



УДК 004.89

МРНТИ 28.17.33

[https://doi.org/10.53364/24138614\\_2025\\_39\\_4\\_10](https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_10)

Р.М. Садвакасов<sup>1\*</sup>, К.Ж. Садвакасова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева,  
Астана, Казахстан

\*E-mail: [sadvakasov\\_ramazan@mail.ru](mailto:sadvakasov_ramazan@mail.ru)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВАКУАЦИИ В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ VR-ТЕХНОЛОГИЙ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ, МИКРОСКОПИЧЕСКИХ И ГИБРИДНЫХ ПОДХОДОВ

**Аннотация.** В статье рассматривается моделирование эвакуации людей из зданий при пожаре с использованием макроскопической, микроскопической и гибридной моделей. Цель работы — разработка подходов для минимизации времени эвакуации и повышения безопасности людей через анализ динамики движения толпы. Исследуются глобальные характеристики потока (макроскопическая модель), индивидуальное поведение агентов (микроскопическая модель) и комбинированный подход (гибридная модель). Используются технологии, такие как Unreal Engine (UE), для создания интерактивных симуляций. Научная значимость работы — сравнительный анализ моделей для прогнозирования времени эвакуации. Практическая ценность заключается в оптимизации архитектурных решений, разработке эвакуационных планов и создании VR-симуляций для обучения. Результаты показывают, что макроскопическая модель даёт быструю оценку, микроскопическая учитывает поведение людей, а гибридная модель наиболее точно отражает динамику эвакуации.

**Ключевые слова:** Эвакуация людей, пожар, макроскопическая модель, микроскопическая модель, гибридная модель, имитационное моделирование, виртуальная реальность, критическая ситуация.

### Введение.

Актуальность исследования обусловлена ростом числа критических ситуаций, таких как пожары, природные катастрофы и техногенные аварии, которые представляют серьёзную угрозу для жизни и здоровья людей, а также для инфраструктуры. В условиях чрезвычайных происшествий ключевым фактором успешного исхода является быстрое принятие решений на основе точного прогнозирования поведения людей и динамики их эвакуации. Современные технологии моделирования, включая виртуальную реальность (VR), предоставляют новые возможности для анализа и отработки действий в экстремальных условиях.

Технологии виртуальной реальности становятся эффективным инструментом для изучения поведения людей и оптимизации эвакуационных маршрутов. Современные исследования подтверждают, что VR-методы позволяют исследовать выбор выходов при эвакуации, оценивать влияние различных факторов (например, знаков выхода и поведения окружающих) и моделировать массовые эвакуации в условиях пожара [1–3]. Данные VR также применяются для калибровки агентных моделей, что повышает

точность прогнозирования реального поведения людей [4]. Исследования показывают, что виртуальные среды позволяют безопасно моделировать поведение людей в условиях стресса и тревожности, учитывая психофизиологические аспекты [5–8]. Особое внимание уделяется использованию современных технологий, таких как UE, для создания реалистичных симуляций, которые позволяют отрабатывать стратегии действий в виртуальной среде.

Целью данной работы является разработка имитационной 3D-модели поведения агентов, которая позволит анализировать их действия в критических ситуациях и прогнозировать эвакуационные маршруты. Для достижения этой цели были определены следующие задачи:

1. Построение математической модели движения агентов.
2. Реализация алгоритмов эвакуации в виртуальной среде.
3. Интеграция результатов в игровые движки (например, UE) для визуализации и анализа [9].

Полученные результаты могут быть использованы для обучения персонала, тестирования планов эвакуации и совершенствования проектирования зданий с точки зрения безопасности.

Объектом исследования являются методы моделирования поведения человека в критических ситуациях, с акцентом на пожары. Предметом исследования выступают математические модели — макроскопическая, микроскопическая и гибридная, — применяемые для описания динамики движения толпы и процессов эвакуации.

Гипотеза исследования заключается в том, что комбинированный (гибридный) подход, объединяющий преимущества макроскопической и микроскопической моделей, позволяет достичь наиболее точного прогнозирования времени эвакуации и учитывать как глобальные характеристики потока, так и индивидуальное поведение агентов.

Теоретическая значимость исследования состоит в проведении сравнительного анализа существующих методов моделирования поведения людей в критических ситуациях, выявлении их ограничений и преимуществ, а также в разработке рекомендаций по применению гибридных моделей для повышения точности прогнозов. Практическая ценность работы определяется в возможности использования полученных данных для:

- оптимизации архитектурных решений (например, проектирования эвакуационных путей и выходов);
- разработки эффективных планов эвакуации;
- создания интерактивных VR-симуляций для обучения специалистов.

