

УДК: 004.94

Моделирование поведения паникующей толпы в многоуровневом разветвленном помещении

А. М. Аптуков, Д. А. Брацун^а, А. В. Люшнин

Пермский государственный педагогический университет, Центр изучения сложных систем,
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 24

E-mail: ^а dmitribratsun@rambler.ru

Получено 24 августа 2012 г.

Предлагается модель коллективного поведения толпы, покидающей замкнутое помещение. Модель основывается на методах молекулярной динамики, учитывающей действие как физических, так и социально-психологических сил. Впервые предлагается алгоритм расчета для сложно разветвленных помещений. Для этого у каждого индивида формируется план выхода из помещения, который стохастически трансформируется в процессе эволюции. Алгоритм включает в себя предварительное разбиение пространства на комнаты, выход из которых индивиды выбирают в соответствии со своим распределением вероятности. Модель калибруется с помощью данных, появившихся в результате пожара в ночном клубе «Хромая лошадь» (Пермь, 2009 г.) Алгоритм оформлен как *Java*-программа конечного пользователя. Предполагается, что программа может помочь тестировать здания на предмет их безопасности для людей.

Ключевые слова: сложные системы, коллективное поведение, модели с индивидуальной динамикой

Modeling of behavior of panicked crowd in multi-floor branched space

A. M. Aptukov, D. A. Bratsun, A. V. Lyushnin

Perm Pedagogical University, Center for the Study of Complex Systems, 24 Sibirskaya st., Perm, 614990, Russia

Abstract. — The collective behavior of crowd leaving a room is modeled. The model is based on molecular dynamics approach with a mixture of socio-psychological and physical forces. The new algorithm for complicatedly branched space is proposed. It suggests that each individual develops its own plan of escape, which is stochastically transformed during the evolution. The algorithm includes also the separation of original space into rooms with possible exits selected by individuals according to their probability distribution. The model is calibrated on the base of empirical data provided by fire case in the nightclub “Lame Horse” (Perm, 2009). The algorithm is realized as an end-user *Java* software. It is assumed that this tool could help to test the buildings for their safety for humans.

Keywords: complex systems, collective behavior, individual-based models

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2013, vol. 5, no. 3, pp. 491–508 (Russian).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Пермского края (грант С-26/244) и Программы стратегического развития Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета (проект 031-Ф).

Введение

Одной из самых опасных для жизни форм коллективного человеческого поведения является движение толпы людей, замкнутых в пространстве помещения и подверженных действию паники. Особенную остроту этому явлению могут придавать бедствия естественного или человеческого происхождения — пожары, наводнения, террористические акты и т. д. Ряд трагических происшествий последнего времени показал, что паника многократно увеличивает жертвы среди людей даже в ситуациях, напрямую не угрожающих жизни.

Несмотря на актуальность проблемы основной интерес к ней долгое время проявлялся в основном со стороны психологов и социологов [Mintz, 1951; Kelley *et al.*, 1965]. В этой литературе давались различные, порой неоднозначные определения паники, условия ее возникновения. На различных научных площадках и форумах до сих пор идут активные споры о причинах и проблемах паники толпы. В большинстве своем все эти источники ставят коллективное бессознательное в человеке, как основной фактор, вызывающий возникновение паники в толпе. Соответственно и все решения проблемы исходят из данного факта [Андреева, 1999]. Заметно выделяется другая часть работ, не связанных с психологией и социологией. Прежде всего, это различные пособия и книги для учебных заведений строительной направленности. В теории проектирования зданий, описываемой в данной литературе, имеется своя модель толпы людей, представляемая как поток жидкости. Движение и различные эффекты описываются множеством различных эмпирически или полуэмпирически полученных уравнений и формул [Предтеченский, Милинский, 1979]. Стоит отметить, что такой подход получил свою долю критики. Дело в том, что жидкость — среда несжимаемая и прямолинейный перенос ее свойств на континуум людей приводит к неправильным результатам. Толпа, как континуум, не может быть сведена ни к жидкости, ни к газу, так как относится к умеренно сжимаемым средам [Henderson, 1971]. Кроме того, континуальный подход не способен описать многие важные эффекты, возникающие в паникующей толпе. Главный из них — закупоривание выхода из помещения группой паникующих людей в результате давки.

Изучение поведения толпы на базе математических моделей сложных систем началось сравнительно недавно. Пожалуй, первая публикация по этой теме появилась в журнале *Nature* в 2000 году [Helbing, Farkas, Vicsek, 2000], в которой удалось ряд таких характерных явлений, как образование пробок, вовлечение новых людей в панику, наблюдавшихся в условиях реально паникующей толпы, впервые воспроизвести при помощи математического моделирования. Важным вкладом Дирка Хелбинга с коллегами была идея о применении к толпе людей методов молекулярной и реактивной динамики, в рамках которой в качестве потенциалов взаимодействия между молекулами–людьми были использованы специально сконструированные силы психологической и социальной природы [Helbing, Molnar, 1995]. Вслед за этой работой в литературе были предложены подобные модели других авторов [Hoogendoorn, 2004; Antonini, Bierlaire, Weber, 2006; Yu, Johansson, 2008; Кирик, Юргельян, Круглов, 2008; Аптуков, Брацун, 2009; Bratsun *et al.*, 2012], рассматривающие различные аспекты возможных усложнений модели. Некоторые построения психосоциальных потенциалов сил взаимодействия имеют слабые места, так как не всегда приводят к корректным результатам, и продолжают дискутироваться в литературе [Moussaida, Helbing, Theraulaz, 2011]. Например, все предложенные в научной литературе модели основаны только на двухчастичном взаимодействии, в то время как в ходе моделирования часто встречаются ситуации, когда в определенной точке пространства сталкиваются трое и более людей. Кроме того, реальная система всегда стохастична и проблема корректного добавления случайных флуктуаций в поведение толпы остается открытой. Несмотря на эти замечания, работы последнего десятилетия ярко продемонстрировали, что групповую динамику толпы можно успешно моделировать.

Необходимо отметить, что большинство указанных публикаций концентрировали свое внимание на изучении свойств динамики самой толпы, оттачивая составляющие элементы модели. Например, в работе [Moussaida, Helbing, Theraulaz, 2011] рассмотрена модель многочастичного взаимодействия, которая приводит к возникновению в человеческом потоке вихрей,

волн и даже турбулентности. В работе [Кирик, Юргельян, Круглов, 2008] в модель поведения индивидов добавлен элемент анализа окружающей обстановки, реализована стратегия «терпеливого человека». Влияние задымленности помещения на динамику толпы было исследовано в [Аптуков, Брацун, 2009]. Там же изучен вопрос о возникновении колебательного режима покидания помещения с узким выходом. При этом, как правило, авторы для простоты рассматривали помещения простой формы. Пожалуй, впервые вопросы взаимодействия участника толпы со сложно устроенным помещением рассмотрены в работе [Huang, Guo, 2008]. Авторы предложили вероятностный алгоритм действия индивида в случае нескольких вариантов выхода из комнаты. В настоящий момент этот вопрос активно исследуется в китайской литературе. Укажем, например, совсем свежую работу [Ху, Huang, Yong, 2012]. Но и здесь рассмотрены примеры помещений примитивной формы. Скорее всего, моделирование в сложных помещениях является предметом коммерциализации и выведено за пределы научной литературы. Нам известна, по крайней мере, одна IT-компания, Boston Dynamics, которая создала коммерческий продукт DI-Guy [официальный сайт компании <http://www.diguy.com/diguy>]. В рамках этого большого проекта разработан программно-графический пакет, в котором воплощена реалистическая модель человеческого поведения. Как можно понять из официального релиза компании, основным заказчиком программного продукта является министерство обороны США и крупнейшие военно-промышленные корпорации (Boeing, BAE Systems, Raytheon). Модели групповой динамики используются здесь в специфических целях — сформировать правильную реакцию обучающегося на симуляторе-тренажере в конкретной ситуации: в бою, во время штурма объекта, при патрулировании улиц и нападении толпы людей. На сайте компании утверждается, что их программный продукт уникален и конкурентов у него нет.

В данной работе в части механизма взаимодействия между элементами сложной системы толпа-индивид-помещение используется модель Хелбинга [Helbing, Farkas, Vicsek, 2000]. Основное внимание мы переносим на изучение взаимодействия с ландшафтом, в котором разворачивается коллективная динамика толпы. Мы предлагаем простой алгоритм расчета эволюции толпы в многоуровневом сложно-разветвленном помещении. Главным элементом здесь является формирование у каждого индивида плана выхода из помещения, который стохастически трансформируется в процессе его движения. Алгоритм включает в себя предварительное разбиение пространства на отдельные подпространства, выход из которых индивиды выбирают в соответствии со своим распределением вероятности. Рассматриваются примеры численного расчета коллективного поведения толпы людей при эвакуации из реально существующих помещений. Обсуждаются возможные практические приложения полученного симулятора.

