

## Моделирование движения толпы событийными средствами

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Рассмотрен один из вариантов толпы, которая собирается по поводу заранее объявленного события. Такая толпа может в некоторых случаях стать панической. Ее математическое моделирование сопровождается расчетом полей предпочтительных направлений. Стандартным является построение силового поля типа кулоновского. Предложено предварительное построение поля течения двумерного одноатомного газа на основе законов газодинамики. В качестве приложения рассмотрены процесс покидания зрителями трибун спортивного сооружения, прохождение толпы по узкому тракту с резкими поворотами, перемещение по такому тракту организованных колонн. Предложен критерий тесноты как количество соударений модельных объектов.

**Ключевые слова:** агент, твердые диски, событийное моделирование, предпочтительные направления, толпа.

### Введение

Понятие толпы известно с древних времен. Биант, один из «семи древних мудрецов», утверждал, что «худших везде большинство». Другой из них, Солон (VI век до н.э.), отмечал, что «каждый афинянин – хитрая лисица, а народное собрание – стадо баранов» [1]. В данной работе рассмотрен один из вариантов толпы – конвенциональная толпа, которая собирается по поводу заранее объявленного события (convention, условность). В некоторых случаях она может обрести нежелательную форму панической (panic; saving).

К настоящему времени существует и постоянно пополняется большой список работ по данной теме. Основная часть научной литературы посвящена психологическим аспектам. Важным приложением результатов моделирования поведения толпы является разработка способов предупреждения негативных последствий чрезвычайных ситуаций в местах скопления людей [2]. Ввиду актуальности вопроса возникновения, превращений толпы и способов управления ею появилось много источников, рассматривающих математическое моделирование поведения толпы как синергетического объекта [3]. Например, в работе [4] приведены результаты моделирования движения толпы в виде коллектива агентов – модельных частиц, подчиняющихся законам движения в некотором силовом поле. В работе [5] описан процесс прохождения потока пассажиров в метрополитене, причем роль внешнего поля сводится к выделению «поля предпочтительных направлений» для коллектива твердых дисков. В работе [6] рассмотрено применение метода молекулярной динамики к исследованию известного случая трагедии в ночном клубе «Хромая лошадь» (Пермь, 2009 г.).

Стандартный подход в процессе моделирования толпы (а также стада) заключается в представлении составляющих ее объектов в виде материальных точек, дополненных некоторой пространственной структурой и перемещающихся в силовом поле. Простейшим способом задания такого поля является предварительное расположение точечных зарядов в рабочей области с последующим вычислением потенциала в каждой точке области. Придавая модельным частицам тот или иной заряд, путем решения уравнений движения коллектива модельных объектов мож-

но получить траектории их перемещения и оценить статистические параметры типа силы давления, скорости перемещения и т.п.

### **1 Поле предпочтительных направлений, как результат статистической обработки течения газа твердых дисков**

Метод событийного моделирования достаточно подробно изложен в работах [7, 8]. Его составные части таковы:

1. Каждая модельная частица обладает собственными координатами, скоростью и локальным временем.

2. Событием для каждого объекта является столкновение с другим объектом либо с границами подсистемы, в которой он находится. Среди всех возможных событий выбирается то, для которого момент времени его наступления является наименьшим.

3. В целом развитие системы рассматривается как последовательность ближайших по времени событий. Для модельной частицы, участвующей в событии, вычисляется новая скорость и момент наступления следующего события.

4. Центральным пунктом алгоритма является построение динамической очереди событий.

Эффективность описанного подхода обеспечивается благодаря следующему:

а) для обработки текущего события перемещается только одна модельная частица (или пара в случае их столкновения), а не все;

б) поиск следующего события имеет алгоритмическую сложность  $O(1)$  вследствие декомпозиции;

в) вставка в динамическую очередь имеет сложность  $O(\log_2 n)$ , если используется хип.

Событийный подход оказался весьма эффективным средством моделирования коллективов сравнительно простых объектов типа газа [8], нанотрубок, фуллеренов [9, 10]. С его помощью изучено также поведение больших групп живых существ [11] и процесс распространения инфекций [12].

Выбор расположения источников заряда для создания силового поля, как правило, связан со значительными трудностями для случая сложной области перемещения модельных частиц.

