

Разработка среды визуального моделирования и анализа потоковых систем на основе квазиклеточных сетей

Design of environment for flow-based systems visual simulation and analysis based on quasi-cellular nets

Аннотация. Рассматриваются вопросы разработки среды визуального моделирования потоковых систем на основе квазиклеточных сетей. Квазиклеточные сети представляют собой особый тип дискретных структур не имеющих явно заданной сигнатуры и предназначенных для моделирования в рамках единой структуры на микро- и макроуровне системы, поведение которых сводится к рассмотрению распространения потоков (в различных предметных интерпретациях). Описана структура квазиклеточных сетей, динамические аспекты, вычисление параметров микро- и макроуровня. Моделирование работы квазиклеточных сетей рассмотрено в рамках программной среды, функционал которой описан в работе. Также приведены примеры применения среды моделирования — потоки людей на объектах массового пребывания и транспортная логистика карьера.

Ключевые слова. Сеть, поток, дискретная структура, квазиклеточная сеть, визуализация, среда моделирования, компьютерное моделирование, визуализация

Abstract. It considered problems of simulation flow-based systems based on quasi-cellular nets. Quasi-cellular nets is special type of discrete structures without signature. It may be used for flow based systems simulation and visualization on micro and macro levels of detail. It considered structure, dynamical aspects, parameters calculation. Simulation of quasi-cellular nets implements on special software environment. Also considered applications of quasi-cellular nets such as people flows and quarry logistics.

Key words. net, flow, discrete structure, quasi-cellular net, visualization, simulation environment, computer simulation, visualization.

Введение

В науке технике и технологиях, транспорте, медицине и социальной сфере часто рассматриваются системы, поведение которых сводится к распространению потоков в ограниченном пространстве. Существуют различные понятия о потоке, среди которых понимание потока как приращения уровня непрерывной величины[1], совокупность направленно движущихся частиц[2], направленное распространение микрообъектов (потокообразующих объектов)[3]. При различном рассмотрении независимо от предметной интерпретации поток обладает дуализмом – поток рассматривается как совокупность взаимодействующих потокообразующих объектов (микроуровень) и поток как единый объект (макроуровень).

На практике компьютерные модели потоков рассматриваются для конкретных предметных областей на конкретных уровнях. Несмотря на это, существует объективная проблема перехода между указанными уровнями моделирования, поскольку на практике требуется получение характеристик потоков, рассматриваемых как для микро, так и для макроуровня[4].

В условиях современного уровня развития вычислительной техники представляется целесообразным комбинирование моделей, предполагающих рассмотрение потока как совокупности взаимодействующих объектов (мультиагентный или объектно-ориентированный подход), и потока как единого объекта (потоки в сетях, системная динамика и др.). Решением указанной проблемы является разработка специального математического и программного обеспечения моделирования потоковых систем на основе особого типа дискретных структур, рассмотренных в работе.

Основы квазиклеточных сетей

В работах автора [5,6,7] предложен новый тип дискретных структур – квазиклеточные сети.

Первоначальное представление структуре квазиклеточной сети даётся на основе построения её элементов (клеток) Q_u на рёбрах графа – базового графа квазиклеточной сети (рис. 1). Следует отметить, что на практике часто структура потоковой системы первоначально представлена в виде графа [8,9,10].

Определение 1. Статической структурой двумерной координатной квазиклеточной сети называется дискретная структура, включающая в себя множество $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$ круговых областей в двумерном пространстве, имеющих радиус R , каждая из которых взвешена соответственно элементами из множеств $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$. Тогда для каждой $Q_u \in Q$ найдётся хотя бы одна $Q_v \in Q$ ($u, v = 1, 2, \dots, n; u \neq v$) такая, что выполняется условие $(x_u - x_v)^2 + (y_u - y_v)^2 \leq 4R^2$.

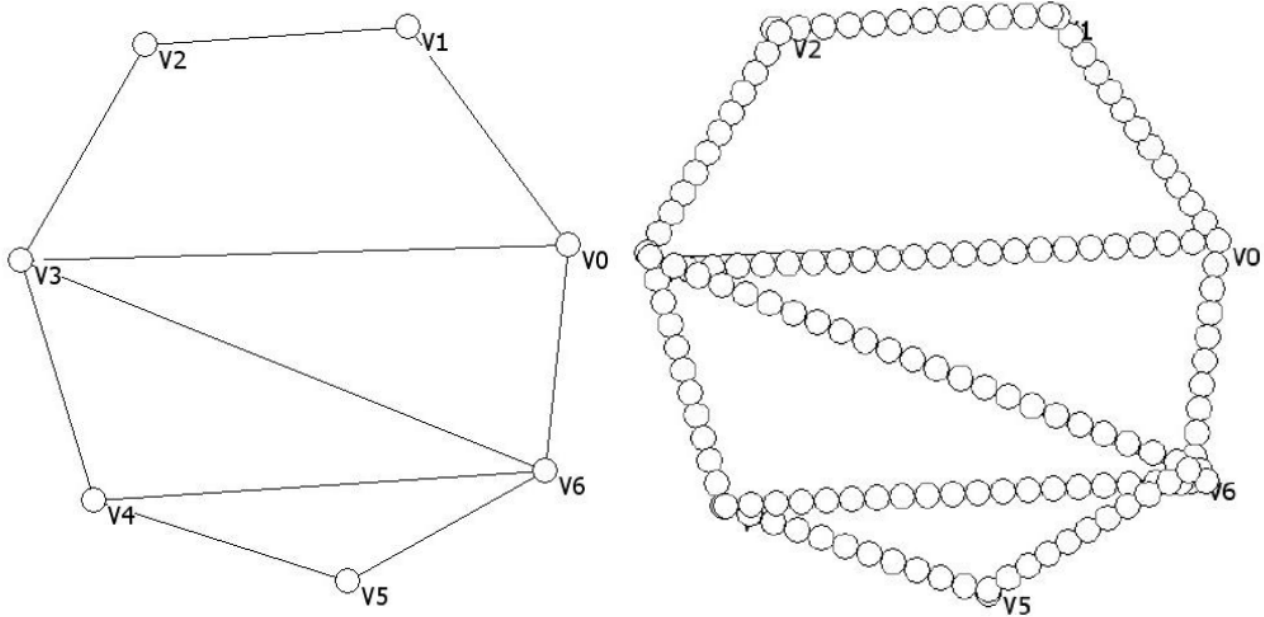


Рис. 1. Квазиклеточная сеть и её базовый граф

Каждая клетка квазиклеточной сети как область пространства может содержать некоторый микрообъект. Параметры клетки и микрообъекта образуют её структуру, значения параметров – состояние.

Определение 2. Структура клетки квазиклеточной сети – набор значений переменных и констант, которыми взвешена каждая клетка квазиклеточной сети $Q_i=(B_i, C_i, S_i)$, где $B_i=(B_1, B_2, \dots)$ – неизменные (базовые) параметры клетки (от англ. Basic) $C_i=(C_1, C_2, \dots)$, – параметры клетки, изменяющиеся при прохождении объектов через клетку (от англ. Changeable), $S_i=(S_1, S_2, \dots)$ – параметры объекта, находящегося в клетке, т. е. переменные состояния (фазовые переменные) клетки (от англ. State).

