**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ 2014 Т. 6 № 2 С. 285−294**

Ки&М

УДК: 519.17

Квазиклеточные сети и их приложения в задачах моделирования посетителей объектов массового пребывания людей

А. О. Аристов
ФГБАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., д. 6

E-mail: batan-87@mail.ru

Получено 10 декабря 2013 г.,
после доработки 25 февраля 2014 г.

Рассмотрены вопросы предметной интерпретации квазиклеточных сетей в задачах моделирования потоков людей на различных объектах их массового пребывания. Квазиклеточные сети представляют собой фундаментальные дискретные структуры, не имеющие сигнатуры. Предлагаемый подход позволяет в рамках одной дискретной структуры реализовать микро- и макромоделирование потоков людей, а также визуализацию данных. Отдельно рассмотрены интерпретации многосортности потоков в квазиклеточных сетях для случая фанатов на стадионах, а также распространения огня и отравляющих веществ на объектах массового пребывания людей. Подход соответствует указаниям МЧС России от 03.02.2009 г. № 7-3-113.

Ключевые слова: квазиклеточные сети, моделирование, сети, потоки, потоки людей, чрезвычайные ситуации, объекты массового пребывания, стадионы

Quasicellular networks and their application for simulation of visitor flow in public spaces

A. O. Aristov

National University of Science and Technology "MISIS", 6 Leninsky pr., Moscow, 119991, Russia

Abstract. — Problems of application of quasicellular networks for simulation of flows of visitors in different public spaces are considered. Quasicellular networks are basic discrete structures without signature. Proposed approach may be used to create simulations on micro and macro levels. It also may be used for creating geometrical models. There are also multi-flow systems for simulation of sports fans in a sports arena, propagation of fire and poison in public spaces. This approach satisfies the requirements of MOE of Russia № 7-3-113.

Keywords: quasi cellular networks, simulation, flows, networks, flow of people, emergency, public objects, stadium

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 285–294 (Russian).

В работах автора [Аристов, 2012] рассматривались квазиклеточные сети как фундаментальные дискретные структуры, не имеющие сигнатуру. Особенности функционирования квазиклеточных сетей тесно связаны с понятием циркуляции, т. е. передачи состояния между соседними клетками. Переход бинарного состояния между соседними клетками приведен на рисунке 1. Введена широкая классификация квазиклеточных сетей [Аристов, 2013а]. Основным назначением квазиклеточных сетей является моделирование систем, рассмотрение которых сводится к моделированию потоков в сетях. Речь идет о распространении каких-либо микрообъектов или частиц веществ в ограниченном пространстве.

Рис. 1. Переход бинарного состояния между клетками

Несмотря на то что квазиклеточные сети являются новым типом дискретных структур, они обладают некоторыми сходствами с широко известными графовыми моделями, сетями Петри, моделями потоков в сетях, клеточными автоматами и др. Следует отметить, что на настоящий момент существуют различные методы синтеза квазиклеточных сетей [Аристов, 2013а], предполагающие связь квазиклеточных сетей не только с объектами предметной области, которую они моделируют, но и с другими дискретными структурами. В случае синтеза квазиклеточных сетей методом базового графа, графовая макромодель фактически приобретает свойства динамической дискретной структуры (рис. 2). Синтез методом битого клеточного автомата предполагает использование в структуре квазиклеточной сети клеток из подмножества элементов клеточного автомата (рис. 3). Метод синтезирующей фишки основан на формировании элементов квазиклеточной сети, расположенных вдоль траектории движения некоторого микрообъекта.

