) \in P_{empty}; \\ \text{distance}((k, l), (i_{purpose}, j_{purpose})) \rightarrow \min \end{array} \right. \tag{5}$$

3) правило обрання цілі:

$$\{(k, l) \mid \left\{ \begin{array}{l} p_{\text{purpose}_{\text{next}}}(i_{\text{purpose}_{\text{next}}}, j_{\text{purpose}_{\text{next}}}) \in \\ (k, l) \in P_{\text{io}} \cup P_{\text{g}} \cup P_{\text{c}}, \text{ якщо } p_{\text{purpose}}(i_{\text{purpose}}, j_{\text{purpose}}) \in P_{\text{g}}; \\ (k, l) \in P_{\text{io}} \cup P_{\text{g}}, \text{ якщо } p_{\text{purpose}}(i_{\text{purpose}}, j_{\text{purpose}}) \in P_{\text{c}}. \end{array} \right. \}; \quad (6)$$

4) правило закінчення переміщення:

$$p_{\text{next}}(i_{\text{next}}, j_{\text{next}}) \in P_{\text{io}}. \quad (7)$$

Функцію, що знаходить наступну точку місцезнаходження для об'єкта покупець (його переміщення) відповідно до висунутих правил у звичайному режимі назвемо функцією поведінки та позначимо, як $fp_{\text{next}}(ip_{\text{cur}}, jp_{\text{cur}})$. Виконання функції передбачає існування об'єкту, при створенні об'єкту визначаються його поточне місце розташування та ціль.

Наведемо формалізований опис алгоритму функції поведінки об'єкту «покупець».

1. Переглянути околицю $N_M^1(ip_{\text{cur}}, jp_{\text{cur}})$ точки поточного місцезнаходження об'єкта p_{cur} .

1.1 Якщо серед точок околиці $N_M^1(ip_{\text{cur}}, jp_{\text{cur}})$ є точка цілі p_{purpose} та поточною ціллю є точка виходу $p_{\text{purpose}} \in P_{\text{io}}$, то завершити роботу.

1.2 Якщо серед точок околиці $N_M^1(ip_{\text{cur}}, jp_{\text{cur}})$ є точка цілі p_{purpose} , то встановити нову ціль.

2. Серед точок околиці $N_M^1(ip_{\text{cur}}, jp_{\text{cur}})$ точки поточного місцезнаходження визначити перелік вільних точок L_{free} .

3. Якщо перелік вільних точок L_{free} не пустий, то перейти до шагу 4, інакше до шагу 6.

4. Серед переліку вільних точок L_{free} визначити точку p_{min} з мінімальною відстанню до точки цілі p_{purpose} .

5. Переглянути околиці точки p_{min} $N_M^1(ip_{\text{min}}, jp_{\text{min}})$.

5.1. Якщо в околиці точки є інший об'єкт-покупець, то видалити точку p_{min} з переліку вільних точок та перейти на шаг 3, інакше обрати знайдену точку наступною для переміщення $p_{\text{next}} = p_{\text{min}}$.

6. Наступною точкою для переміщення встановити поточну $p_{\text{next}} = p_{\text{cur}}$.

Також введемо функцію поведінки об'єкту у екстремальному режимі, яка буде знаходити наступну точку місцезнаходження для об'єкта покупець з урахуванням правила переміщення у екстремальному режимі. Позначмо функцію як $fp_{\text{nextEx}}(ip_{\text{cur}}, jp_{\text{cur}})$, та наведемо формалізований опис її алгоритму.

1. Обрати у якості точки цілі p_{purpose} будь яку точку виходу.

2. Переглянути околицю $N_M^1(ip_{\text{cur}}, jp_{\text{cur}})$ точки поточного місцезнаходження об'єкта p_{cur} .

1.1 Якщо серед точок околиці $N_M^1(ip_{\text{cur}}, jp_{\text{cur}})$ є точка цілі p_{purpose} та поточною ціллю є точка виходу $p_{\text{purpose}} \in P_{\text{io}}$, то завершити роботу.

2. Серед точок околиці $N_M^1(ip_{\text{cur}}, jp_{\text{cur}})$ точки поточного місцезнаходження визначити перелік вільних точок L_{free} .

3. Якщо перелік вільних точок L_{free} не пустий, то перейти до шагу 4, інакше до шагу 5.