Простейшим случаем структуры квазиклеточной сети является структура вида $Q_i=(x, y, C, S)$, где x, y – пространственные (декартовы) координаты клетки, S – бинарное состояние клетки (наличие микрообъекта) $S \in \{0, 1\}$, C – счётчик микрообъектов, проходящих через клетку. Квазиклеточные сети с рассмотренной структурой клетки называются квазиклеточными сетями с бинарным состоянием.

Введём модельное время $t=0, \theta, 2\theta, 3\theta, \dots$, где θ – сколь угодно малый шаг (такт) модельного времени.

С течением модельного времени в квазиклеточной сети осуществляются передачи состояния между соседними клетками. Соседство клеток определяется предикатом соседства:

$$P(Q_u, Q_v) = P(x_u, y_u, x_v, y_v) = \begin{cases} 0, & \text{при } (x_u - x_v)^2 + (y_u - y_v)^2 > 4R^2 \\ 1, & \text{при } (x_u - x_v)^2 + (y_u - y_v)^2 \leq 4R^2 \end{cases} .$$

Каждый такт модельного времени при наличии микрообъекта в клетке, он передаётся соседним клеткам, т. е. осуществляется переход.

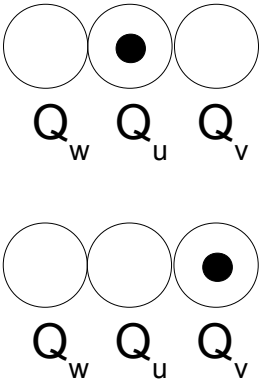
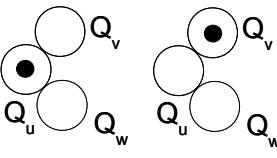
Определение 3. Переходом (передачей) дискретного состояния $Q_u \rightarrow Q_v$ квазиклеточной сети называется изменение состояний клеток, вида

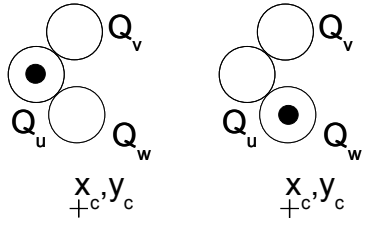
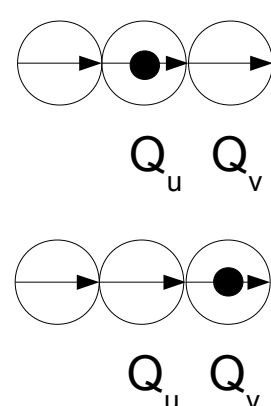
$$\begin{cases} S_u(t)=S \\ P(Q_u, Q_v)=1 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} S_v(t+\theta)=S_u(t) \\ S_u(t+\theta)=\bar{S} \end{cases}, \text{ где } S - \text{ некоторое передаваемое}$$

(потокообразующее) состояние, \bar{S} – некоторое состояние, устанавливаемое после передачи состояния S соседней клетке.

Также определяются дополнительные (ограничивающие) условия, определяющие возможность перехода. Множество всех возможных каждый такт модельного времени переходов называется *циркуляцией в квазиклеточной сети*. Существуют различные правила перехода, которые определяют типы циркуляции (табл. 1)[11].

Табл. 1. Типы циркуляции в квазиклеточных сетях

Тип циркуляции	Иллюстрация	Описание
<p>Случайная – передача состояния происходит в одну из случайно выбранных соседних клеток</p>		<p>Переходы осуществляются с вероятностями $p(Q_u \rightarrow Q_v)$, $p(Q_u \rightarrow Q_w)$. В общем случае для всех переходов состояния $Q_u \rightarrow Q_{vi}$, где $i=1,2,\dots,m$ и выполняется условие (10), справедливо $\sum_i p(Q_u \rightarrow Q_{vi})=1$.</p> <p>В случае равновероятного перехода:</p> $\forall i: p(Q_u \rightarrow Q_{vi}) = \frac{1}{m}$
<p>Направленная – состояние передаётся в клетку, ближайшую к заданной цели (целевой точке, целевому значению)</p>	<p style="text-align: center;">x_c, y_c x_c, y_c</p>  <p style="text-align: center;">Пример 1</p>	<p>При возможности осуществления передач состояния $Q_u \rightarrow Q_{vi}$, где $i=1,2,\dots,m$ состояние передаётся в клетку, наиболее близкую к некоторой целевой точке (координате точки):</p>

	 <p style="text-align: center;">Пример 2</p>	$\min_i \sqrt{(x_{vi} - x_c)^2 + (y_{vi} - y_c)^2}$
<p>Микроциркуляция – направление передачи состояния определено в каждой клетке</p>		<p>Структура каждой клетки дополняется величинами изменения координат в заданном направлении:</p> $Q_u = (x_u, y_u, dx_u, dy_u, S_u)$ <p>$dx_u = x_v - x_u, dy_u = y_v - y_u$ Для микроциркуляции справедливо</p> $x_v = x_u + dx_u$ $y_v = y_u + dy_u$
<p>Микроциркуляция с несколькими направлениями</p>		<p>Структура каждой клетки дополняется величинами изменения координат в каждом из заданных направлений и вероятностью перехода в них:</p> $Q_u = (x_u, y_u, (dx_{uv}, dx_{uv}, p_{uv}), (dx_{uw}, dx_{uw}, p_{uw}), S_u)$ <p>Осуществляется по тем же правилам, что и случайная циркуляция и микроциркуляция</p>
<p>Циркуляция в квазиклеточных сетях с небинарным состоянием</p>	<p style="text-align: center;">-</p>	<p>Считаем, что небинарное состояние в каждый такт работы квазиклеточной сети меняется на некоторую величину δ, тогда</p> $S_v(t + \theta) = S_v(t) + \delta$ $S_u(t + \theta) = S_u(t) - \delta$

Таким образом, квазиклеточная сеть представляет собой динамическую дискретную структуру, предназначенную для компьютерного моделирования потоковых систем (в различных интерпретациях), т. е. систем, поведение которых сводится к распространению потоков в ограниченном пространстве. Следует отметить, что квазиклеточные сети являются дискретными структурами предназначенными именно для компьютерного моделирования, поскольку рассматривается течение модельного времени и изменение состояния каждый его такт.