Модель паникующей толпы Хелбинга

В соответствии со вторым законом Ньютона, для того чтобы предсказать поведение динамической системы через интервал времени Δt , для каждого тела необходимо написать уравнение движения, в правой части которого перечислить все силы, действующие на это тело в момент времени t . Кроме того, необходимо задать начальные условия, значения координат и скорости для каждого тела, и граничные условия, если динамическая система распределенная. Совместное интегрирование уравнений движения с начальными и граничными условиями дает уникальное динамическое решение. Для построения модели паникующей толпы, следуя работе [Helbing, Farkas, Vicsek, 2000], поступим таким же образом. В рамках этого подхода каждый участник движения в толпе рассматривается как отдельная молекула, а правила взаимодействия между людьми задаются с помощью специально подобранных потенциальных сил психологического, социального и физического происхождения. Вообще говоря, по своей природе человек неизмеримо сложнее любой физической системы и в общем случае его поведение не может быть сведено к набору простых правил взаимодействия. В конце концов, человек имеет свободу воли. Однако, в условиях паники сознание индивида отключается, и он начинает действовать подобно автомату, рефлекторно отвечая на внешние раздражители. Именно поэтому моле-

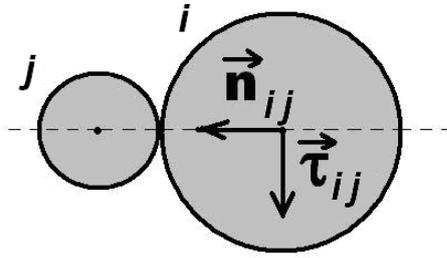


Рис. 1. Схема взаимодействия двух индивидов, формально представленных в модели в виде шаров.

кулярная динамика может помочь при описании движения толпы, рассматривая его как коллективное бессознательное действие.

Рассмотрим множество из N людей, абстрактно представленных в модели в виде шариков с радиусом R_i и массой M_i , где $i = \overline{1, N}$. В выбранной системе координат поведение каждого индивида характеризуется радиус-вектором \mathbf{r}_i , актуальной скоростью передвижения \mathbf{V}_i и скоростью \mathbf{U}_i , с которой человек хотел бы передвигаться. Именно несоответствие желаемой и актуальной скорости и формирует основную силу, психологическую по своей природе, инициирующую движение паникующего индивида:

$$\mathbf{F}_i^1 = M_i \frac{\mathbf{U}_i - \mathbf{V}_i}{\Delta t_i}. \quad (1)$$

Здесь Δt_i — параметр, характеризующий время вовлечения индивида в паникующую толпу. В общем случае он может иметь индивидуальное значение для каждого индивида. Сила (1) устроена таким образом, что в случае превышения желаемой скорости над актуальной скоростью, человек ускоряется. Если индивид не хочет никуда двигаться, то его движение со временем прекращается. В упрощенных моделях желаемая скорость рассматривается как параметр задачи, задаваемый перед расчетным циклом. Если предметом исследования является процесс вовлечения все новых членов в паникующую толпу, то эта скорость должна считаться переменной, которая может менять свое значение в зависимости от каких-то факторов. Например, группа бегущих в панике людей, неожиданно попадающая в поле зрения рассматриваемого индивида, может рассматриваться как поле паники, которое способно резко изменить значение желаемой скорости индивида и заставить его присоединиться к толпе.

Кроме силы (1), которая в общем случае формируется независимо от групповой динамики, в процессе перемещения на каждого участника коллективного движения действуют также и иные силы, связанные с взаимодействием человека с другими людьми и препятствиями. Рассмотрим силу социальной природы, действующую на индивида i со стороны индивида m :

$$\mathbf{F}_{im}^2 = A \mathbf{n}_{im} \exp \frac{D_{im}}{B}, \quad (2)$$

где $D_{im} \equiv R_i + R_m - |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_m|$, A и B — параметры задачи, \mathbf{n}_{im} — единичный вектор, направленный по линии соединения двух взаимодействующих индивидов (рис. 1). Сила (2) формирует коллективное поле паникующей толпы. Оно описывает нежелание человека вступать в слишком тесный физический контакт с другими людьми. Потенциал устроен таким образом, что в случае, когда расстояние между индивидами становится меньше суммы их радиусов, сила отталкивания становится особенно значительной. На больших расстояниях вклад этого слагаемого экспоненциально затухает. Чтобы не учитывать потенциальное взаимодействие в этом случае, при проведении практических расчетов определяется максимальное расстояние от индивида, дальше которого потенциальное взаимодействие не учитывается. Силы (2), отталкивающие людей друг от друга, помогают им избегать столкновений, но не всегда. В тех случаях, когда плотность людей и их желаемая скорость в формуле (1) довольно велики, эта сила не спасает их от столкновений. Кроме того, столкновению людей между собой и стенами способствует движение на большой скорости по инерции, когда просто невозможно уклониться от столкновения. Чаще всего такой эффект наблюдается при резких поворотах. Поэтому для полного

описания сил, действующих во время давки, необходимо ввести дополнительные силы взаимодействия физической природы:

$$\mathbf{F}_{im}^3 = D_{im} H(D_{im})(k \mathbf{n}_{im} + K[(\mathbf{V}_m - \mathbf{V}_i) \cdot \boldsymbol{\tau}_{im}] \boldsymbol{\tau}_{im}) . \quad (3)$$

Здесь $\boldsymbol{\tau}_{im}$ — единичный вектор, направленный перпендикулярно к линии соединения взаимодействующих индивидов (рис. 1); k и K — параметры задачи, а квадратные скобки обозначают скалярное произведение. Силы (3) представляют физические взаимодействия между участниками коллективного движения в толпе и имеют традиционный для молекулярной динамики вид. Первое слагаемое в скобках в (3) описывает упругое отталкивание при лобовом столкновении между индивидами, второе — силу трения при касательном движении. Оба взаимодействия возникают только при непосредственном контакте тел, т. е. положительных значениях D_{im} , поэтому выражение в целом умножается на функцию Хевисайда $H(D_{im})$. Упругое отталкивание и трение являются принципиальными членами для моделирования поведения толпы. Если пренебречь этими эффектами, многие существенные черты паникующей толпы в моделировании не воспроизводятся [Helbing, Farkas, Vicsek, 2000].

По аналогии с силами (2-3), действующими между индивидами, можно записать взаимодействия, возникающие между индивидами и физическим препятствием, например, стеной:

$$\mathbf{F}_{im}^{2W} = A^W \mathbf{n}_{im}^W \exp \frac{D_{im}^W}{B^W} , \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{im}^{3W} = D_{im}^W H(D_{im}^W)(k \mathbf{n}_{im}^W + K[\mathbf{V}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_{im}^W] \boldsymbol{\tau}_{im}^W) , \quad (5)$$

где D_{im}^W — кратчайшее расстояние от индивида i до стены m ; \mathbf{n}_{im}^W и $\boldsymbol{\tau}_{im}^W$ — единичные вектора, направленные по линии кратчайшего соединения индивид — стена и перпендикулярно к этой линии соответственно; A^W и B^W — параметры задачи.

С учетом формул (1)–(5) уравнения динамики паникующей толпы могут быть записаны в стандартном для классической механики виде:

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{V}_i , \quad (6)$$

$$M_i \frac{d\mathbf{V}_i}{dt} = \mathbf{F}_i^1 + \sum_{i \neq m} \mathbf{F}_{im}^2 + \sum_{i \neq m} \mathbf{F}_{im}^3 + \sum_j \mathbf{F}_{ij}^{2W} + \sum_j \mathbf{F}_{ij}^{3W} . \quad (7)$$

Система из $4N$ обыкновенных дифференциальных уравнений (1-7) должна быть дополнена начальными условиями, а также конфигурацией помещения, в котором будет разворачиваться коллективная динамика толпы.

Алгоритм пространственной ориентации индивидов в разветвленном помещении с множественными выходами

Если предположить, что план помещения в общих чертах знаком паникующим индивидам, то главной проблемой построения модели ориентирования участника движения в многоуровневом разветвленном помещении является, по нашему мнению, формирование у него плана выхода из помещения.

Этот план может быть только индивидуальным, и он отражает общие представления паникующего о том, каким образом он мог бы покинуть здание, находясь первоначально в той точке помещения, в которой его застало сообщение об эвакуации. В ходе дальнейшей эволюции системы план спасения каждого индивида может, вообще говоря, трансформироваться в соответ-

свии с меняющейся обстановкой. Обсудим, как влияет структура помещения на этот процесс. По нашему мнению, все помещения можно разбить на два класса — односвязные и не односвязные. Односвязными назовем такие помещения, в которых любой замкнутый путь можно непрерывным преобразованием стянуть в точку. В качестве реального примера такого помещения на рисунке 2 представлен план первого этажа четвертого корпуса Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета (далее — ПГГПУ). Изучая план корпуса, хорошо видно, что данное помещение является односвязным. Это следствие того, что все периферийные комнаты здесь имеют один выход в общие коридоры, которые выводят в большой главный холл и, далее, на выход из здания. Необходимо отметить, что все окна первого этажа имеют решетки и покинуть здание через окно невозможно.