Таким образом, данное исследование направлено на решение актуальной задачи повышения безопасности людей в критических ситуациях за счёт развития теоретических и практических подходов к моделированию их поведения.

#### **Материалы и методы исследования.**

В рамках исследования были изучены различные подходы и средства для моделирования поведения человека, а именно: клеточные автоматы, непрерывные методы (на основе аналогии с динамикой жидкости), броуновское движение, ньютоновскую механику, мультиагентные и графоаналитические методы, а также их комбинации в рамках гибридных моделей (см. таблица 1) [10].

Таблица 1 - Методы моделирования поведения человека

п/п	Методы	Содержание	Плюсы	Минусы
1	Клеточных автоматов	Метод клеточных автоматов впервые рассмотрел фон Нейман. Это дискретная	Несложное описание	Поведение людей ограничено во

		модель, где время и пространство дискретны, а состояние клетки зависит от её соседей	правил и прост в реализации.	времени и пространстве
2	Непрерывные методы (физических процессов динамики жидкости)	Расстояние между людьми меньше окружающего пространства. В уравнении движения человека учитываются три гипотезы: 1. Скорость агента зависит от плотности окружающих, их поведения и внешней среды. 2. Агенты имеют цель. 3. Агенты минимизируют время в пути, учитывая первые две гипотезы. Численное решение показало аналогию с динамикой жидкости: каждый элемент толпы — частица жидкости	Можно рассматривать как динамическую систему	Гипотеза 1 не подходит при высокой плотности людей. Результат гипотезы 2 зависит от информированности агентов, а гипотезы 3 — от причины движения и мотивации
3	Броуновское движение	Модель движения агента, основана на уравнении Фоккера - Планка		Применима не для всех ситуации
4	Ньютоновская механика	Движение агента описывается на основе второго закона Ньютона		Не применимо к гетерогенной толпе, где агенты имеют различные цели и характеристики
5	Мультиагентные методы	В моделировании создаётся набор правил, которым подчиняется каждый агент, без описания всей динамической системы	Простой способ задания правил поведения для участников	Наличие большого количества параметров, влияющих на поведение людей
6	Графоаналитический метод	Метод основан на изучении поведение толпы в реальных условиях	Модель описывает статистические параметры толпы: среднюю скорость, плотность и время достижения цели	Высокая сложность расчета

7	Гибридные методы	Использует комбинацию нескольких подходов, включая идею скалярных полей	Для создания моделей поведения можно объединить преимущества других моделей в одной теории	Трудно объединить несколько подходов в одной модели из-за разных методик описания взаимодействия в толпе
8	Модель ADPLV	Идея имитационного моделирования заключается в слабой зависимости скорости движения от плотности окружающих	Результаты моделирования совпадают с наблюдениями	Невозможно применить к гетерогенной толпе с различными целями и характеристиками агентов
<i>Примечание - Источник: [10]</i>				

Каждый метод можно отнести к одному из трёх уровней моделирования: макроскопическому, микроскопическому или гибридному, что помогает систематизировать подходы и выделить их особенности при анализе сложных процессов, таких как эвакуация. Из-за высокой опасности и сложности проведения реальных экспериментов по эвакуации акцент смещается на имитационное моделирование, которое учитывает взаимодействие и поведение людей в критических ситуациях. Применение UE позволяет создавать реалистичные симуляции для обучения в безопасной среде, что улучшает прогнозирование поведения толпы, проектирование эвакуационных планов и обучение персонала.

#### 1. Макроскопическая модель

Макроскопическая модель движения толпы основана на аналогии с уравнениями Навье–Стокса для потоков людей в ограниченных пространствах, таких как коридоры и эвакуационные выходы. Толпа рассматривается как континуальная среда, характеризующая плотностью и скоростью, что позволяет анализировать массовый поток и среднее время эвакуации. Однако модель упрощает динамику, игнорируя такие факторы, как вязкость и давление, а также индивидуальное поведение людей.

Основное уравнение потока:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

где:

$\rho$  — плотность толпы, выраженная в людях на квадратный метр

$v$  — вектор скорости движения толпы

Для анализа эвакуации использовались следующие исходные данные:

Площадь помещения:  $S = 100 \text{ м}^2$

Ширина эвакуационного выхода:  $W = 2 \text{ м}$ ,

Плотность людей:  $\rho = 2 \text{ чел/м}^2$

При плотности  $\rho = 2 \text{ чел/м}^2$  и скорости движения агентов: от  $v_{\min} = 1 \text{ м/с}$  до  $v_{\max} = 1.5 \text{ м/с}$ ,  $v_{\text{ср}} = 1.25 \text{ м/с}$  через выход шириной  $W = 2 \text{ м}$  можно рассчитать массовый поток людей.