Квазиклеточные сети как инструментарий имитационного моделирования

Выше рассмотрены структура и динамика квазиклеточной сети. Остановимся подробнее на вопросах применения квазиклеточной сети как инструментария моделирования. Отмечено, что квазиклеточная сеть используется как инструментарий компьютерного моделирования потоковых систем. Автором отмечается, что квазиклеточные сети позволяют в рамках единой структуры осуществлять моделирование на микро- и макроуровне. При этом в качестве параметров микромоделей выступают элементы структуры клетки по определению 2. Сравнивая квазиклеточные сети с потоками в сетях, описанными в работах [8,9,10], видно, что в квазиклеточных сетях рёбра базового графа разбиваются на клетки. В потоках в сетях макроскопические параметры моделей, например величина потока, берутся для ребра в целом. Таким образом, в квазиклеточных сетях на базе переменных величин отдельных клеток (микропараметров) вычисляются макроскопические параметры, характерные для элементов сетей, образованных клетками. В качестве таких элементов выступают *измерительные участки* $Q^{(m)}$ квазиклеточных сетей, представляющие собой подмножества клеток, для которых справедливо:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q^{(m)} \subset Q \\ Q_i \in Q^{(m)} \\ Q_i = (B_i, C_i, S_i) \end{array} \right. , \quad (1)$$

тогда в каждый момент времени

$$t_m = m \cdot \theta \quad (2)$$

предполагается нахождение величин вида:

$$S_i^{(C)}(t_m) = \sum_i C_k(t_m), \quad (3)$$

$$S_i^{(S)}(t_m) = \sum_i S_j(t_m), \quad (4)$$

$$P_i^{(C)}(t_m) = \prod_i C_k(t_m), \quad (5)$$

$$P_i^{(S)}(t_m) = \prod_i S_j(t_m), \quad (6)$$

где $S_j \in S_i$, $j=1,2,\dots$, $C_k \in C_i$ $k=1,2,\dots$, а для Q_i справедливо (1).

Очевидно, что выражения (3)-(6) позволяют найти за время t_m некоторые значения, являющиеся результатами моделирования работы определённых участков квазиклеточных сетей. При этом параметры, определяемые (3), (4) называются *аддитивными макропараметрами участка квазиклеточной сети*, а (5), (6) – *мультипликативными*.

Исходя из рассмотренного выше, квазиклеточные сети представляют собой математическое обеспечение имитационного моделирования и позволяют реализовать в рамках единой модели микро и макро моделирование:

- организовано течение дискретного модельного времени[12];
- на микроуровне рассматриваются мгновенные значения величин, входящих в структуру клетки квазиклеточной сети;
- на макроуровне рассматриваются значения, вычисляемые на основе аддитивных и мультипликативных величин для подмножеств квазиклеточных сетей.

Ниже рассмотрим пример оценки величины потоков на основе аддитивных и мультипликативных параметров клеток квазиклеточной сети.

Метрические характеристики потоков в квазиклеточных сетях

Рассмотрим квазиклеточную сеть, каждая клетка которой задана в виде:

$$Q_p = (x_p, y_p, C_p, S_p) \quad (7)$$

где S_p – состояние клетки, C_p – счётчик некоторых состояний $S_p^{(F)}$,

являющихся потокообразующими. Логика работы счётчика имеет вид

$$C_p(t+\theta) = C_p(t) + 1 \quad \text{при} \quad \begin{cases} S_p(t) = \neg S_p^{(F)} \\ S_p(t+\theta) = S_p^{(F)} \end{cases} . \quad (8)$$

Считая, что модельное время имеет вид

$$t_m = m \cdot \theta , \quad (9)$$

где $m = 1, 2, \dots$, и используя возможности счётчика, определим величину потока через клетку $Q_p = (x_p, y_p, C_p, S_p)$ за время моделирования T_m :

$$\xi^{(Q_p)}(T_m) = C_p(T_m) . \quad (10)$$

В случае бинарного состояния

$$\xi^{(Q_p)}(T_m) = C_p(T_m) = \sum_{t_m=0}^{T_m} S_p(t_m) . \quad (11)$$

При рассмотрении потоков на отдельных рёбрах базового графа и других измерительных участках в соответствии с (11)

$$\xi^{(Q^{(m)})}(T_m) = \sum_{Q^{(m)}} \xi^{(Q_p)}(T_m) . \quad (12)$$

Для бинарного состояния оценка величины потока имеет вид:

$$\xi^{(Q^{(m)})}(T_m) = \sum_{Q^{(m)}} \sum_{t_m=0}^{T_m} S_p(t_m) . \quad (13)$$

Предложенные величины (10)–(13) позволяют оценивать величины потоков на измерительных участках квазиклеточных сетей.

Ещё ряд оценок величины потока предложен в работах автора [5,13]. Соотношения (10)–(13) основаны на том, что для оценки потока берутся счётчики всех клеток на измерительном участке. В качестве ещё одного варианта оценки величины потока [13] рассматривается участок, на котором устанавливаются вход(-ы) и выход(-ы). Примером подобного участка является множество клеток, синтезированных на ребре базового графа U_k [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q^{(U_k)} = (Q_1^{(U_k)}, Q_2^{(U_k)}, Q_3^{(U_k)}, \dots) \\ Q_i = (x_i^{(U_k)}, y_i^{(U_k)}, C_i^{(U_k)}, S_i^{(U_k)}) \\ S_i^{(U_k)} \in [0, 1] \\ Q_i^{(U_k)} \in U_k \\ U_k = (V_{ia}, V_{ib}) \end{array} \right. . \quad (14)$$

В такой постановке оценка потока предполагает количество «фишек», прошедших участок от входа к выходу. На указанном ребре графа установим счётчики $Q_{\text{вх}}$ и $Q_{\text{вых}}$. Тогда величина потока, находящегося на ребре в момент времени t , вычисляется по формуле

$$\xi^{(U_k)}(t) = C_{\text{вх}}^{(U_k)}(t) - C_{\text{вых}}^{(U_k)}(t) . \quad (15)$$

Кроме того, следует привести экспериментальные оценки математического ожидания и дисперсии, основанные на результатах моделирования работы квазиклеточной сети:

$$M[\xi^{(Q^m)}(T_m)] = \frac{\xi^{(Q^m)}(T_m)}{T_m} , \quad (16)$$

$$D[\xi^{(Q^m)}(T_m)] = M[(\xi^{(Q^m)}(T_m))^2] - M^2[\xi^{(Q^m)}(T_m)] . \quad (17)$$

Программная среда моделирования и примеры её применения

Реализация возможностей моделирования работы квазиклеточных сетей для конечного пользователя осуществляется в виде программного комплекса моделирования их работы. Программный комплекс зарегистрирован как объект интеллектуальной собственности (программа для ЭВМ) в соответствии с законодательством Российской Федерации [14]. Программный комплекс моделирования работы квазиклеточных сетей (далее – симулятор) предназначен для моделирования и визуализации работы квазиклеточных сетей [14]. Симулятор выполняет следующие функции:

- построение базового графа квазиклеточной сети;
- синтез квазиклеточных сетей методами базового графа, генерирующей клетки (в т.ч. вручную), битого клеточного автомата;
- построение элементов квазиклеточных сетей : вкрапления клеточного

автомата, турникета, генератора, стока;

- моделирование работы квазиклеточной сети с течением модельного времени (случайная, направленная и микроциркуляция);
- формирование измерительного участка;
- визуализация текущего состояния квазиклеточной сети;
- построение графика зависимости количества фишек на измерительном участке от времени;
- сохранение базовых графов и квазиклеточных сетей.

Графический интерфейс симулятора реализован на основе принципов визуального программирования. Симулятор работает под управлением MS Windows.

