



УДК 656.072.6

ВОПРОСЫ ВЫБОРА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПОТОКОВ В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Н.Н. Майоров, к.т.н., доцент кафедры системного анализа и логистики ГУАП.

В.А. Романек, магистрант кафедры системного анализа и логистики ГУАП.

В статье приведены и проанализированы различные математические модели, описывающие поведение пассажирских потоков, а также обоснована необходимость и важность применения имитационного моделирования и места его применения.

Ключевые слова: моделирование; транспорт; пассажир; пешеходный поток.

Моделирование пешеходных потоков приобретает все большую актуальность в условиях растущего населения крупных городов и увеличения темпов строительства зданий. Изучение массовых перемещений людей, возникающих на улицах города во время праздничных мероприятий, в павильонах метро, в аэропортах и вокзалах, торговых и развлекательных центрах, спортивных сооружениях, становится крайне важным в связи с проблемами обеспечения безопасности, анализом возможных нештатных ситуаций и аварийных эвакуаций. [1]

Необходимость в создании пешеходных моделей появляется на различных этапах жизни объекта. Например, на стадии предварительной оценки для определения способности объекта в принципе справляться с планируемой нагрузкой и удовлетворять требования безопасности. Или на стадии проектирования нового объекта - для сравнения вариантов, быстрой оценки вносимых изменений и поиска наилучших решений. Также моделирование во время проведения строительных, ремонтных работ на работающем объекте позволит на ранних этапах оценить и скорректировать:

- пропускную способность и организацию очередей (в том числе при внештатном увеличении нагрузки);
- работу сервисов (количество персонала, часы работы);
- размещение указателей;
- расписания (например, самолетов или поездов);
- размещение рекламы, товаров и торговых точек;
- планирование эвакуации;
- уязвимости при террористических атаках и катастрофах.

Большим достоинством моделирования является наглядность всех процессов и возможность получения качественной и убедительной анимации, формирования статистики, тем самым облегчая процесс принятия решений. То есть, смоделировав человеческие потоки, перемещающиеся в рассматриваемой конструкции можно рассмотреть их поведение, как в обычных, так и в критических ситуациях, таким образом, дорабатывая объект и делая более безопасным ещё до строительства. [2]

Моделированию чаще всего подвергаются объекты, где организация физического пространства для пешеходов влияет на пропускную способность, качество обслуживания, безопасность. С точки зрения транспорта, такими объектами являются:



- ж/д станции, вокзалы;
- станции метро;
- аэропорты;
- парковки;
- пешеходные переходы.

Основные зоны тяготения людей:

- торговые центры;
- музеи;
- аттракционы;
- стадионы;
- концертные залы;
- уличные события (фестивали, митинги, шествия).

Производственные здания и сооружения:

- цех;
- склад;
- офис.

Имитационное моделирование состоит из двух больших этапов: создания модели и сбора, анализа полученных с помощью модели результатов. Структура модели отражает структуру реального объекта моделирования на некотором уровне абстракции, а связи между компонентами модели являются отражением реальных связей.[3]

На транспортных объектах входными параметрами для построения модели обычно являются:

- план терминала с пунктами контроля;
- расписание;
- распределение пассажиров (класс бизнес/экономический, рейс международный/внутренний);
- время прохождения пунктов контроля;
- поведение пассажиров в зале ожидания;
- политики управления очередями.

Тогда на выходе можно получить следующую информацию:

- время ожидания;
- длины очередей;
- загрузка пунктов контроля. [4]

Главной проблемой, возникающей при моделировании движения пешеходов, является сложность воссоздания правдоподобного поведения. С одной стороны они стремятся достичь конечной точки, стараясь не сталкиваться с другими пешеходами, но делать это можно, например, как прогулочным шагом, так и стремительным. В реальности не редко встречается абсолютно нелогичное поведение, например, внезапные остановки при оживленном движении или резкие развороты на месте. Однако, если рассмотреть перемещение пешехода более детально, то можно выделить три этапа его поведения:



1. Выбор и постановка цели. Это стратегический уровень, при котором формируются потребности.
2. Выбор места деятельности и построение маршрута. Это тактический уровень, при котором происходит связь целей и их очередность.
3. Исполнительная деятельность. Это операционный уровень. На данном этапе происходит движение и взаимодействие с другими частниками потока.