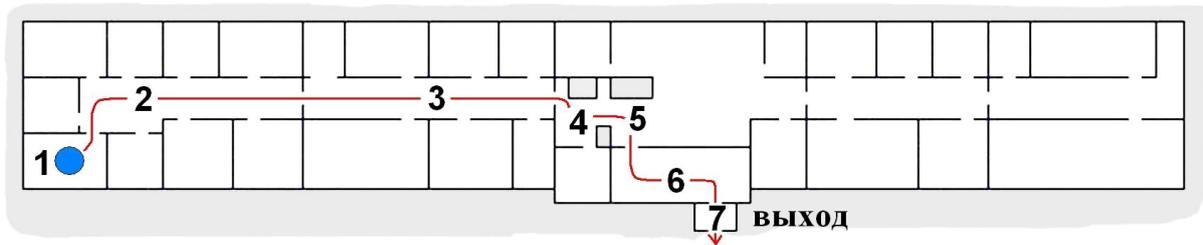


Рис. 2. Планировка первого этажа четвертого корпуса ПГГПУ является примером помещения односвязного типа: любой замкнутый путь может быть непрерывным образом стянут в точку, так как каждая комната имеет лишь один выход

Предположим, что один из участников движения в момент объявления эвакуации оказался в левом крыле здания (отмечен синим кружком на рис. 2). План выхода, сложившийся в его голове в этот момент, включает перемещения через следующие комнаты: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow \dots$. Односвязность помещения приводит к тому, что этот план не имеет других вариантов. Конечно, в результате флуктуации в ходе движения индивида может выбросить в какую-то другую комнату, однако, ему все равно придется вернуться назад и продолжить свой план спасения.

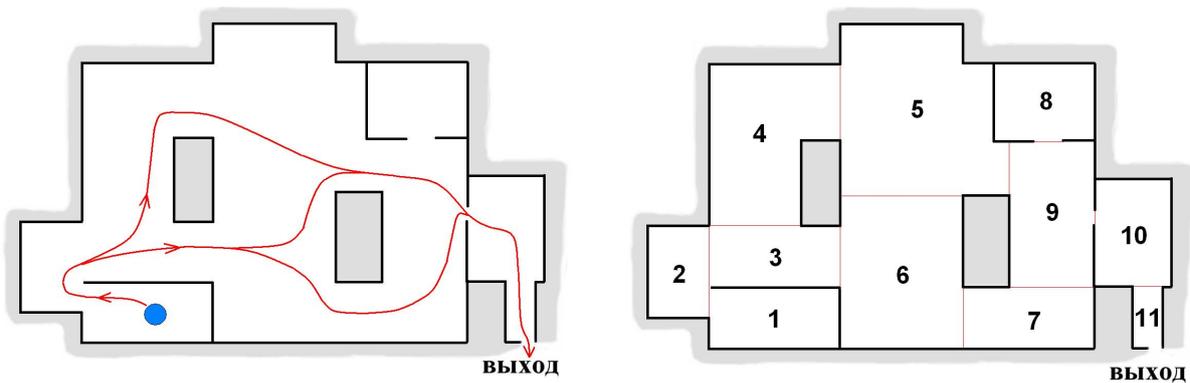


Рис. 3. Планировка ночного клуба «Хромая лошадь» (г. Пермь) является примером помещения не односвязного типа: здесь существуют замкнутые пути, которые не могут быть непрерывным образом стянуты в точку. Каждый индивид имеет несколько вариантов выхода из здания (слева). Пример дискретизации пространства «Хромой лошади» (справа)

Таким образом, в этом случае удобно хранить в памяти компьютера не индивидуальные планы выхода из здания для каждого участника движения, а прописать жесткий алгоритм действий индивидов при попадании его в конкретную комнату помещения. Скажем, если пани-

кующий попал в комнату 2, он обязан после этого направится в комнату 3, а если попал в комнату 6, то должен однозначно следовать далее в комнату 7 (рис. 2). Технически это реализуется путем задания для каждой комнаты точек сбора для всех индивидов, так или иначе попавших в эту комнату.

Иная ситуация складывается, если помещение является неодносвязным и в нем существуют такие замкнутые пути, которые невозможно непрерывным преобразованием стянуть в точку. В качестве примера реального помещения такого типа приведем план ночного клуба «Хромая лошадь» в г. Перми (рис. 3). Как видно из рисунка, у участника движения есть несколько вариантов достичь выхода из помещения (рис. 3, слева). Он может начать двигаться по одному пути, но в ходе эволюции системы сменить стратегию движения. Приписывать каждому индивиду однозначный путь выхода было бы в этом случае неоправданным упрощением. Это означает, что без применения вероятностных методов при расчете здесь не обойтись. Эта проблема решалась следующим образом. Сначала расчетное пространство разбивалось на условные комнаты (рис. 3, справа). Затем для каждой комнаты прописывался алгоритм поведения индивида в ней. Для части комнат, как и в односвязном случае, можно задать однозначный сценарий поведения. На рисунке 3 к ним относятся, например, комнаты 1, 8, 10 и т.д. В других комнатах индивид должен выбирать свой дальнейший путь, исходя из сложившейся в процессе эволюции системы обстановки. Рассмотрим, например, ситуацию в комнате 6 (рис. 4). Попадая в эту комнату слева, участник движения имеет возможность продвигаться дальше в комнату 5 или в комнату 7. Оба пути ведут к выходу из помещения. Один вариант выбора пути может быть реализован с помощью распределения вероятностей, основанных на расстоянии до каждого выхода. Пусть r_5 и r_7 обозначают расстояния от текущего положения индивида до середины соответствующих выходов. Тогда вероятность выбора направления 5, нормированная на единицу, может быть записана как

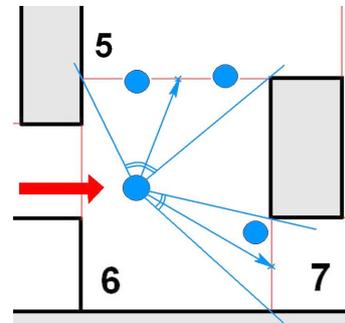


Рис. 4. Схема, поясняющая алгоритм выбора индивидом пути выхода из комнаты в случае неодносвязного помещения

$$P_5 = \frac{r_7}{r_5 + r_7}, \tag{8}$$

где принято во внимание, что вероятность тем меньше, чем дальше находится соответствующий выход. Подобным же образом вероятность выхода может быть определена на основании числа других индивидов, которые попадают в поле зрения данного индивида в направлении выходов. Пусть N_5 и N_7 обозначают соответственно число людей в поле зрения в направлении выходов 5 и 7 (на рис. 4 показаны два индивида в направлении 5 и один индивид в направлении 7). Тогда вероятность выбора направления 5 запишем как

$$P_5 = \frac{N_7}{N_5 + N_7}. \tag{9}$$

Формула (9) учитывает, что более плотная толпа в определенном направлении, означает меньшее желание индивида идти туда. Возможно также вычислять вероятность с помощью комбинации формул (8) и (9). Учитывая, что социальный эффект, заставляющий индивидов по возможности держаться подальше друг от друга, уже заложен в формуле (2), в большинстве случаев вероятность выхода вычислялась на основе подхода (8).

Таким образом, описанный алгоритм приводит к формированию у каждого участника движения собственного плана выхода из помещения, который стохастически трансформируется в

ходе эволюции системы. Предлагаемый подход позволяет моделировать коллективное поведение толпы в помещении любой сложности.

Описание программной реализации алгоритма расчета

Как видно из формул (1)–(5), градиенты изменения сил взаимодействия между элементами системы могут достигать больших значений. Это требует использование методов численного интегрирования высокого порядка. Однако, они требуют более массивных вычислений. Экспериментируя с различными интеграторами, мы остановили свой выбор на методе Рунге-Кутты-Фельберга 4 порядка [Могилев, Пак, Хеннер, 2009]. Программа была написана на языке программирования *Java*. Как нам представляется, этот язык наиболее полно позволяет осуществить требования, предъявляемые системой дифференциальных уравнений (1)–(7). Он позволяет организовать параллельный расчет без дополнительной нагрузки на процессор через механизм *thread*’ов (потоков). Уравнения для каждого элемента динамической системы (1)–(7) рассчитывались в своем отдельном потоке с учетом текущих данных по общей системе уравнений. Отметим также, что язык *Java* в сочетании со средой разработки *Eclipse SDK* дают широкие возможности для реализации идей программиста. Простота и элегантность в написании кода, вместе с возможностью использования символов кириллицы, позволяют писать ясные и понятные коды без громоздких комментариев.