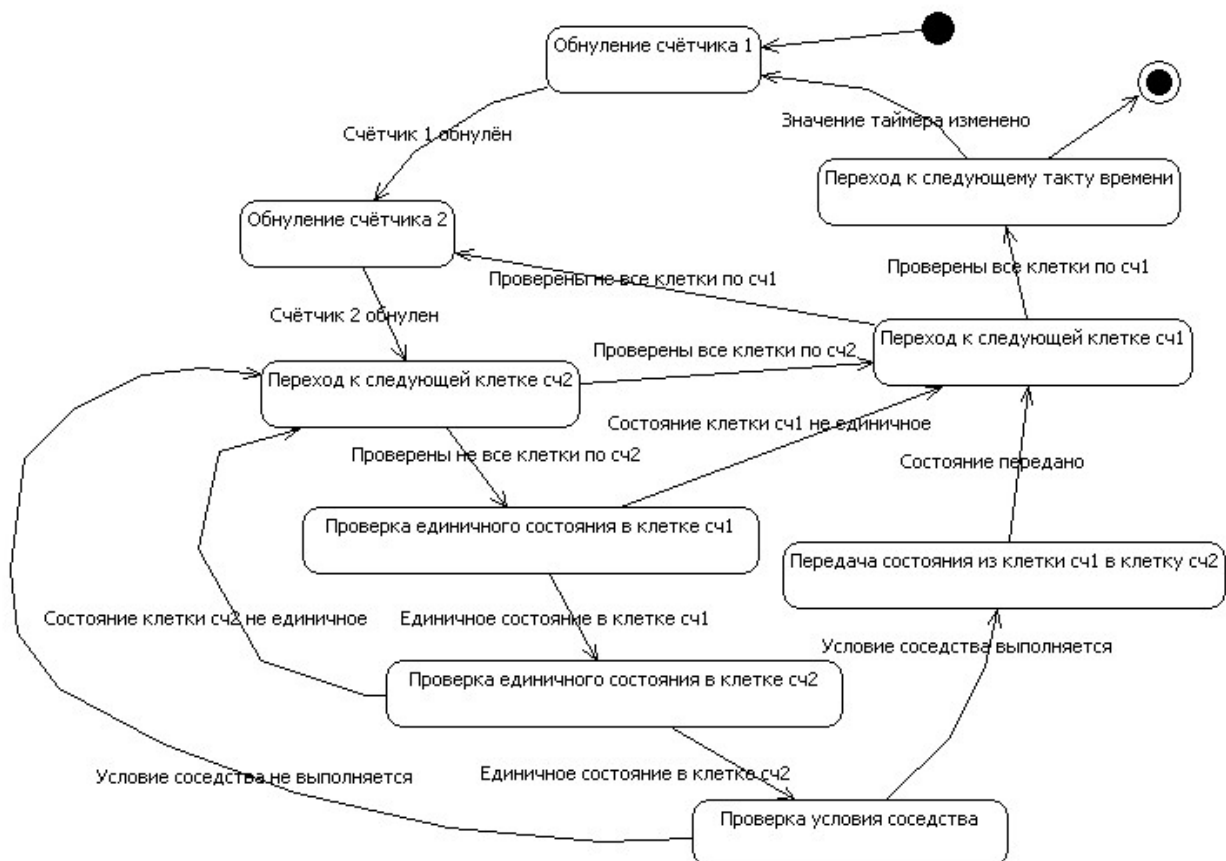





Рис. 2. Диаграмма состояний симулятора квазиклеточной сети

Работа симулятора при моделировании квазиклеточных сетей представлена в виде диаграммы состояний (рис. 2). В условиях работы современных ЭВМ фон Неймановского типа моделирование сводится к перебору и попарному взаимодействию клеток квазиклеточной сети[5]. Рассмотрим примеры работы симулятора квазиклеточной сети.

На первом этапе разрабатывается базовый граф с элементами клеточного. При разработке используются следующие функции симулятора (табл. 2)

Табл. 2. Функции симулятора по работе с базовым графом

Кнопка панели инструментов	Описание
	Режим добавления вершины базового графа
	Режим добавления ребра базового графа
	Режим добавления вкрапления клеточного автомата