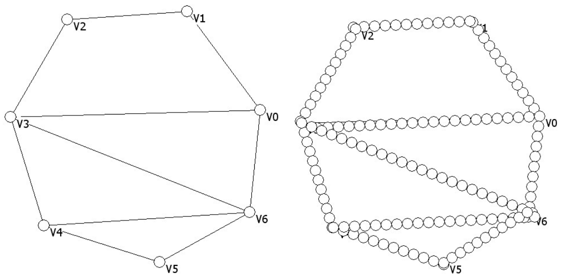

Рис. 2. Базовый граф и построенная на его основе квазиклеточная сеть

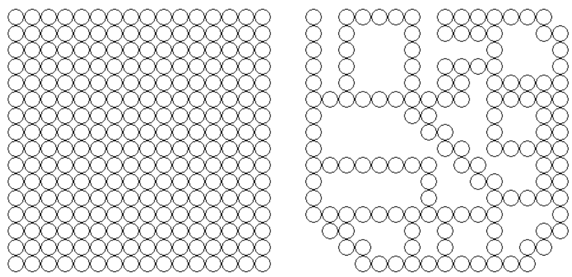

Рис. 3. Клеточный автомат и квазиклеточная сеть, синтезированная методом битого клеточного автомата

Следует, однако, обратить внимание на то, что квазиклеточные сети представляют собой фундаментальные дискретные структуры, которые в чистом виде не применяются, а их приложение сводится к нахождению предметных интерпретаций указанных структур, их элементов и протекающих в них явлений. Фактически при разработке моделей на основе квазиклеточных сетей следует определить, как будут интерпретироваться в различных предметных областях такие понятия, как клетка, состояние, передача состояния, циркуляция, источник, приемник, клеточный автомат, турникет, анастомоз и др. [Аристов, 2013в]. Интерпретация указанных понятий в различных предметных областях позволит применить квазиклеточную сеть для моделирования и представления моделируемых систем.

Сравнивая квазиклеточные сети с другими подходами к моделированию систем, предполагающих распространение потоков, в частности, по сравнению с использованием теоретикографовых моделей, описанных в работах Форда и Фалкерсона [Кристофидес, 1978], а также микромоделей, описанных в ряде работ по имитационному компьютерному моделированию [Шеннон, Калитин, 2012 и др.], нетрудно видеть, что квазиклеточные сети позволяют реализовать моделирование потока на микро- и макроуровнях в рамках единой дискретной структуры. Подобные возможности можно наблюдать также в клеточных автоматах, но в отличие от них квазиклеточные сети не требуют периодического разделения пространства (сравнимого с растеризацией), а предполагают выделение дискретных областей на путях распространения потоков.

Таким образом, учитывая, что квазиклеточные сети представляют собой дискретные структуры, предполагающие моделирование распространения потоков микрообъектов в ограниченном пространстве, а также тот факт, что они позволяют в рамках одной дискретной структуры осуществлять микро- и макромоделирование, то наиболее интуитивно понятным их приложением являются предметные интерпретации, связанные с построением моделей поведения большого скопления посетителей на объектах массового пребывания людей. К таким объектам относятся производственные и складские комплексы, шахты, станции метрополитена, стадионы, торговые центры и др. В настоящее время данная проблема является достаточно актуальной, что связано с указанием МЧС России от 03.02.2009 г. № 7-3-113, согласно которому необходимо разрабатывать компьютерные модели потенциально опасных объектов (в т. ч. объектов массового пребывания людей). Согласно данному указанию требуется разрабатывать трехмерные модели самих объектов массового пребывания. Кроме того, для оценки и наглядного представления, а также отработки эвакуации персонала потребуется динамически моделировать и визуализировать потоки людей. Очевидно, что в такой ситуации требуется как моделирование на микроуровне (рассмотрение отдельных людей), так и сбор данных о потоках в целом, что обуславливает целесообразность как микромоделирования, так и макромоделирования [Аристов, Моргачев, 2012].

Таким образом, в рамках данной работы рассмотрим вопросы проектирования математического обеспечения компьютерного моделирования поведения людей на объектах массового их пребывания на основе квазиклеточных сетей.

В системе рассматриваются потоки людей. Потоки сводятся к моделированию отдельных людей. Считаем, что территория объекта массового пребывания людей разбивается на элементы пространства, в каждом из которых находятся посетитель — единица потока.

Структура системы соответствует расположению помещений и других мест массового пребывания. При этом возможны части объекта ограниченного перемещения (в строго определенном направлении), а также зоны с возможностями перемещения в нескольких направлениях. Примером частей ограниченного перемещения можно считать проходы и заграждения для организации очередей и перераспределения потоков людей.