В данной работе предложено построение векторного поля скоростей течения одноатомного двумерного газа как основы для создания поля предпочтительных направлений [8]. На рис. 1,а показан демонстрационный пример рабочей области для решения задачи перемещения в лабиринте. Область разбита на подсистемы вида квадратных ячеек в количестве  $n_x \times n_y = 50 \times 50$ . В рабочей области расположены перегородки, реализованные как наборы неподвижных твердых дисков. В левом нижнем углу находится сток в количестве восьми ячеек; модельные частицы появляются в ячейке-источнике в правом верхнем углу с заданным интервалом времени между извлечениями из стека. В среднем в рабочей области приведенного примера перемещаются  $n \approx 2000$  модельных частиц. За счет повышения плотности в правом верхнем углу возникает и устанавливается поле течения газа модельных упругих дисков, автоматически согласованное с «поиском выхода» из лабиринта. По прошествии каждой серии событий-столкновений в количестве  $2n$  проводится обзор всех ячеек с наращиванием поля скоростей для каждой ячейки путем прибавления скоростей находящихся в ячейке модельных частиц. В сред-

нем картина для нормированных скоростей  $\vec{V}_{i,j}, i = 1...n_x, j = 1...n_y$  суммарного поля имеет вид, показанный на рис.1,б. После построения поля предпочтительных направлений упругим диском, моделирующим толпу агентов, придается как объектам свойство учета нормированных векторов интегральных скоростей в каждой ячейке сетки (рис.1,в).

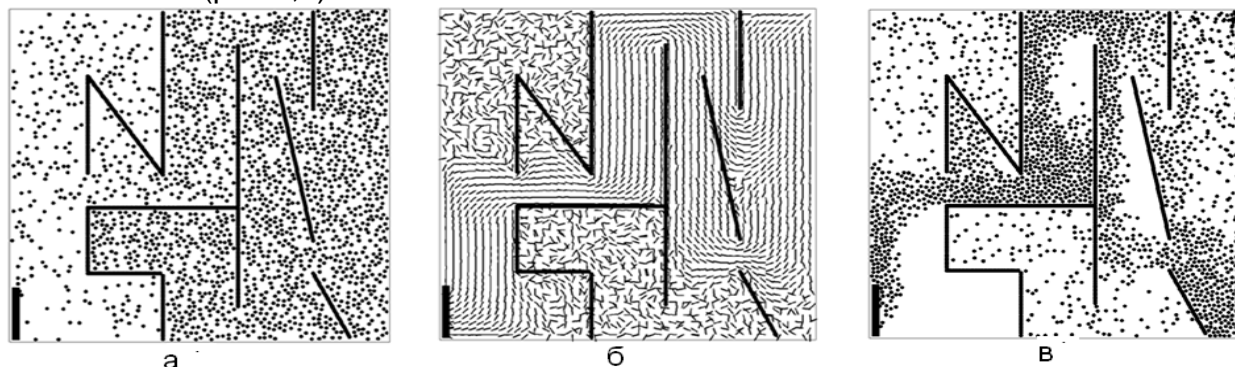


Рис. 1. Демонстрационный пример движения по лабиринту:  
 а - установившееся течение газа упругих дисков;  
 б - поле нормированных скоростей в ячейках;  
 в - прохождение толпы по лабиринту

Для этого при преодолении границы ячейки с последующим переходом в новую ячейку с мультииндексом  $(i, j)$  скорость каждой частицы как объекта преобразуется по следующему методу:

$$\vec{v} \leftarrow \vec{v} + \vec{V}_{i,j}; \text{ если } v > I, \text{ то } \vec{v} \leftarrow \vec{v} / v. \quad (1)$$

## 2 Характерные параметры элементов конвенциональной толпы

Для соблюдения отсутствия травматизма в толпе, задаваемой как совместное перемещение большого количества субъектов (агентов), объединенных общей целью достижения области выхода, однако хаотически взаимодействующих локально с другими объектами, требуется путем выбора расположения препятствий снизить степень давления (давки) до приемлемого уровня. В данной работе в качестве усредненного показателя давления использовано количество столкновений каждой отдельной модельной частицы с соседними.