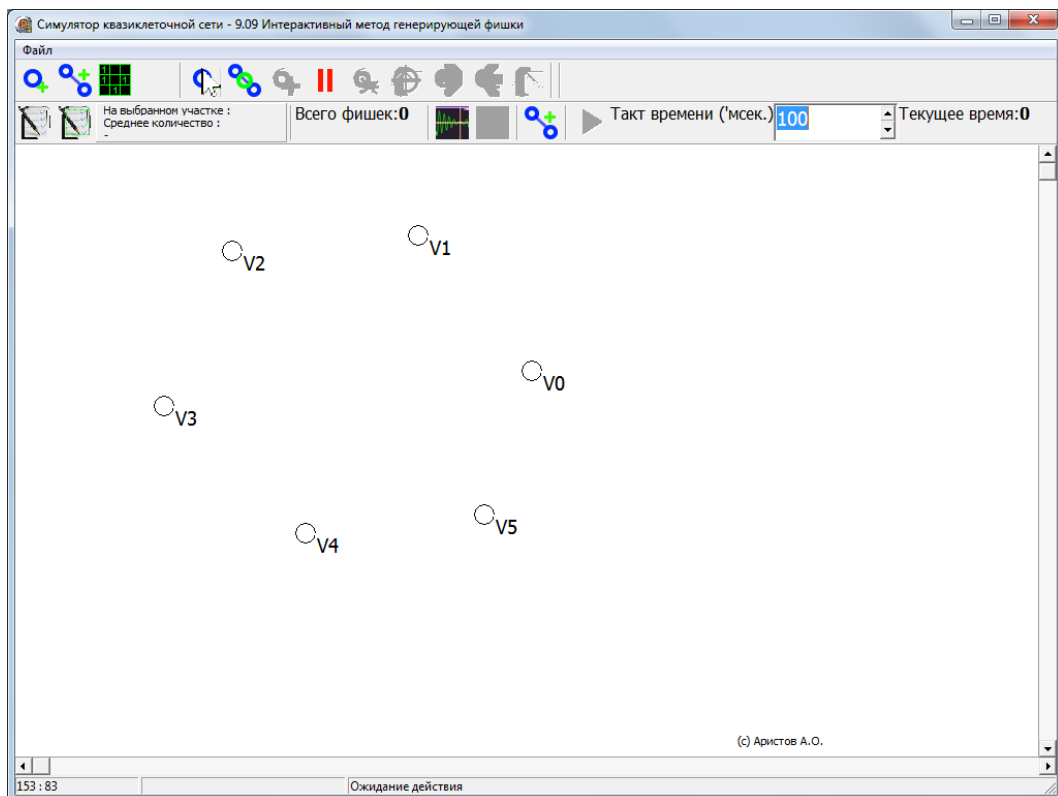


Рис. 3. Добавление вершин базового графа

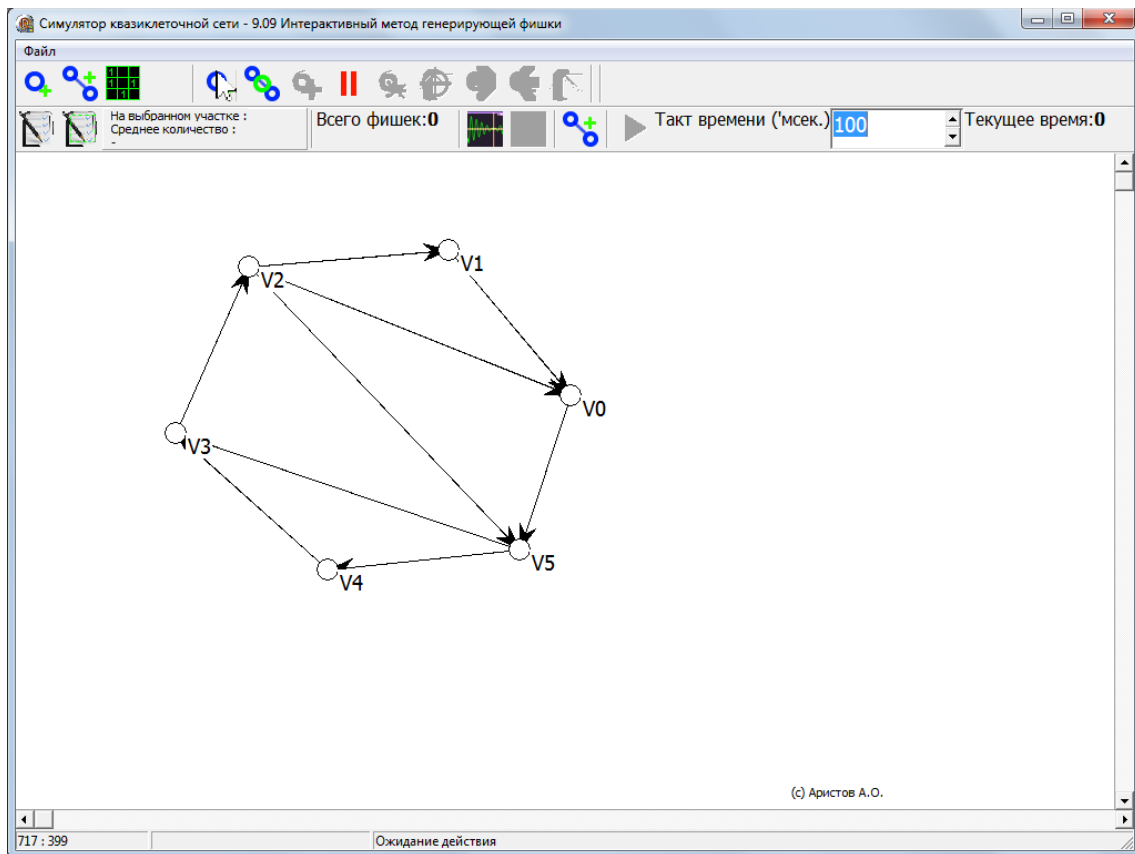


Рис. 4. Добавление рёбер базового графа

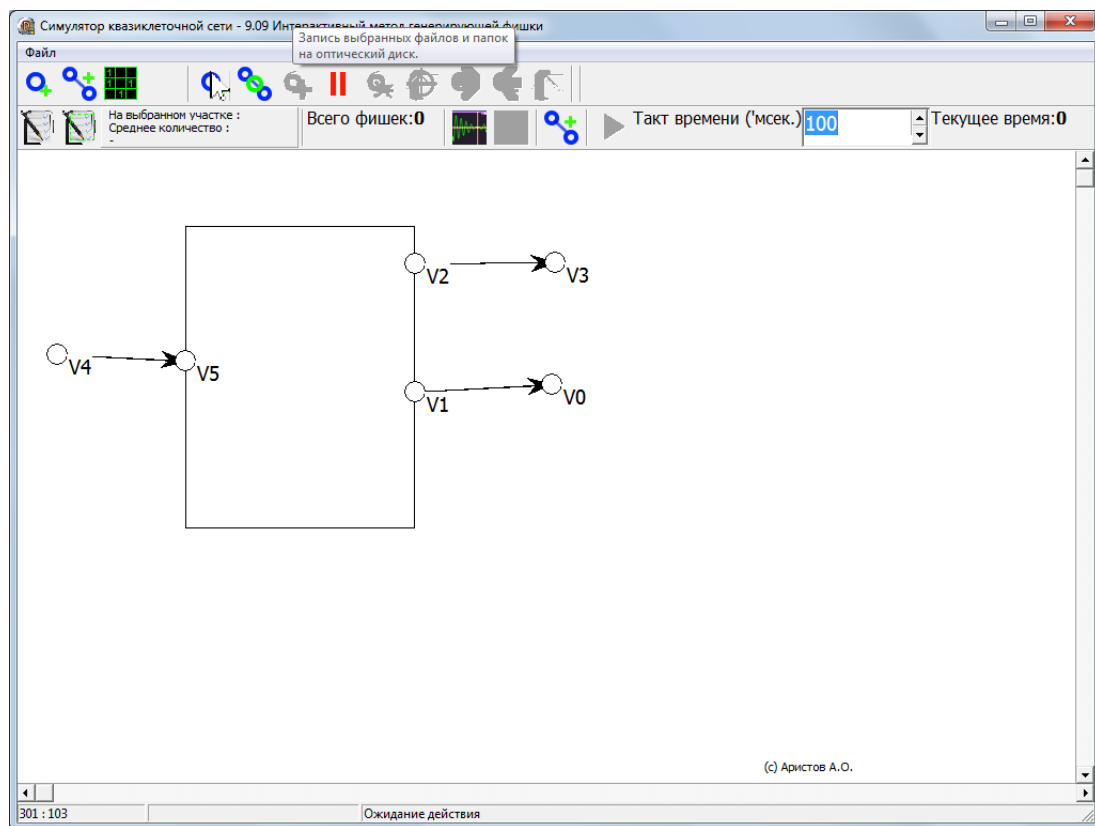



Рис. 5. Добавление области клеточного автомата

Этапы работы полностью соответствуют заданию базового графа[6]. Строятся вершины (рис. 3), рёбра (рис. 4). При необходимости добавляются элементы клеточного автомата (рис. 5). На основе базового графа синтезируется

квазиклеточная сеть (функция «Синтезировать квазиклеточную сеть» ).

Следует отметить, что на основе ориентированного графа синтезируется квазиклеточная сеть с микроциркуляцией (рис. 6), на основе неориентированного – с направленной. Обозначения клеток представлены в табл. 3. После построения квазиклеточной сети на основе базового графа/клеточного автомата доступны функции симулятора, приведённые в табл. 4.