4. Серед переліку вільних точок L_{free} визначити точку p_{min} з мінімальною відстанню до точки цілі p_{purpose} .

5. Встановити наступною точкою для переміщення p_{min} : $p_{\text{next}} = p_{\text{cur}}$.

3.3 Математична модель руху покупців у приміщенні

Модель руху покупців у приміщенні побудуємо за принципами функціонування двовимірного клітинного автомату без пам'яті. Визначимо складові клітинного автомату: метрику поля, стан клітинок, кількість сусідів, що мають вплив та правила роботи автомата.

Простір клітинного автомату задається у вигляді прямокутної решітки розміром $M \times N$. Решітка є однорідною, кожна клітина у певний момент часу може мати лише один активний стан, зміна стану клітин відбувається одночасно після обчислення нового стану кожної клітини решітки.

Клітиною решітки є кінцевий автоматів A з множиною станів $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}$, яка також є множиною початкових та кінцевих станів, та множиною можливих переходів: $\{s_1 \rightarrow s_1, s_2 \rightarrow s_2, s_3 \rightarrow s_3, s_4 \rightarrow s_5, s_5 \rightarrow s_4, s_4 \rightarrow s_4\}$.

Околиця клітинного автомату – безліч клітин, що становлять сусідство, визначається околицею Мура порядку 2:

$$N_M^1(i, j) = \{(k, l) \mid |i - k| \leq 2, |j - l| \leq 2\}. \quad (8)$$

Правила роботи клітинного автомату базуються на алгоритмі поведінки об'єкту покупця, тобто функції поведінки моделі покупця. Переходи між активними станами кінцевого автомату виконуються наступним чином:

$$\begin{aligned} s_1 &\rightarrow s_1: \forall; \\ s_2 &\rightarrow s_2: \forall; \\ s_3 &\rightarrow s_3: \forall; \\ s_4 &\rightarrow s_5: \exists (m, n): \begin{cases} (m, n) \in N_M^1(i, j) \\ fp_{next}(m, n) = (i, j) \end{cases}; \\ s_4 &\rightarrow s_4: \nexists (m, n): \begin{cases} (m, n) \in N_M^1(i, j) \\ fp_{next}(m, n) = (i, j) \end{cases}; \\ s_5 &\rightarrow s_4: \exists (m, n): \begin{cases} (m, n) \in N_M^1(i, j) \\ fp_{next}(i, j) = (m, n) \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

де $fp_{next}(i, j)$ – функція поведінки, що визначення наступне місцезнаходження об'єкту у моделі покупця, у екстремальному режимі замість функції $fp_{next}(i, j)$ будемо використовувати функцію $fp_{nextEx}(i, j)$.

3.4 Програмна модель реалізації клітинного автомата для моделювання руху покупців

Вхідні дані та обмеження.

1. Множина осередків решітки простору приміщення – цілочисельна прямокутна матриця розміром $M \times N$, де $M, N > 0$. Значення елементів матриці відповідають розміщенню об'єктів у приміщенні та можуть мати такі значення:

- 0 – вільний простір;
- 1 – стелаж;
- 2 – вхід/вихід;
- 3 – покупець;
- 4 – каса.

Обмеження: на початку моделювання відсутні елементи матриці зі значенням 3, моделювання починається з відсутності покупців у приміщенні.

Дані матриці зберігають у окремому текстовому файлі цілих чисел, у якому перші два числа є розмірами матриці, інші – позначками розміщення об'єктів у приміщенні.

2. Параметр моделі P_c – дійсне число, $P_c \in [0; 1]$, імовірність появи покупця на поточному кроці моделювання.

3. Параметр моделі P_i – дійсне число, $P_i \in [0; 1]$, імовірність, що покупець після відвідування каси обере наступною ціллю відвідування вихід (покине систему).

4. Параметр моделі P_d – не ціле число, $P_i \in [0;1]$, імовірність, що на поточному кроці покупець знехтує принципом соціального дистанціювання та обере для переміщення околицю іншого покупця.

5. Параметр моделі T – ціле число, $T > 0$, час моделювання (кількість кроків), де один крок – одна зміна стану приміщення (одна зміна стану клітинного автомату).

Вихідні дані та обмеження.

1. Поточний час моделювання T_c – ціле число, $T_c > 0$, кількість здійснених кроків (кількість виконаних змін стану клітинного автомату).