Остановимся подробнее на описании численного кода, в котором была реализована модель групповой динамики толпы. Классы были разбиты на четыре логические группы. Первая группа реализовывала базовые классы модели (*Human, Ped, Room, UserData, Wall*). Вторая группа организовывала работу с оболочкой (*MainApplet*). Третья группа включала в себя один класс *RungeKutta* для реализации численного интегрирования системы. Наконец, четвертая группа образована классами вспомогательных объектов (*LabelWithCheck, LabelWithText, CPPReader, FizVector, Pramaya, Tochka*).

При задании граничных условий, стены помещения и выходы из него описывались как наборы отрезков, задаваемых координатами начала и конца отрезка в двумерной декартовой системе координат. В этой же системе координат задавались начальные значения и вычислялись текущие координаты субъектов толпы. Для создания виртуальных стен помещения был создан класс *Wall*. Для описания комнат использовался класс *Room*, который состоял из элементов класса *Wall* и представлял собой массив данных, описывающий стены комнаты в сочетании со вспомогательными методами этого класса. В этом же классе имелись атрибуты *дверь* и *точкаСбора*, отвечающие за выход из комнаты и точку сбора для паникующих людей соответственно. Точка сбора задавалась сразу же выходом из комнаты. Алгоритм выхода из комнаты зависел от расположения и количества дверей в данной комнате. В зависимости от того, какое помещение рассматривается (односвязное или неодносвязное), точка сбора для каждого участника коллективного движения рассчитывалась исходя из конкретной ситуации. Для помещения, состоящего из нескольких комнат и имеющего односвязную топологию, использовалась сложносоставная точка сбора. При выходе индивида из комнаты и переходе его в другую комнату, его точка сбора автоматически сменялась на точку сбора новой комнаты. Далее все происходило аналогично вплоть до выхода индивида из здания наружу. Условием перехода в другую комнату считалось пересечение воображаемой линии порога выхода. В случае помещения с неодносвязной структурой для каждого индивида выстраивался персональный план выхода из здания, который мог стохастически трансформироваться в процессе движения.

Для описания каждого индивида толпы, обладающего такими свойствами как радиус, масса, положение в пространстве, скорость и направление движения, был использован базовый класс *Human* с соответствующими полями — *радиус, масса, текПоложение, текСкорость*. Последние два атрибута были экземплярами классов *Tochka* и *FizVector* соответственно. Необходимо заметить, что численные расчеты проводились только с индивидами, задаваемыми в форме шариков, хотя реализовать в модели более точную форму человека не составляет особого труда.

От класса типа *Human* путем наследования был образован класс *Ped*, в котором были реализованы все специфичные свойства и методы для объектов модели — желаемая скорость, признак принадлежности к комнате, указание на выход из комнаты и радиус «видимости». Радиус «видимости» — это радиус некоторой области вокруг одного человека, находясь в котором, другие люди влияют на направление его движения при стадном типе поведения. Таким образом, за все эти параметры отвечают такие атрибуты класса *Ped* как *модульЖелСкор*, *векторЖелНапр*, *ужеВышел*, *номерКомнаты*, *радиусВидимости*, *параметрПаники*. Этот класс содержит также статические атрибуты, которые являются параметрами динамической системы (1)–(7). Класс *UserData* содержит в себе статические методы для работы с исходными данными, такими как чтение из файла, формирование и запись нового файла. Кроме этого для корректной работы этих методов в классе объявлено несколько *private* методов. Атрибуты этого метода необходимы для работы модели — в них хранятся основные начальные параметры системы — массив объектов людей, массив комнат, количественные переменные. За них отвечают такие переменные как — *количествоЛюдей*, *количествоКомнат*, *количествоСтен*, *коэффициентПропорциональности*, *комната*, *толпа*, *случайноеРасположение*, *нормальныйВес*, *сДымом*, *имяФайлаКоординатКомнат*.

Класс *MainApplet* реализовывал анимацию модели, и для этого была использована методика *Swing* для реализации оконного интерфейса. По этой причине этот класс образовывался наследованием от одного из классов оконных интерфейсов *JPanel*, которые по сути являются классом апплетом. Это позволяет использовать модель имитационного моделирования динамики толпы на Web страницах. Таким образом, сервис расчета коллективного поведения толпы в заданном помещении может быть предоставлен он-лайн.

Для улучшения восприятия результатов моделирования данные траекторий движения отдельных участников толпы могут быть использованы для создания трехмерных анимаций с реалистичными картинками коллективного поведения. Пример такого постпроцессинга приводится на рисунке 5.

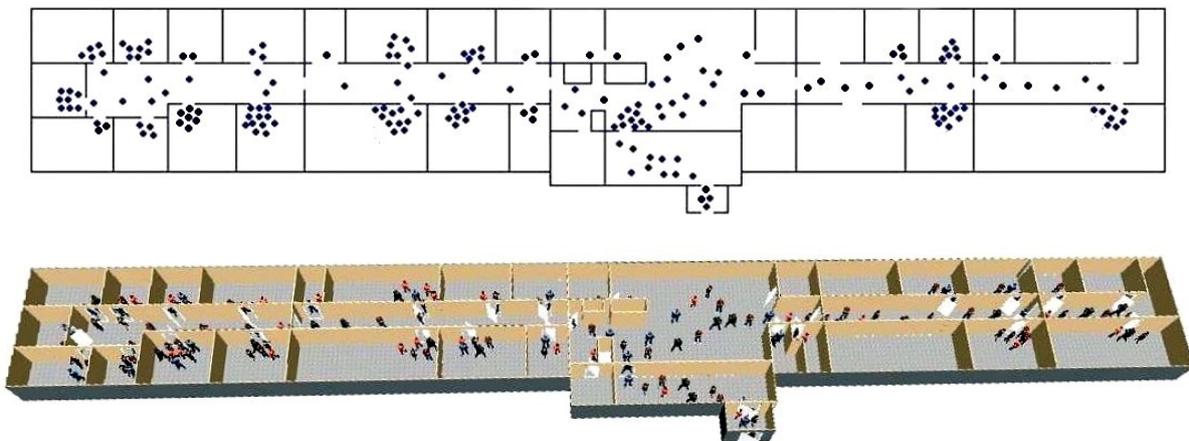


Рис. 5. Пример обработки данных расчета коллективного поведения толпы. Оригинальный вид одного кадра анимации симулятора паники (вверху). Кадр трехмерной анимации после обработки данных расчета (внизу)

В данный момент совместно с IT-компанией ИВС (г.Пермь) [официальный сайт компании: <http://www.ics.perm.ru/>] отдельно разрабатывается технология считывания плана исследуемого помещения и автоматического перевода данных в форму, пригодную для использования симулятором паники. Это позволит автоматизировать этап подготовки входных данных и даст возможность представить симулятор как программу конечного пользователя. Данная разработка выходит за пределы темы публикации и здесь не обсуждается.

Выбор параметров задачи

Паника является внезапным и опасным событием, которое исключает возможность эксперимента в реальной жизни. Поэтому калибровка модели остается одной из самых важных процедур при моделировании поведения паникующей толпы. Обсудим выбор значений параметров задачи (1)–(7). Масса мужских индивидов, участвующих в динамике, генерировалась случайным образом с помощью нормального распределения с наиболее вероятным значением 80 кг. Для женских особей проводилась подобная процедура с наиболее вероятным значением 60 кг.

Исходя из средних физических возможностей человека, скорость его передвижения может достигать 8 м/с. При этом скорость передвижения индивида в спокойной ситуации приблизительно равняется $V \approx 0.6$ м/с, а в возбужденном состоянии вырастает до $V \approx 3$ м/с. Разумная оценка для характерного времени набора скорости $\Delta t = 0.5$ с [Helbing, Farkas, Vicsek, 2000].

По сути дела, параметры k и K являются коэффициентами жесткости и трения при взаимодействии между индивидами соответственно. Хотя в действительности эти параметры варьируются от человека к человеку, так как зависят от физических свойств их одежды, для простоты мы выбрали одинаковые значения для всех людей: $k = 1.2 \times 10^3$ кг/с², $K = 2.4 \times 10^5$ кг/мс. Такие же значения были взяты для параметров, характеризующих взаимодействие человек-стена.

Наиболее чувствительными для системы являются параметры A и B , входящие в формулу (2) для взаимодействия социальной природы, так как зависимость имеет экспоненциальный характер. В работе [Helbing, Farkas, Vicsek, 2000] выбор значений для этих параметров подробно обсуждается, и предлагаются значения: $A = 2 \times 10^3$ Н, $B = 0.08$ м. Результаты наших численных экспериментов подтверждают взвешенность этих оценок.

Пример расчета эвакуации из помещения с односвязной структурой

Одним из важных эффектов, который удастся воспроизвести в рамках модели, является переход движения потока людей к нестационарному режиму. Проиллюстрируем этот эффект на примере простого односвязного помещения. Рассмотрим квадратную комнату 14×14 метров с одним единственным выходом шириной 1 метр, расположенным в середине одной из стен (рис. 6). Первоначальное положение людей в комнате задавалось случайно, модуль их начальной скорости движения равнялся 1 м/с, направление — случайное. В данной реализации рассматривались только индивиды мужского пола.