Рассмотрим процесс покидания зрителями одного участка трибун стадиона, схематически показанного на рис. 2. Выход находится в левом нижнем углу в виде восьми ячеек. Этап построения поля скоростей в данном случае выполняется так: при попадании в ячейку выхода свободная модельная частица перемещается в произвольно выбранную точку между рядами скамеек и продолжает свободное движение. Тем самым реализуется установление потока газа упругих дисков и поиск поля предпочтительных направлений. На основном этапе моделирования собственно движения толпы скорости преобразуются по формулам (1), а при попадании в ячейки выхода модельные частицы переходят в стек. В зависимости от количества столкновений модельные частицы при графическом отображении приобретают ту или иную степень заполненности.

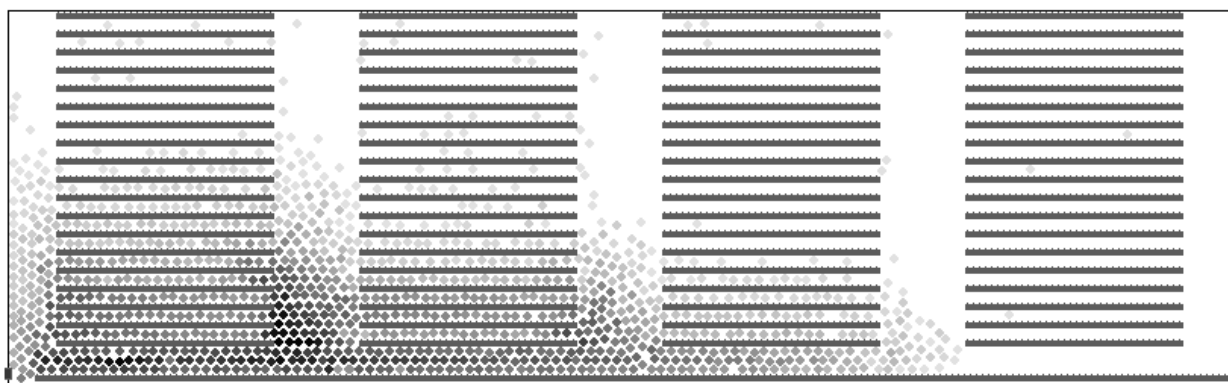


Рис. 2. Моделирование состояния, близкого к запираению тракта. Ширина прохода на выходе – 1 метр, начальное количество зрителей – 1 500 человек

Черный цвет означает, что количество столкновений с соседями – более сорока. Общие размеры рабочей области –  $n_x = 100$ ,  $n_y = 30$ . Время покидания трибун при заданных условиях приблизительно равно трем – четырем минутам, если считать скорость в одну модельную единицу соответствующей одному метру в секунду. Однако если по каким-либо причинам размеры выхода сужаются до одной ячейки, то происходит значительное возрастание сопротивления с повышением уровня давки и увеличением времени для выхода.

### 3 Удлиненный узкий тракт с резкими изгибами

В данном случае процесс построения поля предпочтительных направлений оказывается затрудненным ввиду существенного увеличения времени организации свободного истечения газа модельных упругих дисков. Рассмотрена стратегия «все побежали – и я побежал», как средство ускорения расчетов. Это значит, что построение поля течения совмещено с передвижением модельных частиц в текущем возникающем поле скоростей. Поскольку свобода выбора направления для передовых частиц в данном случае невелика (тракт имеет малую ширину), то поле строится достаточно эффективно и с высокой скоростью расчетов.

На рис. 3,а,б изображены фазы процесса построения поля скоростей и получение поля предпочтительных направлений для 5500 модельных упругих дисков. Использование полученного поля для моделирования перемещения включений по тракту канала показано на рис. 3,в.

Включения представлены в виде слоёв модельных дисков, допускающих внутреннее отражения с соседними дисками и внешние отражения между соседями второго порядка [9, 10]. Головной слой состоит из модельных частиц, обладающих свойством реагирования на поле предпочтительных направлений по формулам (1), что может быть интерпретировано как «интеллектуальность» агента, представляющего включение. Этот слой (думающая часть колонны, коллектива, стаи) ответственен за перемещение включения в целом. В зависимости от соотношения между радиусами взаимодействия соседних модельных дисков и соседями второго порядка включение может обладать той или иной степенью гибкости.