Первоначальными данными можно считать план объекта, на основе которого построение структуры квазиклеточной сети. При этом производится синтез различными методами. Первоначально строится базовый граф с элементами клеточных автоматов, а на следующем этапе применяется метод битого клеточного автомата.

Рассмотрим пример построения структуры квазиклеточной сети для одной из проходных на примере стадиона «Спартак». Первоначальная схема приведена на рисунке 4. Предполагается несколько вариантов построения элементов квазиклеточной сети на основе указанной схемы. В первом случае (рис. 5) квазиклеточная сеть строится методом базового графа с элементами клеточных автоматов [Введение…, 2012]. Другой вариант — построение методом битого клеточного автомата. Кроме того, метод битого клеточного автомата в любой ситуации позволяет моделировать какие-либо препятствия, например установление дополнительных заграждений на стадионе. Заключительным этапом проектирования структуры квазиклеточной сети является установка турникетов. Истоки, стоки и измерительный участок квазиклеточной сети определяются исходя из целей моделирования [Аристов, 2013в].

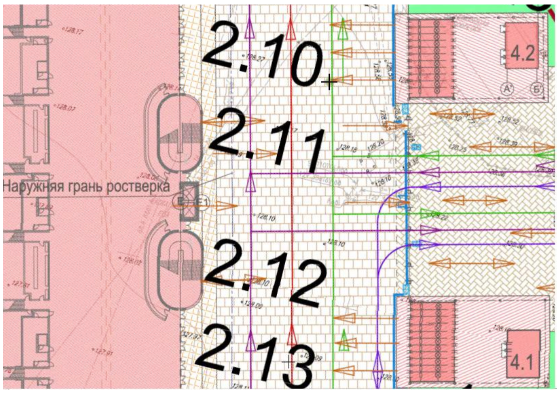

Рис. 4. Фрагмент генплана стадиона (сохранены цифровые обозначения генплана — номера проходных)

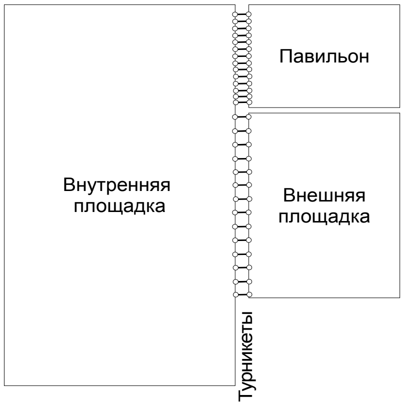

Рис. 5. Базовый граф с элементами клеточного автомата

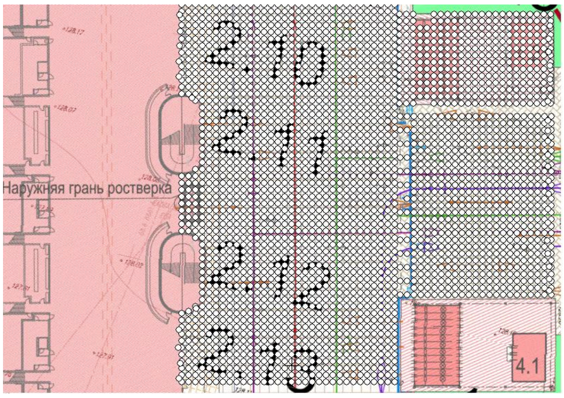

Рис. 6. Структура квазиклеточной сети

Пример оцифровки проходной зоны стадиона представлен на рисунке 6. Следует отметить, что квазиклеточная сеть формируется на основе нескольких областей, представляющих собой вкрапления элементов клеточного автомата. Предметно области клеточного автомата следует рассматривать как зоны с возможностью свободного перемещения посетителей, однако в случае движения по определенным траекториям, например в условиях движения вдоль заграждений, базовый граф примет вид, представленный на рисунке 7. Кроме того, следует представить конфигурацию базового графа для случая общей очереди и ее обслуживания на нескольких пропускных пунктах (рис. 8). Также примером подобной ситуации можно считать обслуживание общей очереди людей несколькими кассами.