Массовый поток  $Q$  через эвакуационный выход рассчитывается по формуле:

$$Q = \rho \cdot W \cdot v_{\text{cp}} \quad (2)$$

Время, необходимое для эвакуации  $n=50$  человек, вычисляется по формуле:

$$t_{\text{эвак}} = \frac{n}{\rho \cdot W \cdot v_{\text{cp}}} \quad (3)$$

Сначала рассчитаем массовый поток:

$$Q = \rho \cdot W \cdot v_{\text{cp}} = 2 \text{ чел/м}^2 \cdot 2\text{ м} \cdot 1.25 \text{ м/с} = 5 \text{ чел/с} \quad (4)$$

Теперь подставим в формулу для времени эвакуации:

$$t_{\text{эвак}} = \frac{n}{Q} \quad (5)$$

$$t_{\text{эвак}} = \frac{50}{5} \approx 10 \text{ с}$$

Время эвакуации 50 человек составляет 10 секунд. Модель анализирует параметры массовой эвакуации, такие как скорость через узкие проходы, влияние препятствий на плотность потока и формирование «узких мест». Однако она основана на упрощенной макроскопической аналогии и не учитывает индивидуальные поведенческие реакции людей, такие как паника, изменение направления и взаимодействия между людьми. Эти ограничения снижают точность модели в условиях высокой плотности и сложных ситуаций (например, задымление или ограниченная видимость).

## 2. Микроскопическая модель

Микроскопическая модель описывает поведение агентов, учитывая скорость движения, реакцию на окружающих и препятствия. Каждый агент моделируется системой уравнений, определяющих его движение по координатам  $x$  и  $y$ .

Основные уравнения движения агента:

$$\frac{dx_i}{dt} = v_i \cdot \cos(\theta_i) \quad (6)$$

$$\frac{dy_i}{dt} = v_i \cdot \sin(\theta_i)$$

где:

$v_i$  — скорость движения агента,

$\theta_i$  — угол направления движения,

$x_i$   $y_i$  — координаты агента.

Для моделирования поведения агентов в критической ситуации были приняты следующие параметры:

Количество агентов  $n=50$ ,

Скорость движения агентов  $v_i = 1.5$  м/с для одних и  $v_i = 1.0$  м/с для других.

Рассмотрим помещение площадью  $100 \text{ м}^2$  с 50 агентами. При этом скорость движения агентов  $v_i = 1.5$  м/с для одних и  $v_i = 1.0$  м/с для других.

Для расчета времени эвакуации с использованием микроскопической модели, можно использовать среднюю скорость движения агентов. В данном случае у нас есть два типа агентов с различной скоростью:

Рассчитаем среднюю скорость  $v_i$ :

$$v_{\text{cp}} = \frac{n_1 v_1 + n_2 v_2}{n_1 + n_2} \quad (7)$$

где:  $n_1 = n_2 = 25$  – количество агентов каждой группы.

Подставим значения:

$$v_{\text{ср}} = \frac{25 \cdot 1.5 + 25 \cdot 1.0}{25 + 25} = 1.25 \text{ м/с}$$

Теперь учтем взаимодействия агентов: из-за плотности и столкновений средняя скорость снижается на 10%. Новая средняя скорость  $v_{\text{ср, взаимодействия}}$  вычисляется как:

$$v_{\text{ср, взаимодействия}} = 1.25 \cdot 0.9 = 1.125 \text{ м/с.} \quad (8)$$

Теперь рассчитаем время эвакуации, предполагая, что агенты выходят через один выход. Для этого нам нужно определить расстояние до выхода.

Если предположить, что выход находится на расстоянии  $d = 12.5$  метров от центра помещения, то время эвакуации  $t_{\text{эвак}}$  можно вычислить как:

$$t_{\text{эвак}} = \frac{d}{v_{\text{ср, взаимодействия}}} \quad (9)$$

Чтобы продолжить, необходимо определить расстояние  $d$ . Если, например,  $d = 12.5$  м, тогда подставляем значения:

$$t_{\text{эвак}} = \frac{12.5}{1.125 \text{ м/с}} = 11.11 \text{ с}$$

Если известное расстояние до выхода другое, просто замените значение  $d$  в формуле.

В результате моделирования видно, что более быстрые агенты оказывают влияние на поведение медленных, что может вызвать замедление общего процесса эвакуации. Это демонстрирует важность учета взаимодействий между агентами при моделировании эвакуации.