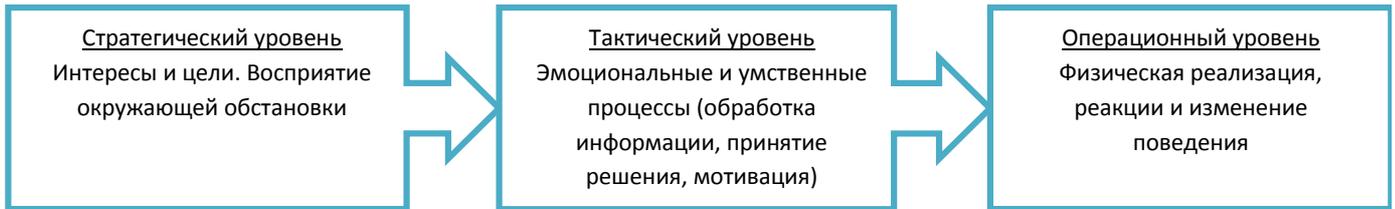


Рисунок 1 - Уровни поведения пассажиров

Среди существующих моделей пешеходных потоков можно выделить:

- Модель притягивающихся сил. Основана на законе Кулона:

$$F = \frac{k \cdot q_1 \cdot q_2}{r^3}$$

где F - сила магнитного поля;

k - константа;

q₁ - интенсивность магнитной нагрузки пешехода;

q₂ – интенсивность магнитного поля;

r – длина вектора от пассажира до магнитного поля.

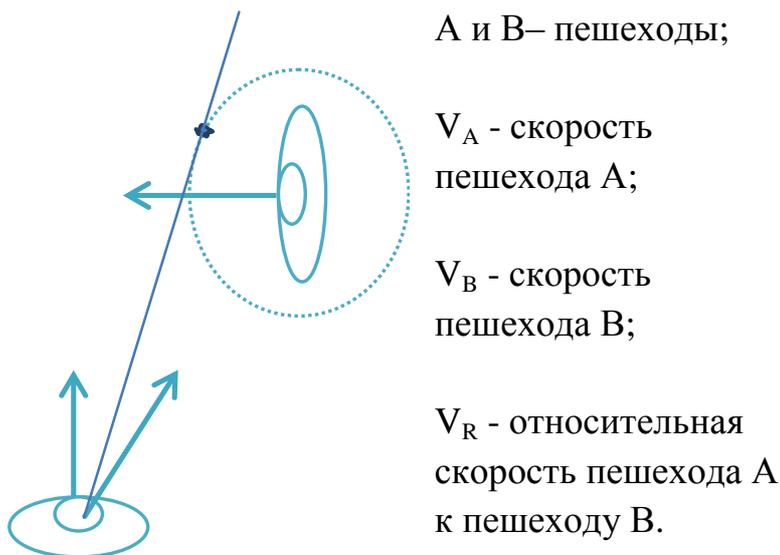


Рисунок 2 - Схема движения пассажиров



Пешеходы представлены в виде электрических зарядов, находящихся в магнитном поле. Пешеходы и препятствия представляются как положительные заряды, а цели движения как отрицательные заряды. [5]