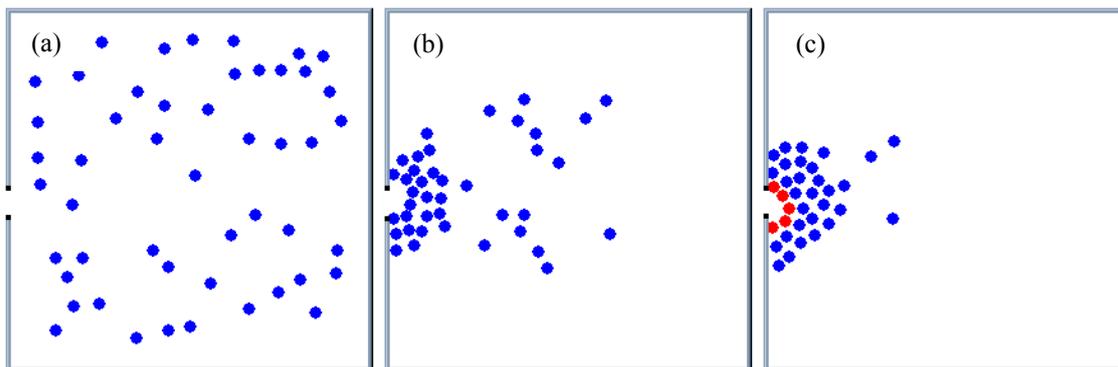


Рис. 6. Эффект забутыливания выхода из помещения. Образование арки из индивидов отмечено красным цветом. Представленные кадры анимации показывают коллективную динамику толпы во времени

В начальный момент времени «желаемая» скорость равна текущей скорости движения, поэтому сила (1) равна нулю. Это означает спокойное состояние толпы (рис. 6а). В определенный момент задается большое значение желаемой скорости и начинается паника: все индивиды одновременно устремляются по направлению к точке сбора, которая располагается прямо за вы-

ходом из помещения. Отметим, что в этом случае каждый человек в толпе движется по своему направлению к выходу, и движения окружающих его людей никак не влияет на его поведение. Толпа служит здесь только в качестве естественного препятствия для данного индивида. В результате на выходе возникает пробка (рис. 6b), а затем и структура, которую мы будем называть аркой (на рис. 6с выделена красным цветом). Выход людей из помещения прекращается.

Влияние модуля желаемой скорости на поток людей из помещения было исследовано в диапазоне [1, 9] с шагом 0.5 м/с. Вычисления производились для толпы из 100 человек. Рассуждая прямолинейно, можно было бы предположить, что с ростом скорости перемещения людей, скорость темп выхода людей из помещения должен также увеличиваться. Здесь мы, однако, сталкиваемся с нелинейным эффектом, связанным с закупориванием выхода. На рисунке 7 представлен график зависимости времени выхода всех людей из помещения от величины модуля желаемой скорости. Так как процесс стохастический, каждая точка на графике есть результат усреднения по нескольким десяткам реализаций. На рисунке 7 хорошо видно, в какой момент возникает паника. Если при небольших значениях желаемой скорости зависимость времени выхода людей из помещения от их скорости обратно пропорциональна, то, начиная со значения $U \approx 3$ м/с, ситуация меняется: чем быстрее желают двигаться индивиды, тем медленнее происходит эвакуация.

Если посматривать анимацию процесса эвакуации, то можно заметить, что индивиды выходят из помещения мелкими группами. Это, в свою очередь, происходит из-за образования арки, которая сначала закупоривает выход, а затем разрушается. При образовании такой арки люди задерживаются при выходе до нескольких минут. Через некоторое время арка разрушается, и индивиды снова выходят один за другим до образования следующей арки. Интересно отметить, что этот кооперативный эффект, возникающий в силу нелинейности системы, противоречит широко распространенному 20–30 лет назад взгляду на толпу и процесс ее покидания помещения [Предтеченский, Милинский, 1979]. Переход от равномерного к неравномерному режиму выхода толпы из помещения, по-видимому, может быть математически описан бифуркацией Хопфа [Аптуков, Брацун, 2009]. Подтверждение этой гипотезы требует, однако, дополнительного исследования. Таким образом, желаемая скорость является здесь важным бифуркационным параметром.

Рассмотрим теперь более сложный случай односвязного помещения. В качестве примера реально существующего помещения был взят первый этаж четвертого корпуса ПГТПУ, план которого приведен на рисунке 2. В здании имеются прямоугольные комнаты с одним выходом в длинные коридоры с сужающимися и расширяющимися участками. Коридоры выходят в главный холл, откуда имеется выход наружу. Официальный план эвакуации людей из здания в случае пожара предусматривает выход людей из аудиторий в коридоры, а затем через главный холл — на улицу. Официальный план предусматривает вывод людей и через запасные выходы. Проблема в том, что эти выходы обычно заперты, а ключи хранятся у вахтера, располагающегося у главного выхода из здания. Имитационное моделирование коллективного движения паникующей толпы показало, что реализация этого плана на практике невозможна, и покинуть помещение через запасные выходы толпа не сможет. Так как все окна в аудиториях защищены решеткой от несанкционированного взлома, то покинуть помещение этим путем также невозможно.

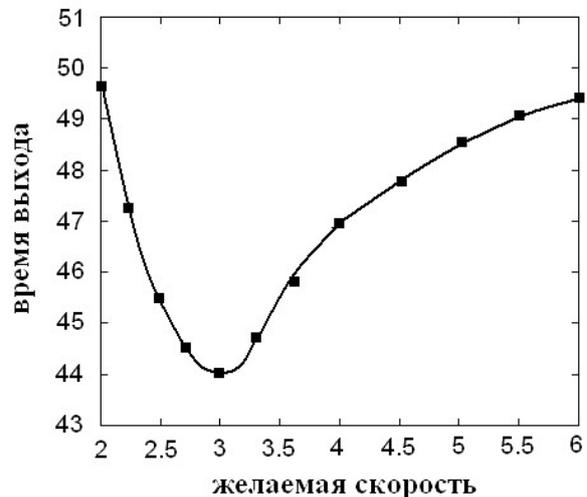


Рис. 7. График зависимости суммарного времени эвакуации всех людей из помещения от значения желаемой скорости

До проведения численного эксперимента основной проблемой этого помещения интуитивно виделось наличие зигзагообразного прохода из главного холла на улицу. Кроме того, это усугублялось наличием на выходе пропускного устройства карусельного типа («вертушки»). Подчеркнем, что это представление сформировалось у нас интуитивно, в процессе осмотра помещения и во время конструирования его виртуального аналога. Какие же места действительно оказались опасными для паникующих людей, было продемонстрировано в результате численного эксперимента. Расчеты были проведены для значения желаемой скорости $U \approx 8$ м/с, которое можно рассматривать как высокие значения уровня паники (см. рис. 7). Результат моделирования представлен на рисунке 8 в виде нескольких последовательных кадров анимации. Как видно из рисунка, моделирование четко выявляет наиболее проблемные места этого помещения — концы длинных коридоров правого и левого крыла этажа, ведущие к центральному холлу (отмечены красными кружками). Именно здесь происходит наиболее сильная давка, и резко увеличивается вероятность гибели от сжатия или пожара из-за невозможности покинуть помещение. Расчет давления, возникающего между индивидами в толпе, показывает, что оно здесь превышает средние значения прочности человеческого организма.

Любопытно уяснить, почему же не стало опасным место, которое поначалу интуитивно казалось таковым. Из кадров анимации легко заметить, что давки у «вертушки» на выходе из здания не происходит. Люди застревают на выходе из коридоров и, вырываясь из толпы по одному, свободно пересекают «вертушку» один за другим. Особенно это заметно у выхода в холл из левого крыла здания — в дополнении к эффекту забутыливания выхода за счет образования арок, людям здесь мешает торговый киоск, закрывающий выход почти наполовину (отмечен на рисунке 8 серой штриховкой).

На основании численного моделирования по отношению к тестируемому помещению можно сделать три важных вывода. Первое: из-за решеток на окнах и существования одного-единственного выхода из большого здания, в котором одновременно днем может находиться сотни людей, здание вполне может оказаться большой мышеловкой для этих людей. Второе: тот факт, что реально опасными оказались места, интуитивно воспринимаемые как безопасные, только усугубляют панику и давку. Третий вывод: реально существующий план эвакуации не способен предотвратить давку в случае паники. На рисунке 8 хорошо видно, что при возникновении паники вахтер в принципе не имеет возможности открыть запасные выходы, расположенные в дальних концах коридоров, так как сам вход в эти коридоры будет заблокирован паникующей толпой. Решение проблемы видится в сносе киосков, стоящих на выходе из коридоров и расширении самих выходов из коридоров. Численные эксперименты в таком слегка измененном ландшафте резко снижают риск возникновения арок из людей, блокирующих выход. Кроме того, с точки зрения безопасности лучше всего организовать хранение ключей от запасных выходов рядом с самими выходами. Таким образом, моделирование позволяет сделать важные выводы, каким образом сделать здание ПГПУ более безопасным.