### 3. Гибридная модель

Гибридная модель сочетает макроскопическое моделирование потоков людей с микроскопическим моделированием агентов. Она учитывает параметры потока, такие как плотность, и индивидуальные характеристики агентов, например, скорость и направление, что позволяет точнее предсказывать поведение людей в ограниченных пространствах с препятствиями. Моделировалось прямоугольное помещение площадью  $100 \text{ м}^2$  с эвакуационным выходом шириной 2 м. Использовались следующие параметры:

Количество агентов:  $n=50$ ,

Скорость движения агентов: от  $v_{\text{min}} = 1 \text{ м/с}$  до  $v_{\text{max}} = 1.5 \text{ м/с}$ ,

Плотность людей в начальный момент времени:  $2 \text{ чел/ м}^2$

Для простоты предположим, что половина агентов движется со скоростью  $1 \text{ м/с}$ , а другая половина — со скоростью  $1.5 \text{ м/с}$ :

Расчет средней скорости агентов:

$$v_{\text{ср}} = \frac{n_1 v_1 + n_2 v_2}{n_1 + n_2} \quad (10)$$

где  $n_1 = n_2 = 25$  (по 25 агентов с каждой скоростью)

$$v_{\text{ср}} = 1.25 \text{ м/с}$$

Теперь учтем взаимодействие между агентами. Из-за плотности и столкновения средняя скорость снижается на 20%. Новая средняя скорость  $v_{\text{ср, взаимодействия}}$  будет:

$$v_{\text{ср, взаимодействия}} = 1.25 \cdot 0.8 = 1.0 \text{ м/с} \quad (11)$$

Определение плотности потока по формуле:

$$Q = \rho \cdot v_{\text{ср, взаимодействия}} \cdot W \quad (12)$$

Подставим значения:

$$Q = 2 \text{ чел/м}^2 \cdot 1.0 \text{ м/с} \cdot 2\text{м} = 4 \text{ чел/с}$$

Время, необходимое для эвакуации всех агентов, можно рассчитать по формуле:

$$t_{\text{эвак}} = \frac{n}{Q} \quad (13)$$

Подставляем значения:

$$t_{\text{эвак}} = \frac{50}{4} = 12.5 \text{ с}$$

Таким образом, время эвакуации для 50 агентов составляет примерно 12.5 секунд, учитывая условия модели.

#### *Имитационное моделирование в виртуальной среде*

Первым шагом разработки симуляции критической ситуации является выбор сценария для обучения. В нашем случае это пожар на площади  $S=100 \text{ м}^2$ . В VR-окружении моделируются различные сценарии, включая распространение огня, задымление и изменения условий эвакуации. UE интегрирует 3D-среду и VR, программируя агентов с помощью Blueprints и C++. Blueprints упрощает разработку и быстрые изменения сценария. UE предоставляет возможность создавать детализированные и интерактивные симуляции критических ситуаций, в которых агенты взаимодействуют с виртуальной средой и друг с другом. Алгоритмы, основанные на математических формулах, лежат в основе создания сцены с агентами и препятствиями. Каждый шаг реализации требует использования инструментов UE, таких как Blueprints или C++.

Рисунки 1 и 2 показывают фрагменты Blueprint-кода, реализующего падение агента при контакте с огнём: Рисунок 1 — скрипт, отвечающий за падение, Рисунок 2 — симуляция процесса.