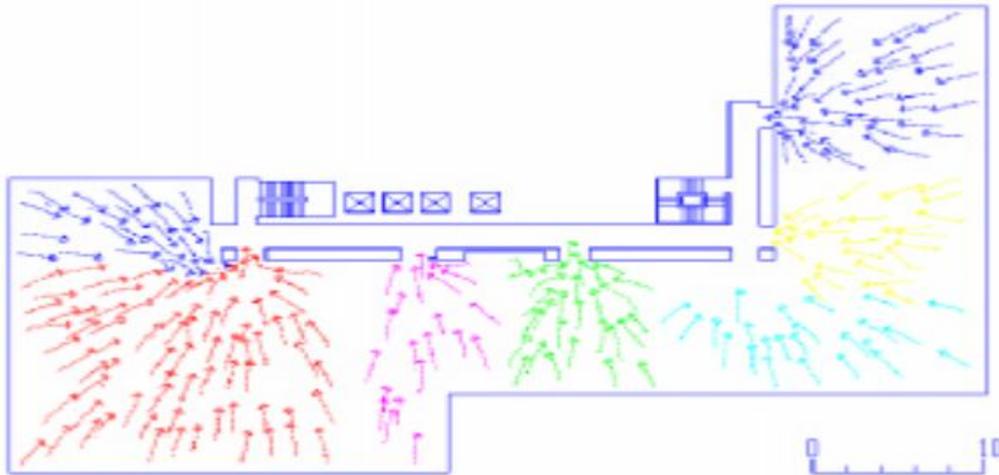


Рисунок 3 - Представление модели притягивающих сил

- Газокинетическая модель. Здесь пешеходы представляются как молекулы в сжиженном газе. Распределение молекул газа по координатам и скоростям описывается распределением Максвелла-Больцмана:

$$dn = const \cdot \exp\left(-\frac{m_r(V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)}{2kT}\right) \cdot dV_x dV_y dV_z \cdot \exp\left(-\frac{U(x, y, z)}{kT}\right) dx dy dz$$

где dn - число молекул, U - потенциальная энергия молекулы в точке с координатами x, y, z и проекциями скорости. Распределение Максвелла-Больцмана представляет собой произведение двух функций распределения: одна из них описывает распределения по координатам, а другая - по скоростям. [6]

Так как данная модель макроскопическая и детерминированная, то, как следствие, обладает низкой точностью, особенно при низкой плотности пешеходного потока.

- Модели, использующие теорию очередей для описания движения пешеходов с использованием вероятностных функций. В данном случае в основе лежит теория массового обслуживания, где основными показателями являются – таблица 1.

Достоинством данной модели является возможность оценки эффективности эвакуации людей из помещений. К недостаткам можно отнести то, что в данном случае возможна организация работы только по принципам FIFO. [7]



Таблица 1 – Основные показатели СМО

Показатели	Формула
Средняя длина очереди	$L = \frac{a \cdot P_n}{n \cdot (1 - a/n)} = \frac{a^{n+1}}{n! n (1 - a/n)^2} \cdot P_0$
Среднее число свободных сервисов	$\bar{N}_0 = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{n-k}{k!} a^k p_0$
Коэффициент простоя сервисов	$k_{пр} = \frac{\bar{N}_0}{n}$
Среднее число занятых сервисов	$\bar{N}_3 = n - N_0$
Коэффициент нагрузки	$k_3 = \frac{\bar{N}_3}{n}$

- Модель социальных сил. Здесь используется Ньютонская механика для описания движения пешеходов, то есть рассматривается сумма всех сил, действующих на пешехода. Например, движущая сила, являющаяся побуждением к действию, и сила трения скольжения, возникающая в результате попытки предотвращения столкновения с другими пешеходами. Силы порождаются социальными взаимодействиями, а перемещения являются анизотропными, то есть важно только то, что происходит перед пассажиром и попадает в его поле зрения.
- Клеточные автоматы. Модель, всё пространство которой представляет собой сетку, в которой каждый пешеход может занимать только одну ячейку. Данный способ разрабатывался для изучения пожарной эвакуации, поэтому он имеет специальные правила для расчета маршрута и степени опасности, то есть выбирается кратчайший путь с наибольшим расстоянием до огня.