2. Загальна кількість покупців N_a – ціле число, $N_a > 0$, кількість покупців, що зайшла до магазину за поточний час моделювання (загальна кількість покупців, згенерованих моделлю).

3. Поточна кількість покупців N_c – ціле число, $N_c > 0$, кількість покупців, що знаходяться у магазині на поточний час (кількість покупців присутніх у системі).

4. Кількість випадків порушення дистанції N_d – ціле число, $N_d > 0$, кількість випадків, коли в околиці 1 одного покупця знаходився інший покупець.

5. Час евакуації T_{ex} – ціле число, $T_{ex} > 0$, час (кількість кроків моделювання) з початку екстреної ситуації до моменту, коли усі покупці покинули приміщення.

6. D_g – матриця забруднення, цілочисельна прямокутна матриця розміром $M \times N$, елементи матриці – кількість станів системи, корда у відповідній клітині простору знаходився покупець.

7. D_i – матриця порушення дистанції, цілочисельна прямокутна матриця розміром $M \times N$, елементи матриці – кількість станів системи, коли відповідна клітина простору, будучи у стані 3 (покупець) мала в околиці 1 клітину зі статусом 3 (два покупця знаходяться на сусідніх клітинах простору).

8. Вихідний файл формату .csv, містить результати моделювання: підсумкові статистичні дані, що було зібрано, покрокове логування даних на кожному кроці моделювання, підсумкові значення матриць забруднення та порушення дистанції.

Моделювання розпочинається у режимі звичайної поведінки людей. Проходить перевірка поточного режиму моделювання та, якщо поточний режим – звичайна поведінка, виконується генерація покупців, відповідно до імовірності їх появи. Якщо покупець генерується, об'єкт покупця додається до переліку покупців. Для кожного покупця з переліку виконується обчислення та знаходиться наступна клітина приміщення. Пошук клітини виконується відповідно до функції f_{nextEx} , що описує правило переміщення об'єкта покупця. Якщо наступною клітиною для покупця є клітина виходу – об'єкт покупця видаляється з переліку покупців (покупець покидає приміщення). По закінченню обробки покупців виконується «пересування», обчислюються матриці забруднення та порушення дистанції, виконується візуалізація кроку моделювання та виконується перехід до наступного кроку.

Закінчення заданого часу моделювання, умовно, є моментом виникнення екстремальної ситуації. По закінченні встановленого часу моделювання, система переходить у режим моделювання поведінки людей при евакуації з приміщення. Для кожного покупця наступними цілями встановлюються клітини виходу. Якщо перелік покупців у приміщенні не пустий, для кожного покупця з переліку виконується обчислення та знаходиться наступна клітина приміщення куди слід його перемістити. Пошук клітини виконується відповідно до функції, що описує правило переміщення об'єкта покупця при евакуації. По закінченню обробки покупців виконується «пересування», обчислюються матриці забруднення та порушення дистанції, виконується візуалізація кроку моделювання та виконується перехід до наступного кроку моделювання у режимі евакуації. Моделювання режиму евакуації закінчується, коли перелік покупців у приміщенні стає пустим – усі покупці покинули приміщення.

Інтерфейс програмного продукту (рис.4) представляє собою вікно, що складається з двох областей:

- область відображення решітки моделі приміщення;
- область налаштувань параметрів моделювання.