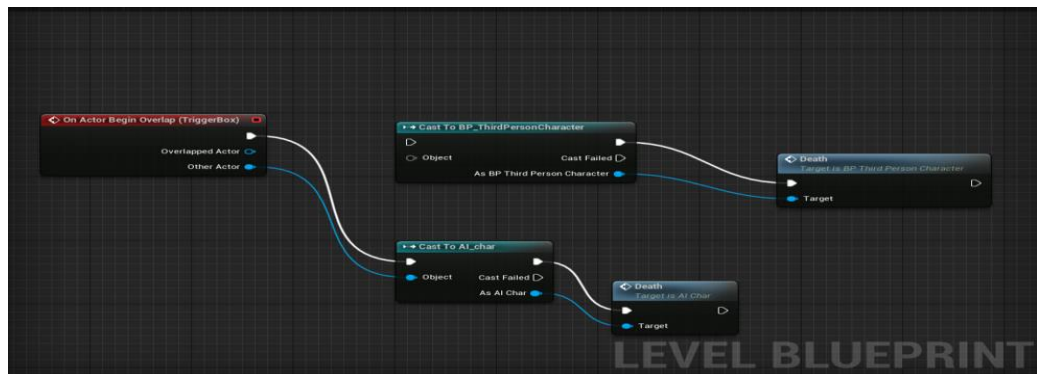


Рисунок 1 – Фрагмент Blueprint скрипта – передачи данных AI агенту

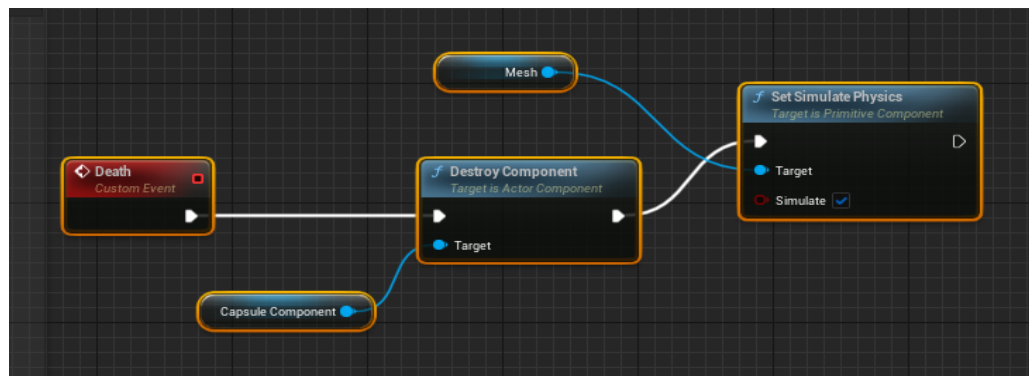


Рисунок 2 – Фрагмент Blueprint скрипта, симуляции падения при столкновении с огнём

На рисунке 3 и 4 представлены симуляция взаимодействия агентов (людей) в помещении при пожаре в VR-среде. Продемонстрированы примеры работы AI-агентов в UE, использующих Nav Mesh, Target Point, систему EQS и Crowd Controller AI для определения оптимального маршрута эвакуации.

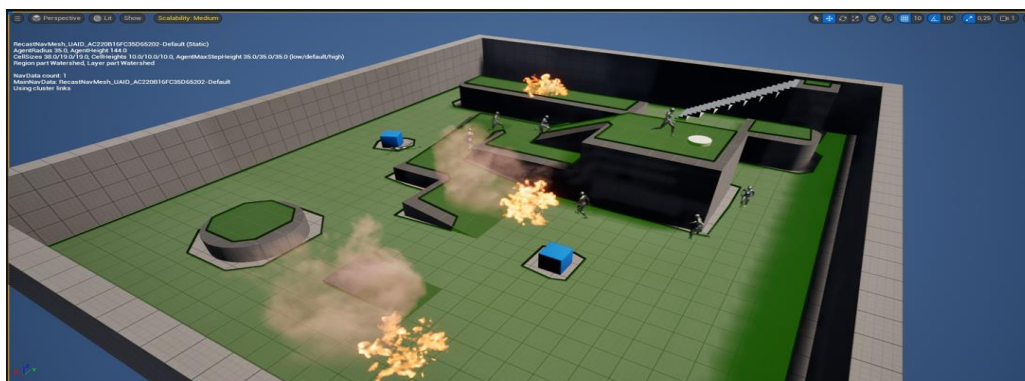


Рисунок 3 – Симуляция эвакуации агентов в VR-среде при пожаре с использованием AI-агентов в UE для поиска оптимального маршрута с Nav Mesh, Target Points, EQS и Crowd Controller AI



Рисунок 4 – Поведение AI-агентов при пожаре: визуализация их реакции на распространение огня в VR-среде и принятие решений для поиска безопасного маршрута

### Результаты и их обсуждения.

В ходе исследования были реализованы три математические модели эвакуации — макроскопическая, микроскопическая и гибридная — с использованием игрового движка UE. Программная реализация была выполнена на языке C++ с применением Blueprints для визуализации. Агенты ориентируются в пространстве, минимизируя расстояние до выхода, избегая препятствий и адаптируясь к изменяющимся условиям, таким как задымленность и паника.

Использование VR-технологий позволило смоделировать поведение агентов и проанализировать реакцию пользователей в стрессовых ситуациях, что способствовало уточнению математических моделей. Внедрение алгоритмов избегания препятствий и адаптивных маршрутов повысило точность предсказания движения агентов. Интеграция модели в UE подтвердила эффективность применения VR-моделирования для изучения поведения людей в критических ситуациях.