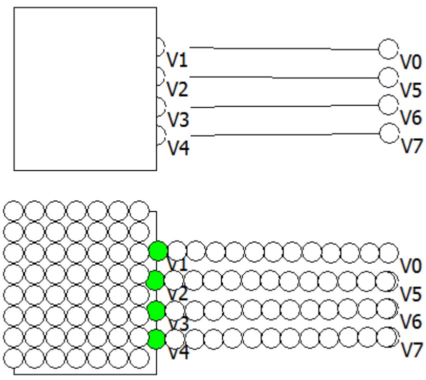

Рис. 7. Базовый граф и квазиклеточная сеть для моделирования движения с заграждениями

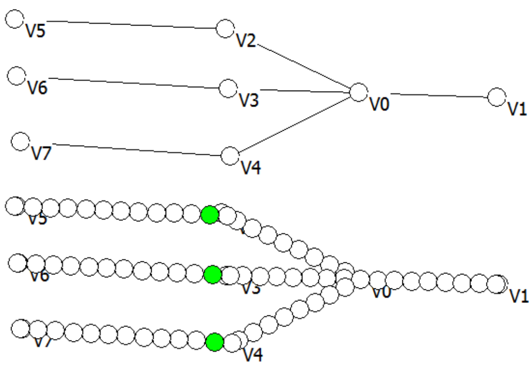

Рис. 8. Базовый граф и квазиклеточная сеть для моделирования обслуживания общей очереди к турникетам

Ситуации, представленные на рисунках 7, 8 можно наблюдать при моделировании вестибюля станции метрополитена (рис. 9).

Таким образом, структура квазиклеточной сети задает ограничения для координат движущихся объектов, в частности людей на объектах массового пребывания.

На следующем этапе необходимо определить структуру клетки квазиклеточной сети. Каждая клетка задается в виде [Аристов, 2013д]

$$Q_i = (B_i, C_i, S_i), \tag{1}$$

где B_i — неизменные (базовые) параметры клетки (от англ. basic), C_i — параметры клетки, изменяющиеся при прохождении фишек через клетку (от англ. changeable), S_i — параметры фишки как объекта, находящегося в клетке, т. е. переменные состояния (фазовые переменные) клетки (от англ. state). В задаче моделирования поведения посетителей учреждений массового пребывания людей, в качестве базовых параметров выступают координаты единицы пространства (клетки) на плоскости

$$B_i = (x_i, y_i, z_i), \tag{2}$$

при этом для многоуровневого объекта рассматривается трехмерное распределение единиц пространства, где z_i — уровень (этаж).

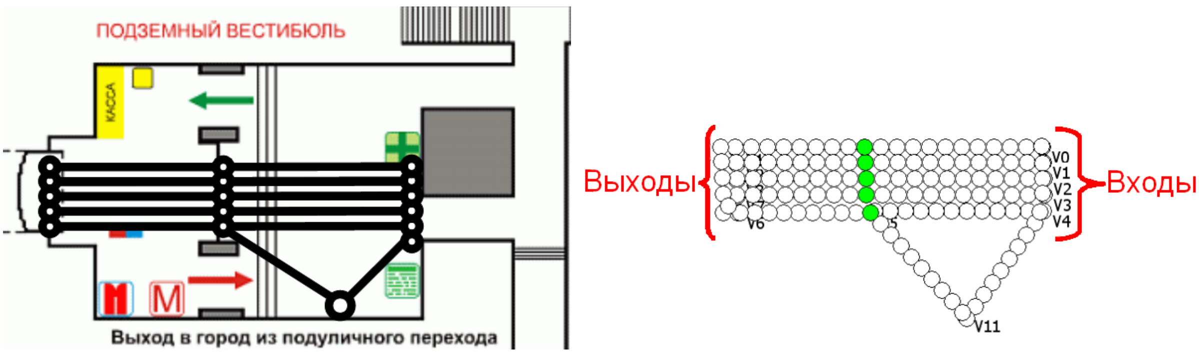

Рис. 9. Пример построения модели вестибюля станции метро

В качестве вектора состояния следует рассматривать набор параметров каждого посетителя, находящегося в указанной области пространства (клетке). Однако следует отметить, что ряд параметров связан со значениями элементов вектора B_i, в частности координаты, в которых находится посетитель. Учитывая, что движение посетителя может быть неравномерным, а также не всегда проходит через центр клетки, моделирующей область пространства, реальные координаты посетителя $\left(x_i^{(p)}, y_i^{(p)}\right)$ отклоняются на случайную величину

$$\begin{cases} x_i^{(p)} = x_i + random \cdot 2 \cdot R - R, \\ y_i^{(p)} = y_i + random \cdot 2 \cdot R - R, \end{cases} \tag{3}$$