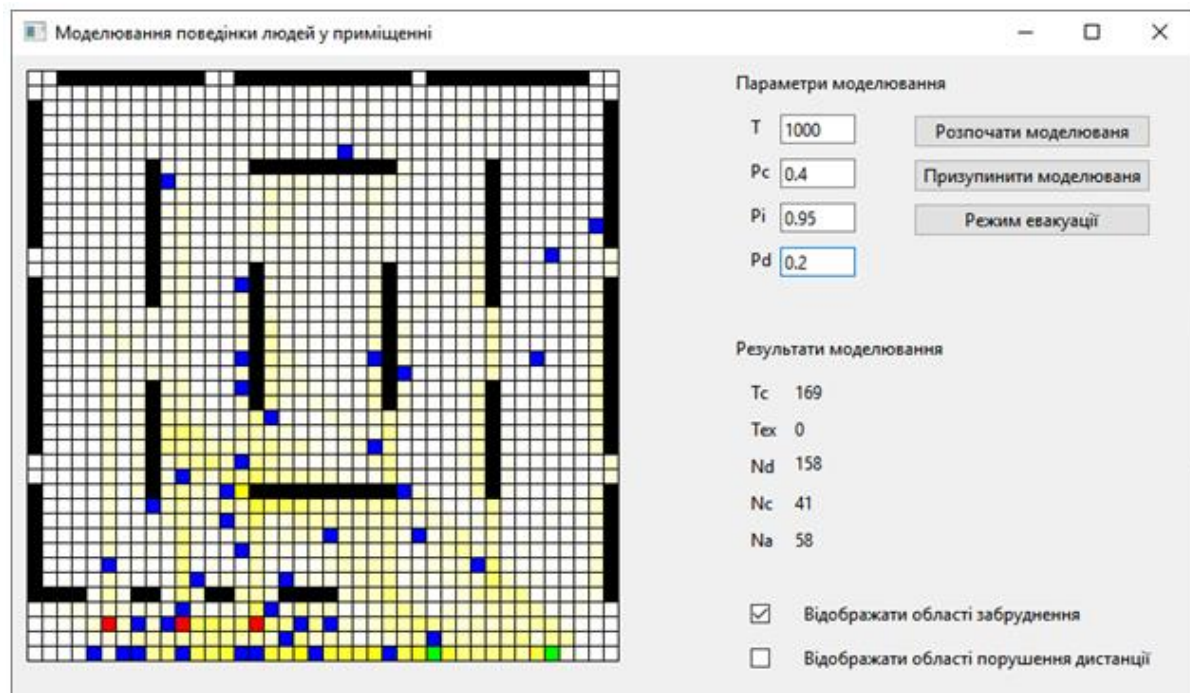


Рис.4. Вікно програми у процесі моделювання

Область відображення решітки надає уявлення про поточний стан матриці приміщення, відображаючи значення елементів матриці відповідними кольорами. Додатково область може відображати стан матриці забруднення або матриці порушення дистанції, нормалізованим значенням кольору у відповідних клітках.

Область налаштувань містить елементи керування для введення параметрів моделювання та відображення його результатів, а також кнопки для запуску, призупинення процесу моделювання та кнопку перемикачів процесу моделювання з моделювання звичайної поведінки на моделювання поведінки людей у екстремальній ситуації.

4. Проведення моделювання

Для отримання даних для аналізу було проведено ряд експериментів по моделюванню руху покупців у приміщенні за допомогою побудованої моделі та розробленого програмного забезпечення. Для моделювання використовувалась схема розміщення об'єктів у приміщенні, представлена на рис. 1.

На рис.5 наведено графіки, які демонструють результати моделювання випадків порушення дистанції. Параметри моделювання наведено у заголовках графіків. Значення отримані як середні за 20 моделювань. На рис.6 наведено графіки залежності кількості випадків порушення дистанції усіма покупцями, що відвідали приміщення, за різною імовірністю виникнення порушення – лояльністю покупців до порушення дистанції.

Аналізуючи отримані в результаті моделювання показники, можна зробити висновок, що статистичні дані носять експоненціальний характер. Так, збільшення імовірності допущення порушення покупцями дистанції на 0.1 підвищило кількість випадків порушення дистанції на 25% при кількості кроків моделювання $T = 500$, а при $T = 1000$ недотримання умов соціального дистанціювання збільшилось до 54%.

Крім того, збільшення кількості людей у приміщенні, навіть при спробі дотримуватися дистанції, тягне за собою значне збільшення випадків порушення дистанції (рис.7, а). Також матриця забруднення наочно демонструє, невідлі випадки розташування стелажів, кас та виходів, які значно підвищують забрудненість певних зон (рис.7, б).