Сравнение трёх моделей показало следующие различия (см. таблица 2):

Таблица 2 - Сравнительный анализ моделей

Модель	Время эвакуации	Ключевые характеристики
Макроскопическая	10 с	Учитывает глобальные параметры потока (плотность, скорость), не учитывает индивидуальное поведение агентов
Микроскопическая	11.11	Фокусируется на индивидуальном поведении агентов, их взаимодействии, показывает замедления при высокой плотности.
Гибридная	12.5 с	Комбинирует макроскопические и микроскопические параметры, наиболее точна для сложных сценариев

1. Макроскопическая модель, основанная на аналогии с уравнениями Навье–Стокса, показала минимальное время эвакуации (10 с), но игнорирует индивидуальные реакции агентов, что может недооценивать время эвакуации в реальных условиях.

2. Микроскопическая модель продемонстрировала более высокое время эвакуации (11.11 с), что связано с учётом индивидуального поведения агентов, замедляющего движение при высокой плотности.

3. Гибридная модель показала время эвакуации 12.5 с. Хотя это значение больше, чем у макроскопической модели, гибридный подход обеспечивает наиболее точную симуляцию, сочетая глобальные параметры потока с индивидуальным поведением агентов.

Результаты исследования подтверждают гипотезу о том, что гибридная модель наиболее точно моделирует процесс эвакуации, учитывая как взаимодействие агентов, так и возможные задержки из-за переполненности и изменения траекторий. Эти факторы важны для более реалистичного прогнозирования динамики эвакуации.

Макроскопическая модель, несмотря на быстрое время эвакуации, имеет ограниченную применимость в условиях высокой плотности и сложной геометрии пространства. Микроскопическая модель, с другой стороны, требует значительных вычислительных ресурсов, но предоставляет более детализированное описание поведения агентов.

Использование VR-технологий и UE дало возможность не только визуализировать движение агентов, но и смоделировать сценарии эвакуации с учётом таких факторов, как задымлённость, паника и динамические изменения. Это подчеркнуло важность учёта психофизиологических факторов (например, стресса и паники) для повышения точности прогнозирования и разработки эффективных стратегий эвакуации.

### **Заключение.**

В работе рассмотрены три подхода к моделированию эвакуации: макроскопический, микроскопический и гибридный. Макроскопическая модель эффективна для оценки общей динамики потока, но не учитывает индивидуальное поведение. Микроскопическая модель предоставляет более детализированную информацию, но требует значительных вычислительных ресурсов. Гибридная модель сочетает в себе преимущества обеих моделей, обеспечивая баланс между точностью и эффективностью, особенно в сложных сценариях эвакуации.

Использование VR-технологий позволило моделировать эвакуацию с учётом задымлённости, паники и динамических изменений, что подчеркивает важность современных технологий для точного прогнозирования и разработки стратегий эвакуации.

Практическая значимость работы заключается в анализе сценариев эвакуации, выявлении узких мест и предложении рекомендаций по улучшению безопасности.

Перспективы дальнейших исследований включают:

1. Учёт психологических факторов (паника, стресс).
2. Моделирование эвакуации при задымлении.
3. Интеграцию с сенсорными данными для управления в реальном времени.

Исследование подтверждает перспективность использования гибридных моделей и VR-технологий для повышения безопасности в критических ситуациях.

### **VR ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, ӨРТ ЖАҒДАЙЫНДА ЭВАКУАЦИЯЛАУ ПРОЦЕСІН МОДЕЛЬДЕУ: МАКРОСКОПИЯЛЫҚ, МИКРОСКОПИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ГИБРИДТІК ТӘСІЛДЕРДІ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ**

***Аңдатпа.** Мақалада өрт кезінде ғимараттардан адамдарды эвакуациялау процесін макроскопиялық, микроскопиялық және гибридік модельдерді пайдалану арқылы модельдеу қарастырылады. Жұмыстың мақсаты — эвакуация уақытын азайту және адамдардың қауіпсіздігін арттыру үшін толқын қозғалысының динамикасын талдау арқылы тәсілдер әзірлеу. Зерттеу барысында ағынның глобалды сипаттамалары (макроскопиялық модель), агенттердің жеке мінез-құлқы (микроскопиялық модель) және біріктірілген тәсіл (гибридік модель) қарастырылады. Unreal Engine (UE) сияқты технологиялар интерактивті симуляциялар жасау үшін пайдаланылады. Жұмыстың ғылыми маңызы — эвакуация уақытын болжау үшін модельдердің салыстырмалы талдауы. Қолданбалы құндылығы архитектуралық шешімдерді оңтайландыруда, эвакуациялық жоспарларды әзірлеуде және оқыту үшін VR-симуляцияларын жасауда көрінеді. Нәтижелер макроскопиялық модельдің жылдам бағалауды қамтамасыз ететінін, микроскопиялық модель адамдардың мінез-құлқын ескеретінін, ал гибридік модель эвакуацияның динамикасын ең дәл көрсетуге мүмкіндік беретінін көрсетеді.*