В заключение отметим, что численное моделирование эвакуации из всего четырехэтажного здания четвертого корпуса ПГПУ также проводилось. Расчет для каждого этажа производился отдельно, а связь между этажами осуществлялась за счет обмена потоками людей через лестницы (сшивание полей расчета).

Численное моделирование событий в ночном клубе «Хромая лошадь»

В качестве примера имитационного моделирования динамики толпы в неодносвязном помещении приведем расчет для ночного клуба «Хромая лошадь», план которого схематично показан на рисунке 3. Этот пример интересен тем, что результаты моделирования можно сравнить с реальными событиями, произошедшими в этом клубе 5 декабря 2009 года [Wikipedia: пожар в клубе «Хромая лошадь»].

Клуб располагался в полуподвальном помещении, все окна которого были заложены кирпичем. Наружу из помещения вели два выхода, один из которых был главным (отмечен на рисунке 3), а другой был известен только узкому кругу персонала заведения. Поэтому для нашей

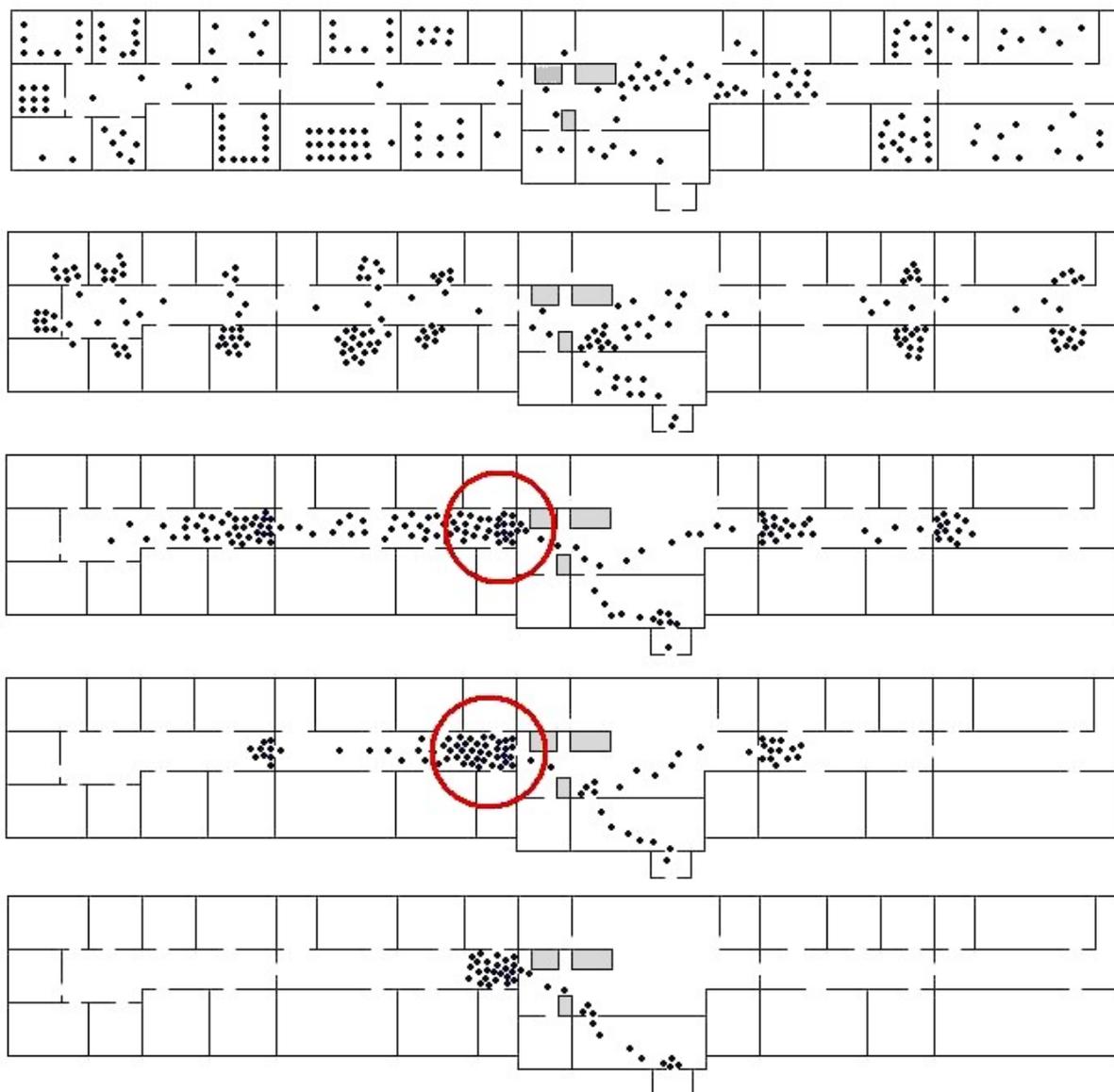


Рис. 8. Моделирование процесса выхода паникующих людей из четвертого корпуса ПГГПУ. Представленные кадры анимации показывают коллективную динамику толпы в последовательные моменты времени. Места появления в толпе критического давления и гибели людей отмечены окружностями

модели наличие черного выхода несущественно, и он в модели не учитывается. Общая площадь помещения составляла 670 м^2 . Габариты помещения составляли 34 м в длину и 21 м в глубину. Детальный план клуба с указанием координат всех узловых точек в двумерной декартовой системе координат приведен на рисунке 9. Главный и единственный известный для публики вход в помещение имел ширину приблизительно 1 м. Это связано с тем, что в этом месте располагалась охрана и осуществлялась проверка посетителей клуба. Пройдя проверку, посетитель попадал в узкое проходное помещение с гардеробом (комнаты № 10 и № 11 на рис. 9). После гардероба посетитель мог войти в общий зал клуба. Хотя сам проход здесь достаточно широкий, порядка 2 м, в момент наступления паники и до самого конца трагических событий одна створка дверей была закрыта. Поэтому в своих расчетах мы использовали для прохода значение 1 м. В центре зала находились две широкие барные стойки (закрашены на рис. 9), которые делали

помещение неодносвязным по своей структуре. В зале имелись две private комнаты (№ 1 и №8). Сцена располагалась в дальней части комнаты №5. Помещение зала было формально разбито на отдельные домены №№ 2–7 и № 9. Границы между доменами приведены на рисунке 3 (справа). Такое разбиение не является единственным. Однако, эксперименты с различными разбиениями пространства показали, что конечный результат моделирования от этого сильно не меняется. Особенно, если производить процедуру усреднения по численным реализациям.

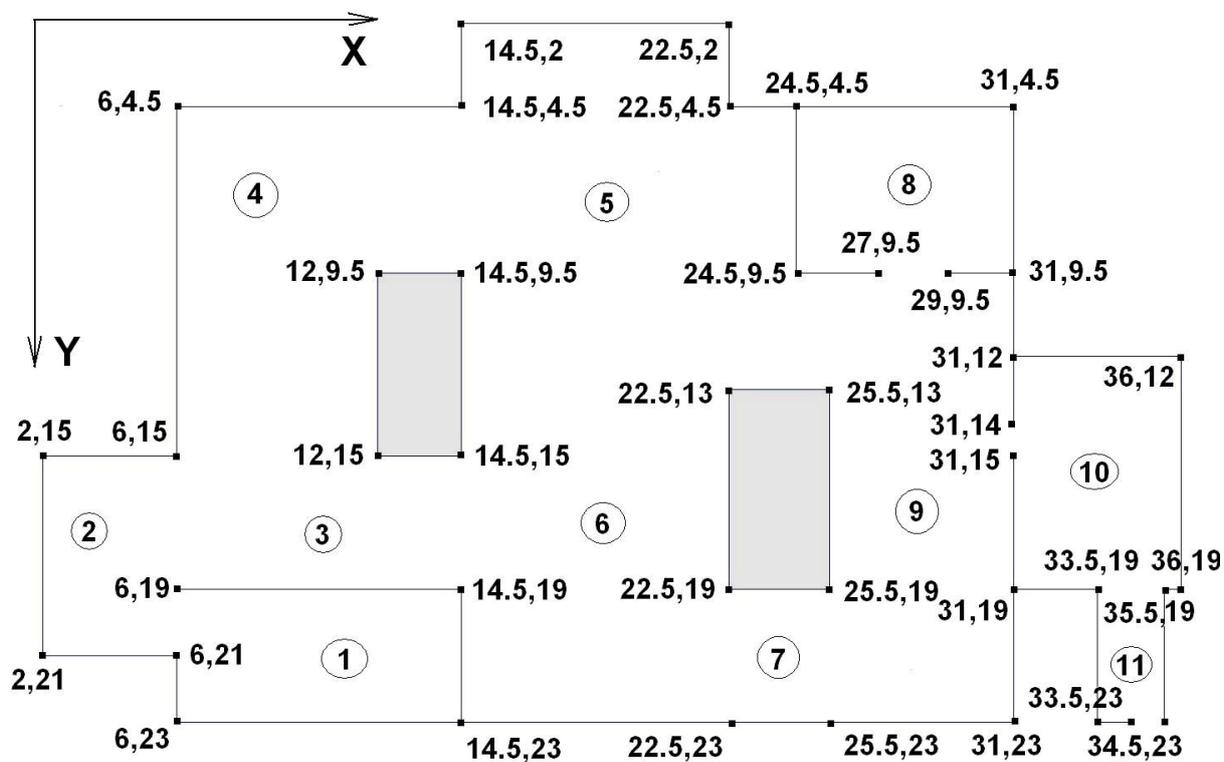


Рис. 9. Детальный план помещения ночного клуба «Хромая лошадь» в плоской системе координат X, Y . Цифры дают значения координат узловых точек помещения в метрах. Кружками обведены номера комнат