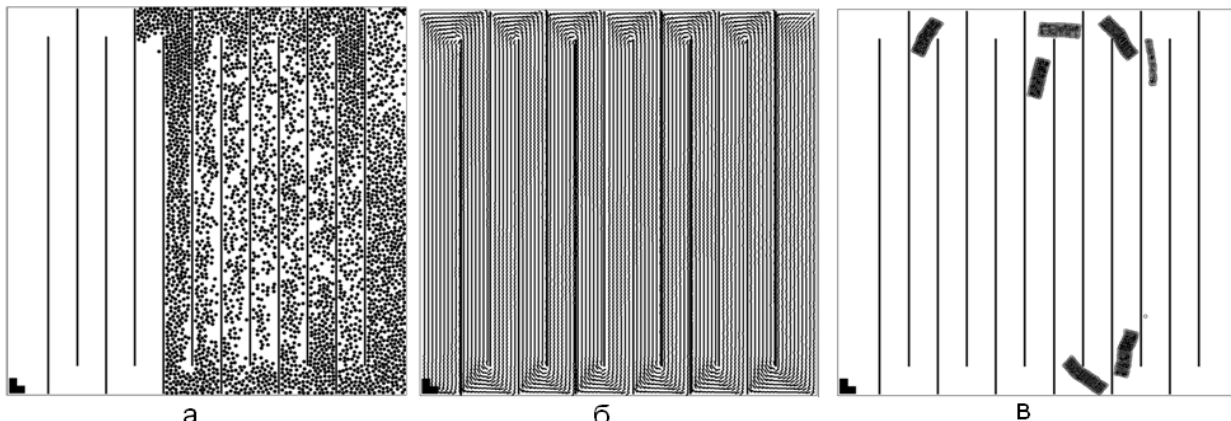


Рис. 3. Поле предпочтительных направлений в удлиненном узком тракте с резкими изгибами и вариант использования

Варьированием указанным соотношением можно моделировать как жесткие структуры, так и колонны подразделений, способных огибать препятствия, не нарушая строя. На рис. 4 показан простейший вид включений с «разумной» частью.

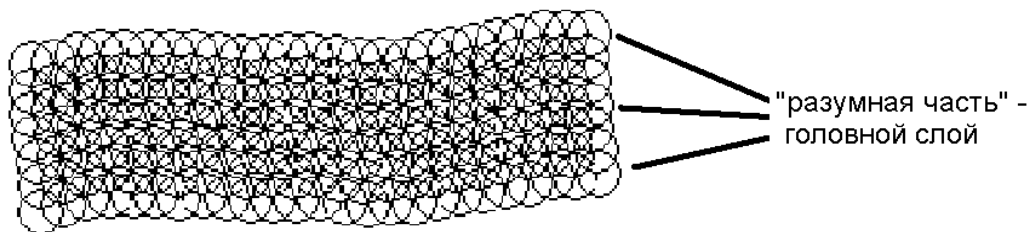


Рис. 4. Простейший вид включений, содержащих «разумную» часть агента

Описанная стратегия неприменима в случае предоставления большой свободы выбора для ведущих агентов, поскольку она приводит к неоправданным устойчивым вихрям в структуре потока (рис.5).



Рис. 5. Возникновение паразитических вихрей.  
Влет – в правом верхнем углу, вылет – в левом нижнем.  
Препятствие – сплошная линия

Иными словами, перед тем, как определить ведущее направление, следует осмотреться, т.е. выполнить первый этап – предоставить свободным модельным частицам вести себя, как свободный газ, в целях создания поля предпочтитель-

ных направлений. Бросаться «вперед», не видя цели (области выхода) и увлекая за собой ведомые массы, которые также индуцируют и закрепляют выбранное поле скоростей, – это путь к возможным грубым ошибкам. Хаотическое же движение свободных частиц служит организации движения в правильном направлении. Хаос, таким образом, может быть использован для установления порядка.

### Заключение

Составной частью имитационного агентного моделирования поведения толпы является создание поля предпочтительных направлений. Помимо хорошо известного метода задания поля направлений как векторного поля типа кулоновского, существует возможность использования агентов простой структуры для построения предварительного поля течения. Второй частью является использование агентов той или иной заданной достаточно сложной структуры, учитывающих полученное поле течения в качестве поля предпочтительных направлений. Рассмотрены трудности применения в случае удлинённых каналов и метод их преодоления. Предложена конструкция агентов сложной структуры, включающей «разумную» часть и коллектив подчинённых особей. Тем самым возникает возможность моделирования движения колонн различной степени организованности по пути, намеченному заранее.