***Түйін сөздер:** Адамдарды эвакуациялау, өрт, макроскопиялық модель, микроскопиялық модель, гибридік модель, имитациялық модельдеу, виртуалды шындық, критикалық жағдай.*

### **MODELING THE EVACUATION PROCESS IN FIRE CONDITIONS USING VR TECHNOLOGIES: A COMPARATIVE ANALYSIS OF MACROSCOPIC, MICROSCOPIC, AND HYBRID APPROACHES**

***Abstract.** This paper examines the modeling of human evacuation from buildings during fire incidents using macroscopic, microscopic, and hybrid simulation models. The primary objective is to develop strategies aimed at minimizing evacuation time and enhancing safety through the analysis of crowd movement dynamics. The study investigates global flow characteristics using a macroscopic model, individual agent behavior with a microscopic model, and a combined approach in a hybrid model. Technologies such as Unreal Engine (UE) are utilized to create interactive simulations. The scientific significance of this work lies in the comparative evaluation of different modeling approaches for predicting evacuation times. The practical value includes optimizing architectural design, developing effective evacuation plans, and creating VR-based training simulations. Results indicate that while the macroscopic model provides rapid estimation and the microscopic model accounts for individual behavioral factors, the hybrid model most accurately reflects real-world evacuation dynamics.*

***Key words:** Evacuation of people, fire, macroscopic model, microscopic model, hybrid model, simulation modeling, virtual reality, critical situation.*

### Список литературы

1. Фэн, Ю., Дуйвес, Д. К., & Хогендорн, С. П. (2021). Использование виртуальной реальности для изучения выбора выходов пешеходами при эвакуации. *Safety Science*, 13, 105158. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105158>
2. Го, Ю., Чжу, Дж., Ван, Ю., и др. (2020). Метод моделирования эвакуации толпы в многоуровневой внутренней среде с огнем с использованием виртуальной реальности. *International Journal of Geo-Information*, 9 (12), 750. <https://doi.org/10.3390/ijgi9120750>
3. Марин-Моралес, Х., Ллинарес, К., Гиксерес, Х., & Алканис, М. (2020). Распознавание эмоций в погружающей виртуальной реальности: от статистики к аффективным вычислениям. *Sensors*, 20 (18), 5163. <https://doi.org/10.3390/s20185163>
4. Юржик, В., Ухлик, О., Снопкова, Д., и др. (2023). Анализ использования поведенческих данных из виртуальной реальности для калибровки моделей эвакуации на основе агентов. *Heliyon*, 9 (4), e14275. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14275>
5. де Лама, К., Гонсалес-Гайя, К., & Санчес-Лите, А. (2020). Экспериментальное предложение для изучения поведения человека в условиях пожара с использованием виртуальных сред. *Sensors*, 20 (12), 3607. <https://doi.org/10.3390/s20123607>
6. Ахмед, И., Харьюнен, В. Дж., Якуцци, Г., Равая, Н., Руотсало, Т., & Спапе, М. М. (2023). Прикосновение к виртуальным людям: тактильные реакции показывают эмоциональное воздействие аффективных агентов. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 14 (1), 331–345. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2020.3038137>
7. Мухамад, С. Б. С., & Бахрин, М. Х. (2017). Моделирование виртуальных сред в исследовательском реакторе. *AIP Conference Proceedings*, 1799(1), 050007. <https://doi.org/10.1063/1.4972941>
8. Муньос, Ж. Э., Лавуа, Ж. А., & Поп, А. Т. (2024). Психофизиологические инсайты и пользовательские перспективы: усиление навыков полицейского снижения напряженности через полнотелую виртуальную реальность. *Frontiers in Psychology*, 15, 1390677. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1390677>
9. Брукс, Дж., Варбуртон, М., Альгадьер, М., и др. (2020). Изучение человеческого поведения с помощью виртуальной реальности: методологическая основа Unity. *Behavior Research Methods*, 52 (1), 455–463. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01242-0>
10. Гребенников, Р. В. (2011). Моделирование поведения толпы с использованием локальных скалярных полей [Моделирование поведения толпы с использованием локальных скалярных полей] (Неопубликованная кандидатская диссертация). Воронежский государственный технический университет. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/230757270\\_Modelirovanie\\_povedenia\\_tolpy\\_s\\_ispolzovaniem\\_lokalnyh\\_skalarnyh\\_polej](https://www.researchgate.net/publication/230757270_Modelirovanie_povedenia_tolpy_s_ispolzovaniem_lokalnyh_skalarnyh_polej)