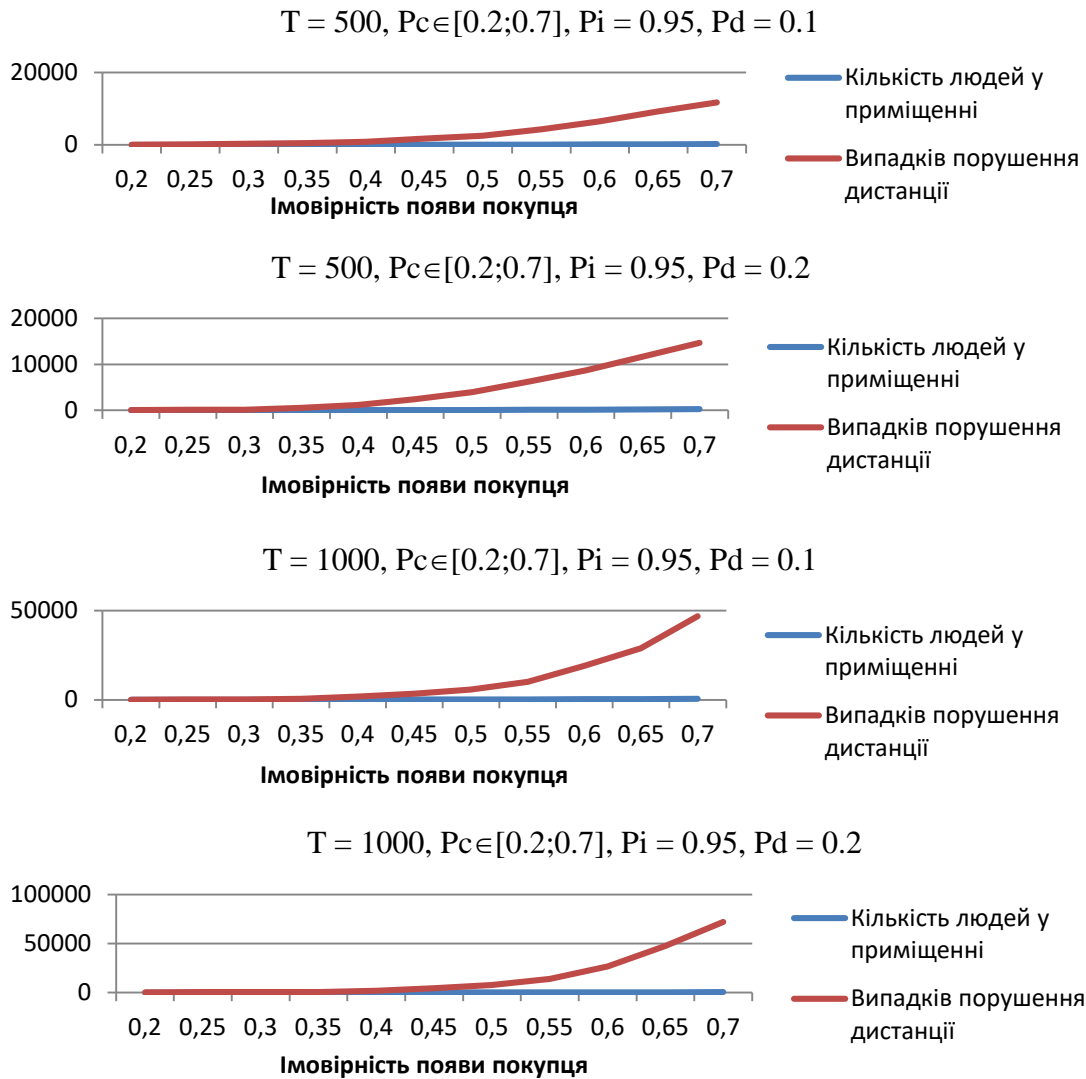


Рис.5. Результати моделювання випадків порушення дистанції

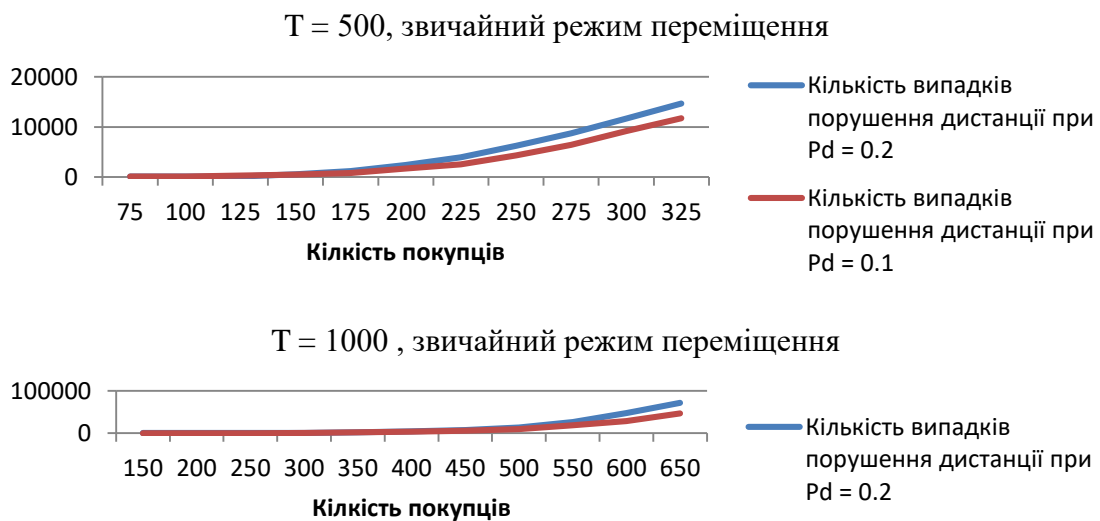


Рис.6. Кількість випадків порушення дистанції за різної ймовірності виникнення ситуації порушення дистанції

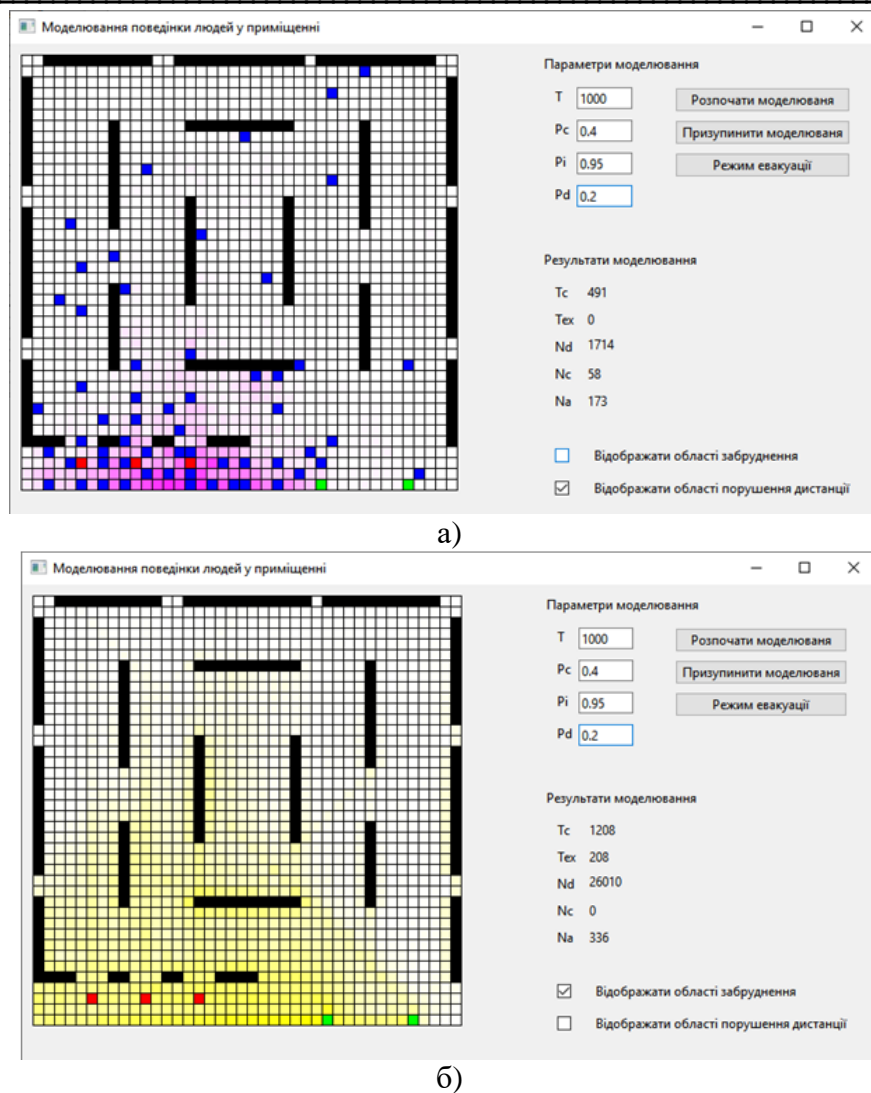


Рис.7. Результати моделювання: а) з відображенням областей порушення дистанціювання; б) матриця забруднення та статистика після закінчення моделювання

Для наочності візуального представлення результатів моделювання безпосередньо у вікні програми матриця забруднення та матриця порушень дистанції мають вигляд теплових карт – інтенсивність кольору демонструє ступінь вираженості відповідного показника. Такий спосіб представлення інформації дозволяє використання результатів моделювання навіть на рівні кінцевих споживачів (керівного персоналу торговельних підприємств, відповідальних за техніку безпеки тощо).