### Список литературы

1. Назаретян, А. П. Агрессивная толпа, паника, слухи. Лекции по социальной и политической психологии [Текст] / А. П. Назаретян. – СПб: Питер, 2004. – 192 с.
2. Холщевников, В. В. Эвакуация и поведение людей при пожарах [Текст] / В. В. Холщевников, Д. А. Самошин. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – 212 с.
3. Пригожин, И. Р. Порядок из хаоса [Текст] / И. Р. Пригожин, И. Стенгерс. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
4. Waqar Baig M. Realistic Modeling of Agents in Crowd Simulations [Text] / M. Baig Waqar, E. Barakova, C. S. Regazzoni, M. Rauterberg // 2014 Fifth International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation. – P. 507-512.
5. Слепичева, М. А. Имитационное моделирование потока объектов с учетом поля предпочтительных направлений [Текст] / М. А. Слепичева, Ю. К. Чернышев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 33. – Х., 2006. – С. 83 – 88.
6. Аптуков, А. М. Моделирование поведения паникующей толпы в многоуровневом разветвленном помещении [Текст] / А. М. Аптуков, Д. А. Брацуна, А. В. Люшнин // Компьютерные исследования и моделирование: сб. науч. тр. Пермь: ГГ-ПУ. – Т. 5, – № 3 – 2013, – С. 491–508.
7. Чернышев, Ю. К. Событийное программирование. Применение к решению некоторых задач физики [Текст] / Ю. К. Чернышев. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т. им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2008. – 68 с.
8. Чернышев, Ю. К. Методы вычисления статистических параметров в событийном моделировании [Текст] / Ю. К. Чернышев. – Х.: Фактор, 2014. – 244 с.
9. Chernyshev, Y. Properties Modeling of Low-Dimensional Carbon Nanostructures [Text] / Y. Chernyshev, M. Slepicheva, A. Basteev, A. Bazyma, M. Ugryumov // Mat. Research Soc. Symp. Proceedings / Fundamentals of Low-Dimensional Carbon

Nanomaterials. 2011. – Nov. 29 - Dec., Massachusetts, USA. – Volume 1284. – 2011. – P. 149-154.

10. Chernyshev, Y. Event-driven simulation of join behavior of objects with complex form [Text] / Y. Chernyshev, O. Sokolov // Conference on Modeling and Simulation in International Prague / Prague – Chech. Tech. Univ. – 22-25 June 2010. PS34. – 7 p.

11. Слепичева, М. А. Событийное моделирование развития популяции *Rana Esculenta Complex* [Текст] / Е. И. Комиссарова, М. А. Слепичева // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Вып. 40. – Х., 2008. – С. 141 – 144.

12. Chernyshev, Y. Multiagent simulation of contact disease distribution based on event approach [Text] / Y. Chernyshev, O. Sokolov // Conference on Modeling and Simulation in International Prague / Prague – Chech. Tech. Univ. – 22-25 June 2010. PS32. – 4 p.

Поступила в редакцию 26.01.2015

### **Моделювання руху натовпу подійними засобами**

Розглянуто один із варіантів натовпу, що збирається з нагоди події, про яку наголошено заздалегідь. Такий натовп може в деяких випадках перетворитися в панічний. Його математичне моделювання супроводжується розрахунком полів бажаних напрямків. Стандартною є побудова силового поля типу кулонівського. Запропоновано початкову побудову поля течії двовимірного одноатомного газу з використанням законів газодинаміки. Як застосування розглянуто процес залишення глядачами трибун спортивної споруди, проходження натовпу по вузькому тракту з різкими поворотами, пересування по такому тракту організованих колон. Запропоновано критерій тісноти, як кількість взаємних поштовхів модельних об'єктів.

**Ключові слова:** агент, тверді диски, подійне моделювання, бажаний напрямок, натовп.

### **The motions of the crowd simulation with the help of event-driven method**

One of the variants of the crowd, which is going about pre-announced events, is considered. This crowd can sometimes become panicky. It is accompanied by mathematical modeling preferred directions fields. A force field of the Coulomb type is considered usually. In this paper, proposed to build a preliminary two-dimensional flow field of a monatomic gas, using the laws of dynamics. As an application we consider the process of leaving the audience bleachers sports facilities, the passage of the crowd along the narrow path with sharp turns, moving on such a path organized columns. The criterion of distress, as the number of collisions of model objects.

**Keywords:** agents, hard disks, event-driven simulation, preferable directions, crowd.