Изложим кратко хронологию событий 5 декабря 2009 года [Wikipedia: пожар в клубе «Хромая лошадь»]. Несмотря на то, что стандартная вместимость клуба позволяет находиться в нем одновременно только 50 посетителям, в этот день в помещении находилось 283 человека (143 мужчины и 140 женщин). Учитывая, что руководство и персонал заведения покинули помещение клуба через черный ход, в своих расчетах мы использовали 250 индивидов, предполагая, что количество мужчин и женщин было одинаковым. В результате неосторожного применения пиротехники в 01:08 по местному времени в клубе начался пожар. По счастливой случайности в зале находился оператор, который снимал все дальнейшие события, не выключая камеру до самого выхода из клуба. Это дает возможность установить хронологию событий с точностью до секунд. Как показывает изучение видеоматериалов трагедии, пожар возник над сценой вблизи перегородки между комнатами № 5 и № 7 на рисунке 9. Всего с начала появления первой искры, зафиксированного на видео, до обрушения потолка и гибели людей прошло 3 минуты и 22 секунды. Такой небольшой промежуток времени объясняется быстрым распространением материала по потолку, который был выложен высокогорючим материалом. Кроме того, печальную роль сыграл выход руководства клуба через черный выход, который привел к возникновению сильной тяги воздуха вдоль потолка и резкому усилению пожара.

На видео видно, что поначалу на огонь никто не обратил внимания. Только по истечении двух минут, когда уже огонь под потолком было невозможно игнорировать, ведущий программы обратил внимание на пожар под потолком и предложил всем посетителям покинуть клуб. Это стало началом эвакуации посетителей из помещения. Начиная с этого момента, у людей оставалось всего около 100 секунд, чтобы покинуть здание. Эту цифру мы и будем использовать при анализе своих расчетов. По истечении этого времени с потолка начал литься расплавленный пластик, вызывая множественные тяжелые ожоги, а фенолосодержащие продукты горения в воздухе приводили к поражению мозга и быстрой потере чувств. По свидетельству очевидцев самостоятельно покинуть помещение удалось лишь примерно 70–80 посетителям. Из этого следует, что по истечении 100 секунд с момента объявления эвакуации в помещении оставалось порядка 180 человек. Часть из них была вытащена из зала добровольцами и подоспевшими пожарными. По официальным данным в результате пожара погибло 156 человек, а 78 получили ранения той или иной степени тяжести. Непосредственно в ходе пожара и сразу после него, в результате ожогов, отравления высокотоксичным дымом и давки погибли 111 человек. В последующие дни в больницах умерло еще 45 человек. Очевидцы утверждают, что основная масса погибших лежала плотной массой у выхода из зала (комната № 9 на рис. 9). Выбравшиеся так или иначе из главного зала люди покидали клуб, так как ситуация в районе гардероба (комната 10 на рис. 9) не была такой напряженной, как в зале.

Рассмотрим одну численную реализацию коллективной динамики толпы в клубе «Хромая лошадь» (рис. 10). Расчеты проводились со значением желаемой скорости $U = 8$ м/с. В начальный момент распределение людей ($N = 250$) в помещении клуба соответствует известному из источников расположению столиков (рис. 10, $t = 0$). Сами по себе столы и стулья при моделировании не задавались и как препятствия не учитывались. После начала эвакуации люди направляются к выходу из клуба (рис.10, $t = 5$). В этот момент выход еще достаточно свободен и эвакуация людей происходит равномерно. Через некоторое время около выхода в гардероб

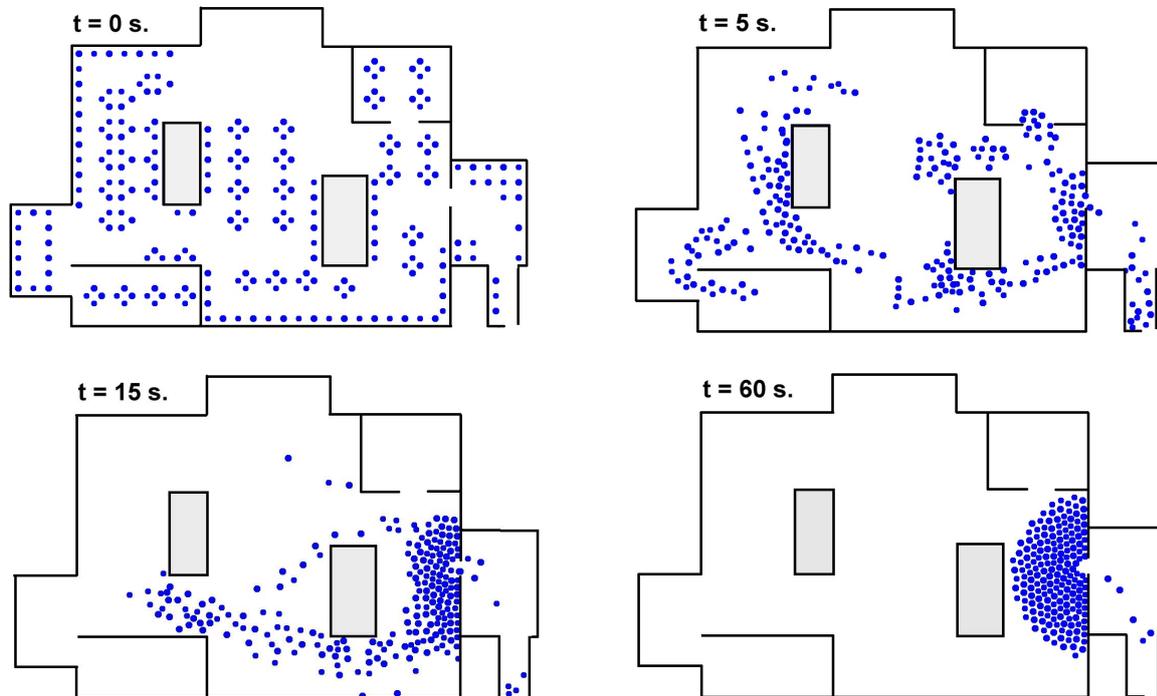


Рис. 10. Моделирование процесса выхода паникующих людей из ночного клуба «Хромая лошадь». Представленные кадры анимации показывают коллективную динамику толпы в последовательные моменты времени.

образуется арка из людей, и он блокируется толпой. Система переходит к нестационарному типу движения потока людей. Время от времени арка обрушивается, и очередная небольшая порция людей выходит из клуба (рис. 10, $t = 60$). После момента времени $t = 100$ всех людей, оставшихся в зале клуба, можно считать погибшими.

На рисунке 11 представлен график зависимости количества вышедших из помещения клуба индивидов от времени. Хорошо видно, что график делится на две части, каждая из которых может быть аппроксимирована прямой. Пересечение прямых указывает на важный момент времени (примерно 13-ая секунда эволюции системы), после которого изменяется сценарий эвакуации людей. Этот излом кривой, условно говоря, можно назвать началом паники. Из графика видно, что именно паника является главной причиной гибели массы людей. Если экстраполировать прямую, аппроксимирующую первоначальный участок кривой, то оказывается, что через 100 секунд помещение могло покинуть порядка 250 человек! Тем не менее, в момент времени $t \approx 13$ система переходит к другому динамическому режиму, при котором через 100 секунд помещение покидает всего 80 человек, что хорошо согласуется с хроникой реальных событий в «Хромой лошади».

Любопытно, что моделирование воспроизвело еще один эффект, который наблюдался на практике. По статистике из 156 погибших 92 человека составляют женщины и 64 — мужчины [Список погибших в клубе «Хромая лошадь»]. Таким образом, женщины составляют примерно 59 % погибших. Случайно этот или нет? Численное моделирование дает ответ на этот вопрос. Среди оставшихся после 100 секунд эволюции системы в помещении клуба индивидов численное моделирование в разных реализациях устойчиво дает от 55 % до 60 % женщин. При этом первоначальное распределение мужчин и женщин по залу каждый раз было равномерным (рис. 10, $t = 0$). Объяснить этот эффект можно следующим образом. Как было указано выше, в расчетах вес женщин задавался с помощью нормального распределения с наиболее вероятным значением 60 кг. У мужчин этот же показатель равнялся 80 кг. С механической точки зрения тела мужчин более инертны и при столкновениях у них было больше шансов сохранить направление движения на выход, не теряя драгоценное время. В среднем это давало мужчинам чуть больше шансов на спасение, чем женщинам.