где *random* — величина, принимающая случайное значение, равномерно распределенное в диапазоне [0,1]. Следует отметить, что

$$\left(x_i^{(p)}, y_i^{(p)}\right) \subset S_i\,. \tag{4}$$

Координаты посетителя $\left(x_i^{(p)}, y_i^{(p)}\right)$ вычисляются каждый момент времени исходя из того, в какой клетке находится посетитель. Несмотря на отсутствие необходимости представления координат в составе вектора параметров S_i, указанный вектор содержит ряд других параметров. В простейшем случае в качестве таких параметров следует рассматривать наличие посетителя в заданной области пространства. Факт наличия посетителя кодируется бинарным значением

$$S_i \in (0,1). \tag{5}$$

В зависимости от размера области R наличие фишки в клетке интерпретируется как наличие одного или нескольких человек в области пространства, тогда состояние приобретает вектора бинарных компонент.

Для класса задач, в которых воздействием посетителей на сам объект можно пренебречь, вектор переменных параметров остается пустым, однако в случае, когда необходима статистика, связанная с прохождением посетителей через измерительный участок, в качестве вектора параметров выступают величины, являющиеся счетчиками, т. е.

$$C_i(t+\theta) = C_i(t) + 1 \quad при \begin{cases} S_i(t) = 0, \\ S_i(t+\theta) = 1. \end{cases} \tag{6}$$

Величина счетчика (6) используется при вычислении ряда значений путем моделирования потоков посетителей объектов массового нахождения людей.

Таким образом, определена структура клетки:

$$Q_i = (x_i, y_i, z_i, C_i, S_i), \tag{7}$$

где x_i, y_i — координаты посетителя, z_i — уровень (этаж), C_i — счетчик людей, проходящих через область пространства, S_i — наличие посетителей в области пространства.

Моделирование посетителей на объектах массового пребывания людей осуществляется с течением модельного времени. Фактически с течением времени меняются величины счетчика и состояния, задаваемые численно, тогда

$$Q_i = (x_i, y_i, z_i, C_i(t), S_i(t)). \tag{8}$$

Следующим этапом проектирования моделей на основе квазиклеточных сетей является выбор типа циркуляции. Для объектов массового пребывания людей характерны различные типы циркуляции, в первую очередь зависящие от специфических особенностей решаемой задачи.

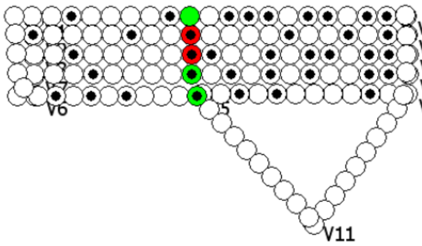

Рис. 10. Состояние элементов квазиклеточной сети в некоторый момент модельного времени (цветами выделены открытые и закрытые турникеты)

Поскольку в любом случае предполагается движение потоков посетителей в определенном направлении (рис. 10), то целесообразно использовать направленную циркуляцию, а также микроциркуляцию. Причем микроциркуляция используется в тех ситуациях, когда маршруты перемещений заранее известны [Аристов, 2013д]. В случаях, когда моделируется прохождение посетителей и оценивается время прохождения, используется направленная циркуляция, поскольку для таких объектов характерно передвижение посетителей к некоторым целевым точкам. Пусть посетители объекта массового пребывания перемещаются в направлении некоторой точки с координатами (x_T, y_T).