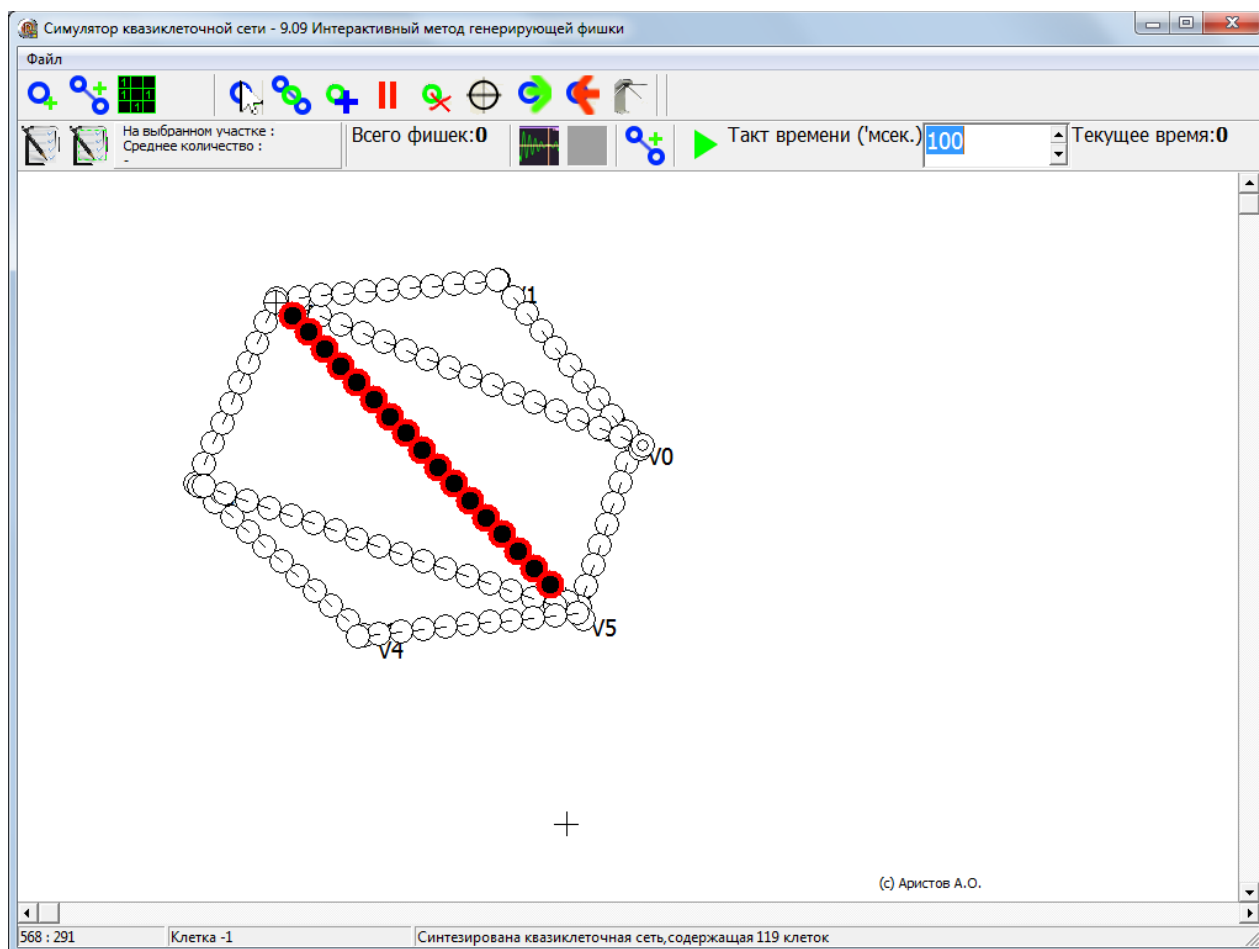


Рис. 6. Квазиклеточная сеть с микроциркуляцией и измерительным участком


Симулятор предусматривает специальный режим – режим выбора и настройки клеток (). В указанном режиме для выбранной клетки доступна панель настройки её параметров (рис. 7), согласно структуре клетки по определению 2. В указанном режиме для клетки настраивается её тип. Типы клеток и обозначения приведены в табл. 5.

Табл. 3. Типы клеток в квазиклеточных сетях



Обозначение	Описание
	Клетка со случайной/направленной циркуляцией
	Клетка с микроциркуляцией (линия от центра указывает направление циркуляции)

Табл. 4. Функции по работе с квазиклеточной сетью













Кнопка панели инструментов	Описание
	Режим добавления клетки квазиклеточной сети
	Ручной вариант метода генерирующей клетки
	Режим удаления клетки квазиклеточной сети
	Режим установки центра направленной циркуляции
	Режим добавления генератора
	Режим добавления стока
	Режим добавления клетки-турникета
	Режим добавления измерительного участка
	Запуск процесса моделирования

Табл. 5. Обозначения клеток

Обозначения клеток	Описание
	Клетка-генератор
	Клетка-сток
	Клетка задержки (турникет)

Клетка

Клетка #78

Состояние

Проход закрыт

Сток

Генератор

Генератор

Вероятность фишки: 50 %

Циркуляция

Случайная

Микро


Траектория циркуляции

Турникет


Турникет

Время задержки: 5

Рис. 7. Панель настройки параметров клетки

В режиме добавления измерительного участка () определяется множество клеток, входящее в его состав (см. рис. 6). Для указанного измерительного участка симулятор строит график функции зависимости

количества фишек на измерительном участке от времени.

После запуска режима моделирования () доступны функции в табл. 5, что позволяет реализовать интерактивное изменение квазиклеточных сетей (добавление элементов, изменение параметров клеток и т.п.). Кроме того, в симуляторе предусмотрена панель настройки и управления анимацией (рис. 8). В режиме моделирования квазиклеточной сети отображаются параметры измерительного участка (рис. 9). В режиме моделирования производится интерактивная визуализация состояния квазиклеточной сети (рис. 10), график зависимости количества фишек от модельного времени (рис. 11), «тепловая карта», показывающая нагрузку на участки квазиклеточной сети (рис. 12). Тепловая карта рассчитывается на основе счётчиков, в соответствии с (8).

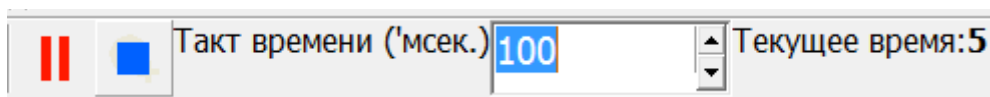


Рис. 8. Панель управления и настроек анимации (динамики)
квазиклеточной сети

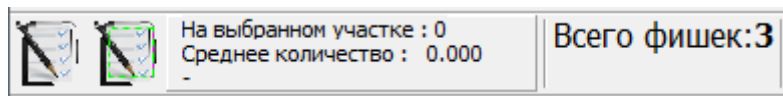


Рис. 9. Панель данных измерительного участка

Предметные приложения квазиклеточных сетей

Квазиклеточные сети практически реализованные в рассмотренном выше симуляторе предполагают достаточно широкий спектр приложений, связанных с моделированием потоковых систем прежде всего в промышленно-логистических интерпретациях, т. е. потоковые системы с относительно крупными потокообразующими объектами, отличающимися микрочастиц, к рассмотрению которых сводятся потоки жидкостей и газов.

Рассмотрим несколько предметных приложений квазиклеточных сетей а именно объекты массового пребывания людей и промышленно-логистические системы.