Висновки

В роботі проведено моделювання руху людей у замкненому просторі торгового приміщення на основі математичного апарату клітинних автоматів з урахуванням вимог соціального дистанціювання. Модель приміщення враховує типові об'єкти торгового приміщення як то стелажі (прилавки), каси, вхід, вихід. Модель покупця враховує обмеження соціального дистанціювання за рахунок розширення околиці Мура на 1 клітину, що визначає мінімальну зону дистанції. При побудові моделі поведінки покупця враховано набір його стратегічних цілей та особливості переміщення дискретним простором приміщення з урахуванням обмежень соціального дистанціювання. Слід зазначити, що модель поведінки покупця враховує ситуації з реального життя: так само, як і люди, клітини автомату можуть «порушувати» правила соціального дистанціювання. Програмне забезпечення, розроблене для моделювання, дозволяє отримати окрім статистичних показників, теплові карти, що демонструють зони забруднення та зони порушення соціальної дистанції. Аналіз результатів

моделювання показує експоненціальний характер залежності ймовірності недотримання покупцями соціальної дистанції та випадків перетину траєкторій покупців. Перспективи подальших досліджень можуть полягати у розширенні моделі приміщення за рахунок деталізації стелажів (прилавків) за видами – це дозволить сформувати цільові об'єкти (атрактори) з різними характеристиками, що визначають ступінь зацікавленості ними у покупців під час їх руху приміщенням. Розширення моделі приміщення, в свою чергу, призведе до розширення списку правил руху покупця, які враховують рух в напрямку атракторів. Крім того, модель покупця також може бути уточнена за рахунок визначення різних стратегій руху для різних груп покупців – кожній категорії покупців може відповідати свій набір стелажів-атракторів.

Список використаної літератури

1. Посібник роботодавця з управління робочими місцями під час COVID-19 [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---lab_admin/documents/publication/wcms_745603.pdf
2. Про проведення громадського обговорення деяких вимог до протиепідемічних заходів при послабленні карантину. Розпорядження МОЗ України № 32 від 18.05.2020 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0032488-20#Text>
3. Helbing, Dirk, and Peter Molnar. "Social force model for pedestrian dynamics." *Physical review E* 51.5 (1995): 4282.
4. Apel, Marko. "Simulation of pedestrian flows based on the social force model using the verlet link cell algorithm." *Poznan University of Technology* 79 (2004).
5. Helbing, Dirk, et al. "Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations." *Pedestrian and evacuation dynamics* 21.2 (2002): 21-58
6. Zheng, Linjiang, et al. "Simulation of pedestrian evacuation considering emergency spread and pedestrian panic." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 522 (2019): 167-181.
7. Blue, Victor J., and Jeffrey L. Adler. "Cellular automata microsimulation of bidirectional pedestrian flows." *Transportation Research Record* 1678.1 (1999): 135-141.

References

1. Employer's Guide to Workplace Management during COVID-19. URL: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---lab_admin/documents/publication/wcms_745603.pdf
2. About carrying out public discussion of some requirements to anti-epidemic measures at weakening of quarantine. Order of the Ministry of Health of Ukraine № 32 from 18.05.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0032488-20#Text>
3. Helbing, Dirk, and Peter Molnar. "Social force model for pedestrian dynamics." *Physical review E* 51.5 (1995): 4282.
4. Apel, Marko. "Simulation of pedestrian flows based on the social force model using the verlet link cell algorithm." *Poznan University of Technology* 79 (2004).
5. Helbing, Dirk, et al. "Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations." *Pedestrian and evacuation dynamics* 21.2 (2002): 21-58
6. Zheng, Linjiang, et al. "Simulation of pedestrian evacuation considering emergency spread and pedestrian panic." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 522 (2019): 167-181.
7. Blue, Victor J., and Jeffrey L. Adler. "Cellular automata microsimulation of bidirectional pedestrian flows." *Transportation Research Record* 1678.1 (1999): 135-141.