Предметно в виде такой точки представляются турникеты, выходы из залов, места в зале и т. п. Для случая моделирования проходного пункта стадиона в качестве такой точки целесообразно рассматривать входы на трибуну. Тогда при нахождении посетителя объекта в точке $Q_c = (x_c, y_c, z_c, C_c(t), S_c(t))$ при наличии клеток

$$Q_{nj} = (x_{nj}, y_{nj}, z_{nj}, C_{nj}(t), S_{nj}(t)), \tag{9}$$

где $j = 1,2,\dots$, для каждой из которых выполняется

$$\begin{cases} \left(x_{nj} - x_c\right)^2 + \left(y_{nj} - y_c\right)^2 \le 4 \cdot R^2, \\ S_{nj}\left(t\right) = 0, \end{cases} \tag{10}$$

то будет осуществляться переход $Q_c \to Q_{nj}$, при котором

$$\min_j \sqrt{\left(x_{nj} - x_T\right)^2 + \left(y_{nj} - y_T\right)^2}\,. \tag{11}$$

Таким образом, решены вопросы формирования модели пространства объекта массового пребывания людей для моделирования поведения посетителей на основе квазиклеточных сетей. Обосновано применение направленной циркуляции, либо микроциркуляции.

После построения квазиклеточной сети (рис. 9) необходимо определить участок, на котором будут осуществляться измерения (рис. 11). Для оценки количества посетителей, проходящих через проходную зону стадиона, установим измерительный участок на турникетах. Кроме того, следует отметить, что в структуру каждой клетки включены счетчики $C_i(t)$, показывающие количество посетителей, прошедших через указанную клетку за время t. Тогда на измерительном участке $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$

$$C(t) = \sum_{i=1}^{n} C_i(t). \tag{12}$$

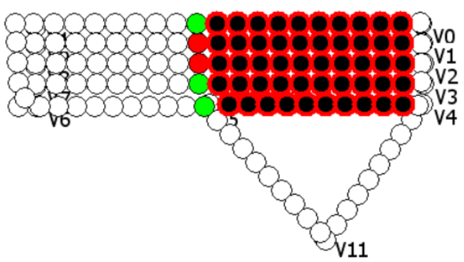

Рис. 11. Измерительный участок

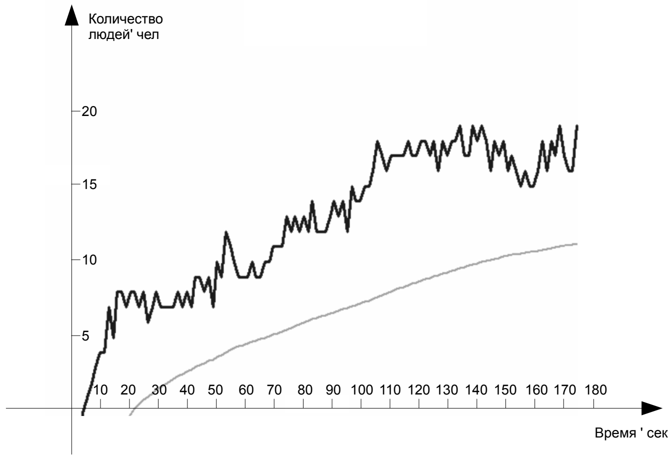

Рис. 12. График количества посетителей на измерительном участке (турникетах) и среднее количество посетителей на участке за время T

Оценки количества посетителей через измерительный участок является аддитивным макропараметром измерительного участка квазиклеточной сети. График во времени величины (12) представлен на рисунке 12 на верхней кривой линии. На нижней кривой представлен график функции среднего значения величины (12). Среднее значение вычисляется по формуле

$$M^{(T)}[C(t)] = \frac{\sum_{t=0}^{T} \sum_{i=1}^{n} C_i(t)}{T}. \tag{13}$$

Таким образом, квазиклеточные сети позволяют не только моделировать потоки людей на микроуровне, но и получать макропараметры потоков, фактически представляющие собой функции, заданные численно и получаемые в процессе моделирования.