### References

1. Feng, Y., Duives, D. C., & Hoogendoorn, S. P. (2021). Using virtual reality to study pedestrian exit choices during evacuation. *Safety Science*, 137, 105158. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105158>
2. Guo, Y., Zhu, J., Wang, Y., et al. (2020). A virtual reality simulation method for crowd evacuation in a multi-exit indoor fire environment. *International Journal of Geo-Information*, 9 (12), 750. <https://doi.org/10.3390/ijgi9120750>
3. Marín-Morales, J., Llinares, C., Guixeres, J., & Alcañiz, M. (2020). Emotion recognition in immersive virtual reality: From statistics to affective computing. *Sensors*, 20 (18), 5163. <https://doi.org/10.3390/s20185163>
4. Juřík, V., Uhlík, O., Snopková, D., et al. (2023). Analysis of the use of behavioral data from virtual reality for calibration of agent-based evacuation models. *Heliyon*, 9 (4), e14275. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14275>

5. de Lama, C., González-Gaya, C., & Sánchez-Lite, A. (2020). An experimental test proposal to study human behaviour in fires using virtual environments. *Sensors*, 20 (12), 3607. <https://doi.org/10.3390/s20123607>
6. Ahmed, I., Harjunen, V. J., Jacucci, G., Ravaja, N., Ruotsalo, T., & Spapé, M. M. (2023). Touching virtual humans: Haptic responses reveal the emotional impact of affective agents. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 14 (1), 331–345. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2020.3038137>
7. Muhamad, S. B. S., & Bahrin, M. H. (2017). Virtual environments simulation in research reactor. *AIP Conference Proceedings*, 1799 (1), 050007. <https://doi.org/10.1063/1.4972941>
8. Muñoz, J. E., Lavoie, J. A., & Pope, A. T. (2024). Psychophysiological insights and user perspectives: Enhancing police de-escalation skills through full-body VR training. *Frontiers in Psychology*, 15, 1390677. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1390677>
9. Brookes, J., Warburton, M., Alghadier, M., et al. (2020). Studying human behavior with virtual reality: The Unity Experiment Framework. *Behavior Research Methods*, 52 (1), 455–463. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01242-0>
10. Grebennikov, R. V. (2011). Modelirovanie povedeniya tolpy s ispolzovaniem lokal'nykh skalyarnykh poley [Modeling crowd behavior using local scalar fields] (Unpublished doctoral dissertation). Voronezh State Technical University. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/230757270\\_Modelirovanie\\_povedenia\\_tolpy\\_s\\_ispolzovaniem\\_lokalnyh\\_skalarnyh\\_polej](https://www.researchgate.net/publication/230757270_Modelirovanie_povedenia_tolpy_s_ispolzovaniem_lokalnyh_skalarnyh_polej)

#### Авторлар туралы мәлімет

Сәдуақасов Рамазан Маратұлы	Техникалық ғылымдар магистрі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Жасанды интеллект технологиялары» кафедрасының оқытушысы, Астана қаласы, Қазақстан, Email: sadvakasov_ramazan@mail.ru
Сәдуақасова Кұралай Жанжігітқызы	Педагогика ғылымдарының кандидаты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Компьютерлік және бағдарламалық инженерия» кафедрасының м. а. доценті, Астана қ., Қазақстан. E-mail: k.sadvakasova@inbox.ru

#### Сведение об авторах

Садвакасов Рамазан Маратович	магистр технических наук., преподаватель кафедры «Технологий искусственного интеллекта» Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева, г. Астана, Казахстан, E-mail: sadvakasov_ramazan@mail.ru
Садвакасова Куралай Жанжигитовна	кандидат педагогических наук., и.о. доцент кафедры «Компьютерная и программная инженерия» Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева, г. Астана, Казахстан, E-mail: k.sadvakasova@inbox.ru

#### Information about the authors

Sadvakassov Ramazan Maratovich	Master of Technical Sciences, Lecturer at the Department of Artificial Intelligence Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, Email: sadvakasov_ramazan@mail.ru
Sadvakassova Kuralay Zhanzhigitovna	Candidate of Pedagogical Sciences, Acting Associate Professor of the "Computer and Software Engineering" Department, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: k.sadvakasova@inbox.ru