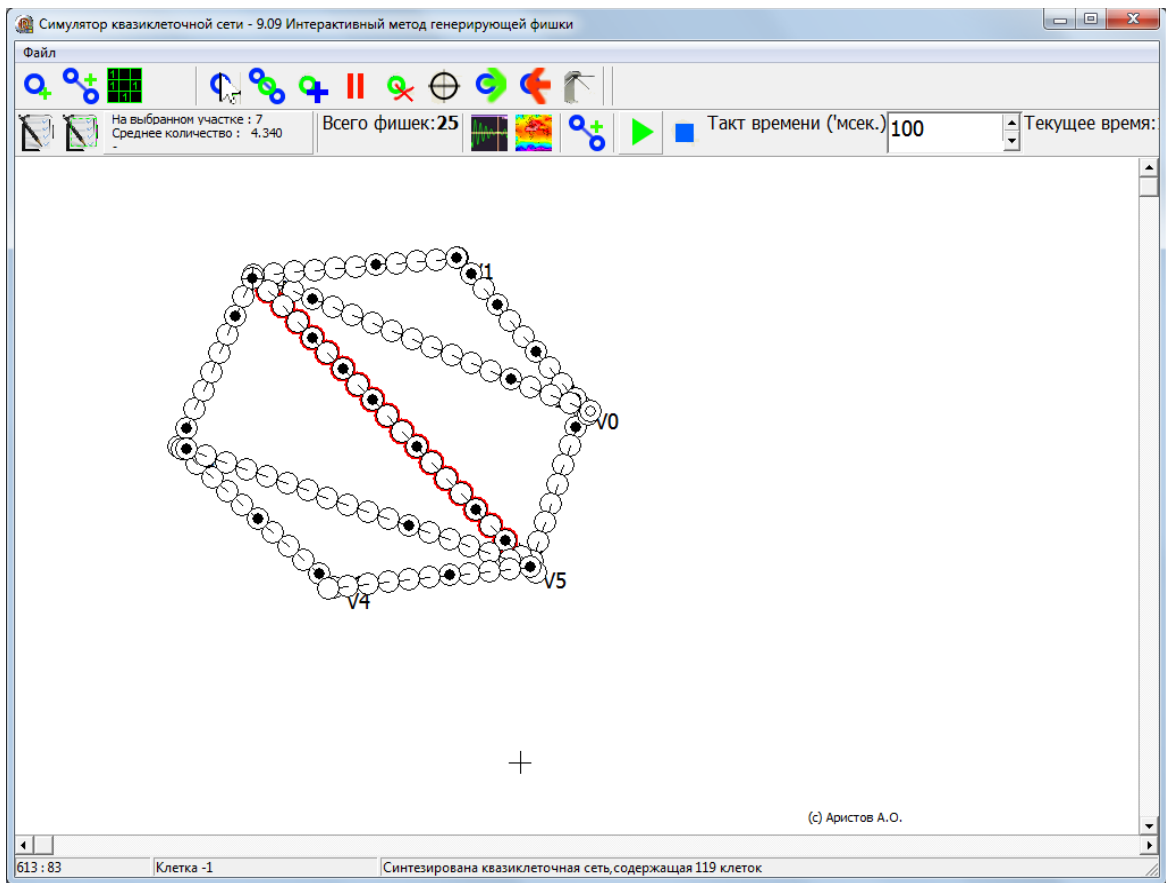


Рис. 10. Визуализация состояния квазиклеточной сети

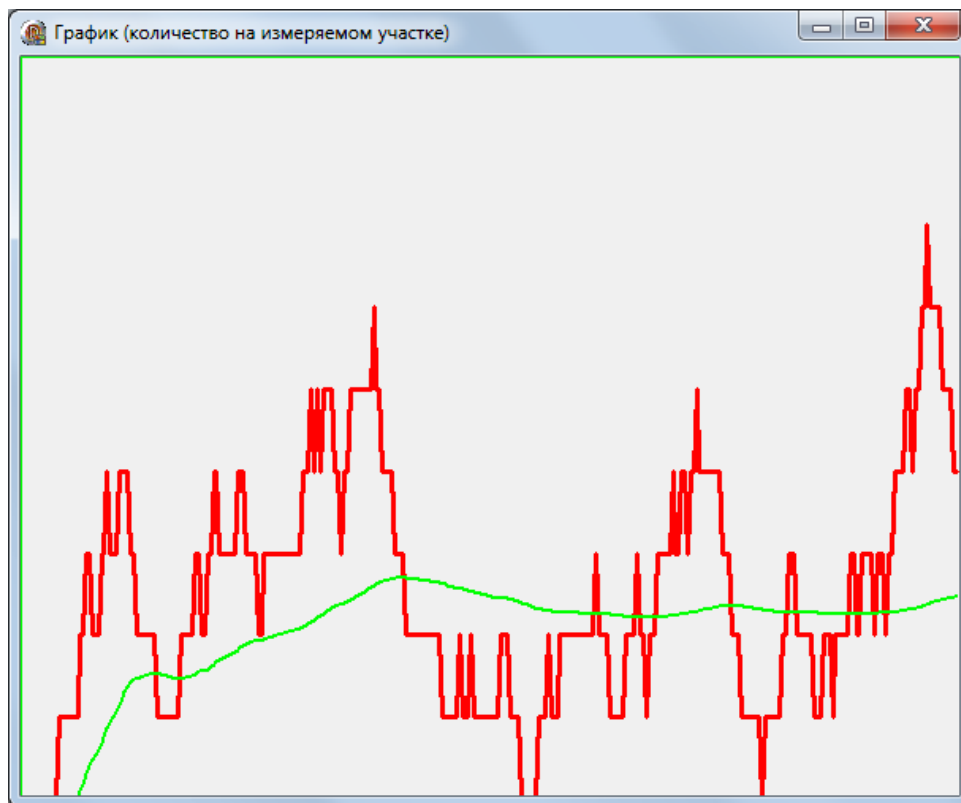


Рис. 11. График количества фишек от времени на измерительном участке

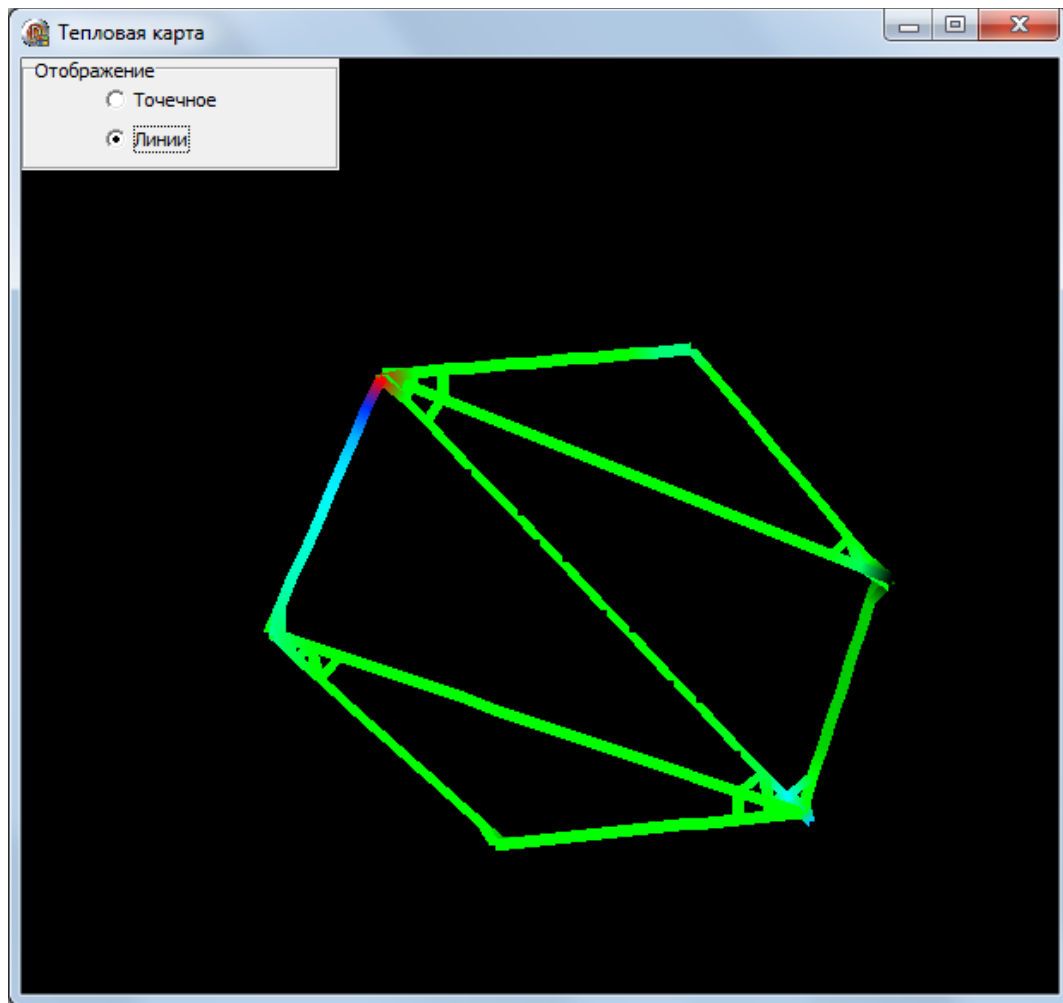


Рис. 12. Тепловая карта нагрузки квазиклеточной сети

Наиболее интуитивно понятными предметными интерпретациями квазиклеточных сетей являются модели систем, моделирование которых сводится к рассмотрению потоков. Примерами таких систем являются множества движущихся объектов в ограниченном пространстве. К таким системам относится поведение большого скопления посетителей на объектах массового пребывания людей. К таким объектам относятся производственные и складские комплексы, шахты, станции метрополитена, стадионы, торговые центры и др. Рассмотрим построение модели поведения людей на основе квазиклеточных сетей в соответствии со схемой, приведённой ранее.

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

находится посетитель – единица потока.