Кроме того, следует отметить, что согласно указанию МЧС России от 03.02.2009 г. № 7-3-113 особую актуальность также приобретает проблема геометрического моделирования потенциально опасных объектов. Следует отметить, что в рассмотренных моделях на базе квазиклеточных сетей в качестве параметров клетки группы B_i используются пространственные координаты указанной клетки. Важной особенностью является тот факт, что при наличии в указанной области пространства (клетке) Q_i посетителя ($S_i = 1$), его координаты фактически тесно связаны с координатами клетки согласно (9). Указанные координаты (x_i, y_i) являются основой для визуализации объекта. Простейший пример визуализации приведен на рисунке 13. Кроме того, при построении более сложной геометрии в случае трехмерной визуализации также используются указанные координаты (x_i, y_i), по отношению к которым производится расчет и построение геометрии трехмерного объекта [Калитин, Аристов, 2011]. Также следует отметить, что состояние квазиклеточной сети меняется дискретно [Аристов, Моргачев, 2012] через равные промежутки времени, поэтому очевидна связь работы моделей на основе квазиклеточных сетей и схемы динамической геометрической модели (рис. 14), приведенной в работе [Калитин, Аристов, 2011].

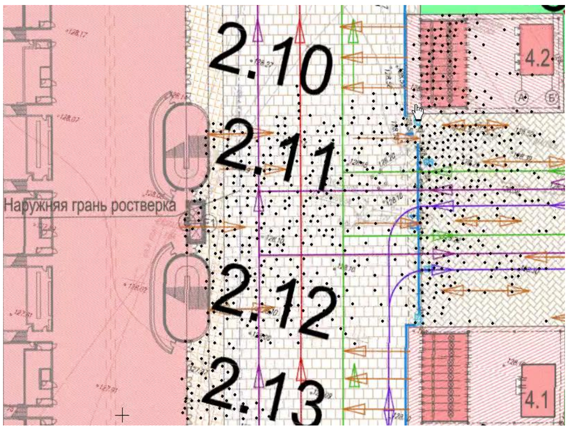

Рис. 13. Визуализация потока посетителей на стадионе «Спартак»

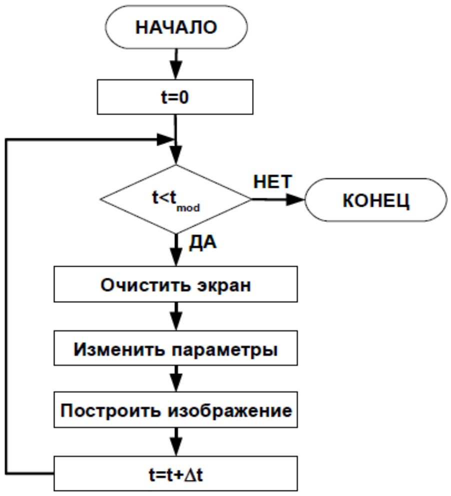

Рис. 14. Работа динамической геометрической модели

Выше рассмотрены интерпретации, предполагающие наличие одного типа потоков — потоков посетителей. Особое внимание следует уделить интерпретации многосортности потоков в квазиклеточных сетях при моделировании потоков на объектах массового пребывания людей. Предложенные ранее подходы были ориентированы на моделирование одного сорта объектов — людей. Однако в квазиклеточных сетях предусматривается многосортность потоков, предполагающая наличие потокообразующих состояний различных типов, находящихся в рамках одной единицы пространства (клетки). Тогда если в задачах моделирования потоков посетителей объектов массового пребывания людей, клетка задается в виде

$$Q_i = (x_i, y_i, z_i, C_i, S_i), \tag{14}$$

то ее состояние включает в себя набор компонент

$$\begin{cases} S_i = (S_1, S_2, \dots, S_j, \dots), \\ S_j \in (0,1), \end{cases} \tag{15}$$

каждая из которых обозначает наличие в области пространства посетителей определенной группы.

Для измерения указанных компонент используются счетчики

$$C = \left(C_{1,} C_{2,} \ldots, C_j, \ldots\right). \tag{16}$$

Важную проблему при моделировании часто представляет возможность сосуществования многосортных потоков в одних и тех же единицах пространства.

Примером предметной интерпретации многосортных потоков в условиях объектов массового пребывания людей можно считать моделирование движения фанатов футбольных команд. Указанная задача тесно связана с проблемой обеспечения безопасности посетителей стадиона. Если принять наличие фанатов команд соответственно за величины S_1 и S_2, то каждая клетка примет вид

$$Q_i = \left(x_i, y_i, z_i, S_1(t), S_2(t)\right), \tag{17}$$

тогда условие столкновения фанатов команд есть

$$S_1(t) = S_2(t) = 1\,. \tag{18}$$

Условие (18) фактически обозначает ситуацию, связанную со столкновением фанатов разных команд на стадионе, а значит ситуацию, которую следует исключить. Тогда, при проектировании стадионов и выборе мест установки заграждений следует промоделировать ситуацию и в результате модельного эксперимента установить отсутствие (18).