Стоит отметить, что приведенные на рисунке 11 результаты представляют лишь одну численную реализацию процесса, который по своей природе является стохастическим. Поэтому для получения более точных результатов необходимо проводить серию численных экспериментов и усреднять их. Такая работа была проделана, но результаты здесь не приводятся, так как усредненный график не дает ничего нового в сравнении с данными на рисунке 11.

Отметим следующее важное обстоятельство. Из общих соображений понятно, что разработка универсально работающей схемы для любых помещений и условий эвакуации невозможна в принципе. Например, при моделировании эвакуации людей из «Хромой лошади», мы исходили из того факта, что свет в помещении погас почти сразу после начала движения. Поэтому люди делали выбор направления своего движения не на основе визуальной оценки плотности толпы в том или ином направлении, а на основании своего ощущения близости к ним того или иного варианта выхода из комнаты. В свою очередь это ощущение складывалось на основании той схемы помещения, которая запечатлелась в памяти у каждого индивида (мы предполагали, что общее представление о помещении априори было у каждого индивида).

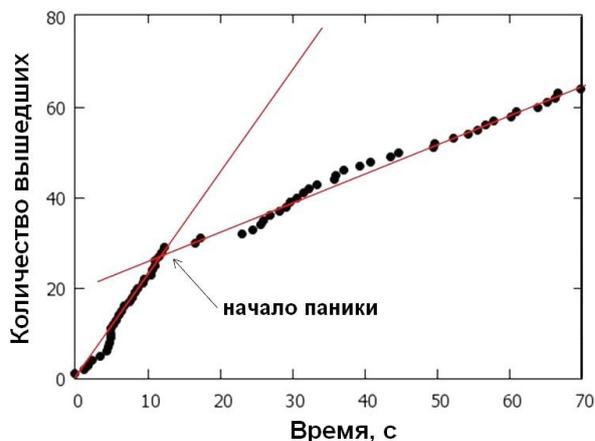


Рис. 11. График зависимости количества вышедших из клуба индивидов от времени

В этом случае для расчетов более подходит формула (8) или ее вариации. Понятно, что при других обстоятельствах мог реализоваться и другой сценарий. При полном освещении индивиды оценивали бы свое поведение скорее на основании визуальной информации, чем на основе картинок из памяти. Из этого следует важный вывод: с точки зрения изучения безопасности исследуемого помещения в программе конечного пользователя необходимо предусмотреть основные сценарии паники, которые могут реализоваться на практике. Для этого в модель был заложен параметр задымленности помещения, который позволяет варьировать объем информации, поступающий к участникам движения во время паники. При компьютерном тестировании помещения необходимо изучать динамику толпы отдельно для каждого сценария. Тем не менее, каждый из этих сценариев должен быть откалиброван отдельно. Трагедия в «Хромой лошади» позволяет это сделать, по крайней мере, для случая эвакуации людей в полной темноте.

В целом, можно заключить, что параметры модели были откалиброваны достаточно хорошо, и численный эксперимент дает результаты, на удивление хорошо совпадающие с эмпирическими данными. Имитационное моделирование позволяет посмотреть любые возможные варианты развития событий. Например, нами был проведен численный эксперимент с шириной выхода из зала равным 2 м. Как оказалось, в этом случае система вообще не переходит к нестационарному движению потока людей. Проход в этом случае настолько широк, что арки из людей не образуются и масса людей выходит из помещения непрерывным потоком. В результате по истечении 100 секунд помещение покидает порядка 220 человек. Если бы кто-то из посетителей или персонала клуба в момент эвакуации догадался открыть вторую створку двери на выходе из зала, то практически все посетители клуба были бы спасены.

Заключение

В работе изложен метод моделирования динамики толпы, паникующей в замкнутом пространстве сложно разветвленного помещения. Кроме очевидного фундаментального значения такого численного моделирования, связанного с изучением форм самоорганизации в сложных системах, работа имеет и важное прикладное значение. В настоящее время при проектировании зданий и внутренних помещений для оценки их потенциальной опасности для людей в случае чрезвычайной ситуации используются полуэмпирические формулы, которые дают лишь смутную и не всегда верную информацию о предмете. С другой стороны, практическая проверка этих опасностей затруднена, потому что эффект толпы проявляет себя только в случае настоящего паникующих людей. Заставить людей имитировать панику, по-видимому, невозможно. Создавать же в экспериментальных целях настоящую ситуацию ужаса и паники, подвергая людей опасности увечья, является не этичным. Именно поэтому в данной ситуации численное моделирование является единственным инструментом, помогающим протестировать помещение на безопасность. Как было показано на примере моделирования эвакуации из здания ППУ, интуитивные представления не всегда помогают оценить реальные опасности. С другой стороны, если бы контролирующие пожарную безопасность службы, вооруженные нашей программой, посетили клуб «Хромая лошадь» до трагических событий, то все потенциальные опасности этого помещения были бы выявлены заранее. Более 150 человеческих жизней в этом случае было бы сохранено. Кроме того, программа конечного пользователя для моделирования паники, по нашему мнению, могла бы внести объективный элемент в проведение экспертизы помещений и исключить злоупотребления служебным положением.

Список литературы

- Андреева Г. М. Социальная психология: учебник для высшей школы. — М.: Аспект-Пресс, 1999. — 375 с.
- Антуков А. М., Брацун Д.А. Моделирование групповой динамики толпы, паникующей в ограниченном пространстве // Вестник Пермского университета. Механика. — 2009. — Вып. 3. — С. 18–23.

- ИВС, IT-компания*; официальный сайт: <http://www.ics.perm.ru>
- Кирик Е. С., Юргельян Т. Б., Круглов Д. В.* О дискретной модели движения людей с элементом анализа окружающей обстановки // Журнал СФУ, Серия «Математика и физика». — 2008. — Т. 1, № 3. — С. 266–276.
- Могилев А. В., Пак Н. И., Хеннер Е. К.* Информатика: учеб. пособие для вузов. — М.: Академия, 2009. — 841 с.
- Предтеченский В. М., Милинский А. И.* Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков: учебник для вузов. — М.: Стройиздат, 1979. — 375 с.
- Список погибших в клубе «Хромая лошадь»*: <http://permloshad.narod.ru>
- Antonini G., Bierlaire M., Weber M.* Discrete choice models of pedestrian walking behavior // Trans. Res. Part B. — 2006. — Vol. 40. — P. 667–687.
- Boston Dynamics*: официальный сайт коммерческого симулятора Di-Guy, имитирующего поведение больших масс людей: <http://www.diguy.com/diguy>.
- Bratsun D. A., Dubova I. Yu., Krylova M. V., Lyushnin A. V.* Computational modeling of collective behavior of panicked crowd escaping multi-floor branched building // Abstracts of European Conference on Complex Systems. Brussels, Belgium, 3–7 September 2012.
- Helbing D., Molnar P.* Social force model for pedestrian dynamics // Phys. Rev. E. — 1995. — Vol. 51. — P. 4282–4286.
- Helbing D., Farkas I. and Vicsek T.* Simulating dynamical features of escape panic. // Nature. — 2000. — Vol. 407. — P. 487–490.
- Henderson L. F.* The statistics of crowd fluids // Nature. — 1971. — Vol. 229. — P. 381–383.
- Hoogendoorn S.* Pedestrian flow modeling by adaptive control // Transp. Res. Rec.—, 2004. — Vol. 1878. — P. 95–103.
- Huang H. J., Guo R. Y.* Static floor field and exit choice for pedestrian evacuation in rooms with internal obstacles and multiple exits // Phys. Rev. E. — 2008. — Vol. 78. — P. 021131–021137.
- Kelley H. H., Condry J., Dahlke A. and Hill A. H.* Collective behavior in a simulated panic situation // J. Exp. Social Psychol. — 1965. — Vol. 1. — P. 20–54.
- Mintz A.* Non-adaptive group behaviour // J. Abnormal Normal Social Psychol. — 1951. — Vol. 46 — P. 150–159.
- Moussaida M., Helbing D., Theraulaz G.* How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters // PNAS. — 2011. — Vol. 108. — P. 6884–6892.
- Xu Y., Huang H. J., Yong G.* Modified Static Floor Field and Exit Choice for Pedestrian Evacuation // Chin. Phys. Lett. — 2012. — Vol. 29. — 080502.
- Yu W., Johansson A.* Modeling crowd turbulence by many-particle simulations // Phys. Rev. — 2008. — Vol. 76. — P. 46105–46116.
- Wikipedia*: http://ru.wikipedia.org/wiki/Пожар_в_клубе_«Хромая_лошадь»