Движение моделируется как перемещение людей между клетками по определенным правилам:

1. Каждый пешеход выбирает ячейку с маленькой степенью опасности. Если все смежные ячейки заняты или имеют высокую опасность, то «житель» не перемещается.
2. Если желающих занять ячейку несколько, то перемещающийся выбирается случайным образом.
3. Каждый «житель» обновляет степень опасности.

К недостаткам модели можно отнести то, что не рассматриваются взаимодействия с другими участниками движения и движение возможно только в одну сторону. [8]



- Расчетные модели. В данном случае большая часть параметров рассчитывается на основании данных практического эксперимента, составляются таблицы зависимости этих параметров от числа пешеходов и размеров помещения. Каждое исследование индивидуально и довольно затратно, как по времени, так и по финансам. В дальнейшем эти данные используются для описания движения пешеходного потока. Для расчетов можно использовать ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования», который предлагает расчетный метод оценочных показателей. Этот ГОСТ даёт приблизительное представление об эффективности и безопасности планировки зданий и сооружений, но имеет несколько недостатков:
 1. Большая зависимость от predetermined величин (например, рассматривается только три типа людей - взрослый, взрослый в зимней одежде и подросток).
 2. Низкая точность моделирования (например, не учитывается разуплотнение человеческого потока).

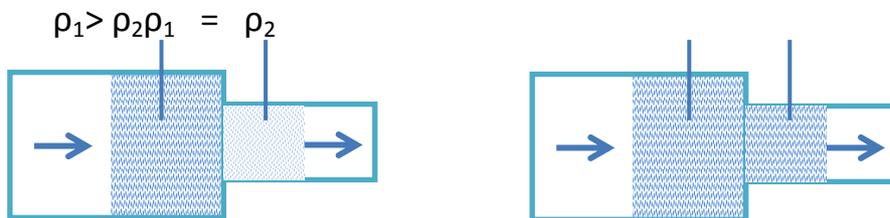


Рисунок 4 - Реальное разуплотнение пешеходного потока (слева) и по ГОСТ 12.1.004-91 (справа)

3. Направленность исключительно на пожарную безопасность. [9]

Таким образом, имея возможность провести анализ и сравнить различные модели, очевидно выделить модель социальных сил. Стоит отметить, что долгое время ее не рассматривали, ввиду сложности обработки огромного количества информации, но с ростом производительности компьютеров стало возможно производить эксперименты с большим количеством участников, то есть полноценным пешеходным потоком на любом рассматриваемом объекте. В настоящее время благодаря интеграции модели социальных сил в различные программные продукты, например пакет программ PTVVisionVISSIMили пешеходная библиотека имитационной среды AnyLogic, предназначенные для моделирования потоков, возможен анализ пешеходных потоков, который реально производить на достаточно высоком уровне.



Список использованных источников:

1. Фетисов В. А., Майоров Н. Н., Таратун В. Е. Имитационное моделирование как метод оптимизации сложной технической системы// Системный анализ и логистика. 2013. Вып. 10. С. 63–69.
2. Майоров Н. Н., Фетисов В. А., Гардюк А. Н. Технологии и методы моделирования пассажирских перевозок на воздушном транспорте. — СПб.: ГУАП, 2014. — 215 с.
3. Маликов Р. Ф. Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6 – Уфа: Изд-во БГПУ, 2013. – 296с.
4. Сайт Многоподходного имитационного моделирования [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.anylogic.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
5. Shigeyuki Okazaki, Satoshi Matsushita A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing - Proceeding of the International Conference on Engineering for Crowd Safety, 1993.-P.271-280
6. С. В. Гилевский, В. М. Молофеев Теория вероятностей и математическая статистика: учеб.пособие / Минск : БГУ, 2015. – 175 с.
7. Литвин Н. В. Теория массового обслуживания: учебное пособие – Мариуполь : ПГТУ, 2014. – 47 с.
8. А. В. Гасников Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учебное пособие/М.: МЦНМО, 2013 - 426 с.