Еще одним вариантом взаимодействия многосортных потоков можно считать распространение огня, ядовитых веществ, радиации и т. п. в пространстве объектов массового пребывания людей. В такой ситуации проверяется условие появления потоков людей и потоков отравляющих веществ, огня и т. д. в одной области пространства (клетки). Тогда при выполнении условия (18) появляются пострадавшие, т. е. фактически увеличивается некоторая величина (счетчик количества пострадавших).

Таким образом, предложена предметная интерпретация многосортности потоков, предполагающая возможность отслеживания взаимодействия потоков в квазиклеточных сетях при их моделировании. Приведенные интерпретации квазиклеточных сетей являются основой для построения моделей для решения широкого круга задач моделирования потоков людей на объектах их массового пребывания. Разработка подобных моделей является важным элементом решения задач по обеспечению безопасности посетителей и персонала на объектах массового пребывания людей, поскольку компьютерные модели позволяют вырабатывать решения по обеспечению мер безопасности на таких объектах [Аристов, Моргачев, 2012].

Таким образом, в рамках данной работы рассмотрены приложения квазиклеточных сетей в задачах построения математического обеспечения моделирования поведения посетителей объектов массового пребывания людей. Квазиклеточные сети позволяют не только реализовывать микро- и макромоделирование потоков посетителей объектов массового пребывания людей, но и обеспечить их геометрическое моделирование и визуализацию. При этом указанные модели строятся на базе единой дискретной структуры.

Список литературы

Аристов А. О. Методы синтеза квазиклеточных сетей // Научный вестник МГГУ. — 2013а. — № 9 (42). — С. 16–21.

Аристов А. О. О многосортности потоков в квазиклеточных сетях // Научный вестник МГГУ. — 2014. — № 1 (46). — С. 8–14.

Аристов А. О. Квазиклеточные сети. Синтез и циркуляция // Горный информационно-аналитический бюллетень № 2'. — 2013б. — С. 125–131.

Аристов А. О. Квазиклеточные сети. Теоретическая база и программный инструментарий моделирования // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и Образование». — 2012. — № 11 (42). — С. 25.

Аристов А. О. Об элементах квазиклеточных сетей // Горный информационно-аналитический бюллетень № 11. — 2013в. — С. 322–332.

Аристов А. О. Потоки в квазиклеточных сетях // Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление. — Электрон. журн. — 2013г. — № 3(20)— С. 36–41. — Режим доступа: http://www.rypravlenie.ru.

Аристов А. О. Теория квазиклеточных сетей и ее приложения // Всероссийская выставка Научно-технического творчества молодежи. II Международная научно-практическая конференция «Научно-техническое творчество молодежи — путь к обществу, основанному на знаниях»: сборник научных докладов / Мос. гос. строит. ун-т. — М.: МГСУ, 2013д — С. 230–234.

Аристов А. О., Моргачев К. В., Рябов Л. П., Суворов А. В., Федоров А. М. Компьютерные системы поддержки принятия решений: учебное пособие. — М: МГГУ, 2012. — 172 с.

Введение в моделирование пешеходных потоков [электронный ресурс] // HabrHabr. — 2012. — Режим доступа: http://habrahabr.ru/post/158975/, дата обращения: 07.12.2013

Горбатов В. А. Фундаментальные основы дискретной математики. — М.: Физматлит, 1999. — 544 с.

Калитин Д. В., Аристов А. О. Геометрическое моделирование САПР / Учебное пособие. — М: МГГУ, 2011. — 145 с.

Калитин Д. В., Калитина О. С., Суворов А. В. Математическое моделирование в САПР. — М: МГГУ, 2012. — 159 с.

Шеннон Р. Имитационное моделирование систем. — М.: МИР, 1978. — 420 с.