Структура системы (рис. 13) соответствует расположению помещений и других мест массового пребывания. При этом возможны части объекта ограниченного перемещения (в строго определённом направлении), а также зоны с возможностями перемещения в нескольких направлениях. Примером частей ограниченного перемещения являются проходы и заграждения для организации очередей и перераспределения потоков людей (рис. 14). На рис. 15 представлено состояние квазиклеточной сети визуализированное в виде обозначения отдельных людей в потоке. На рис. 16 представлена тепловая карта, полученная на основе счётчиков количества человек, установленных для каждой клетки. Удобства квазиклеточных сетей в вопросах визуализации связано с наличием в структуре клетки элементов для представления координат области пространства, а также счётчиков, значения которых приводятся к цветовой шкале[15].

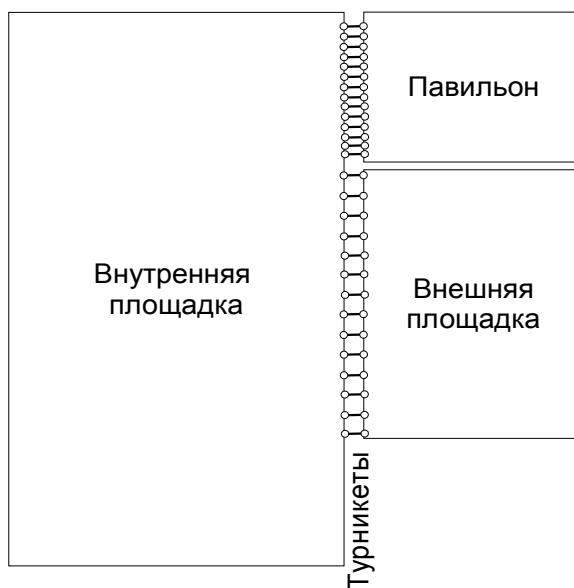


Рис. 13. Пример структуры объекта массового пребывания людей

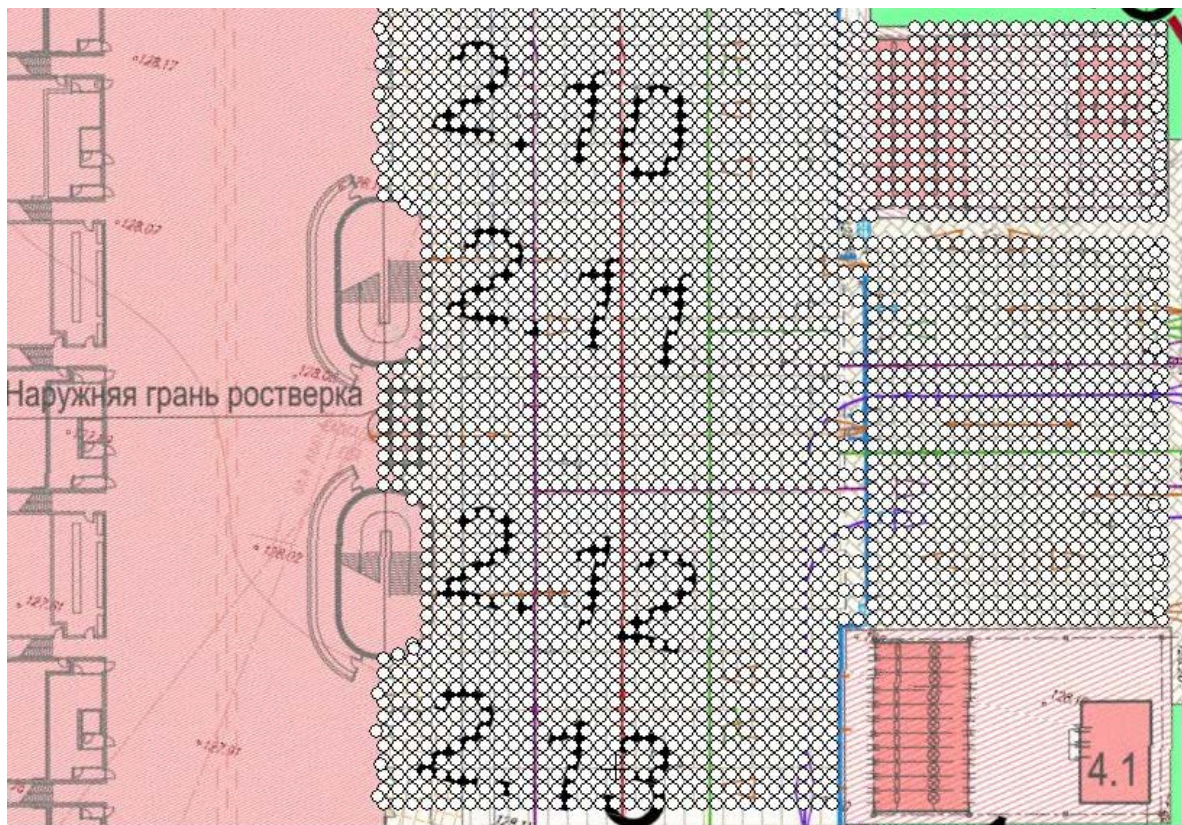


Рис. 14. Квазиклеточная сеть для представления объекта массового пребывания людей

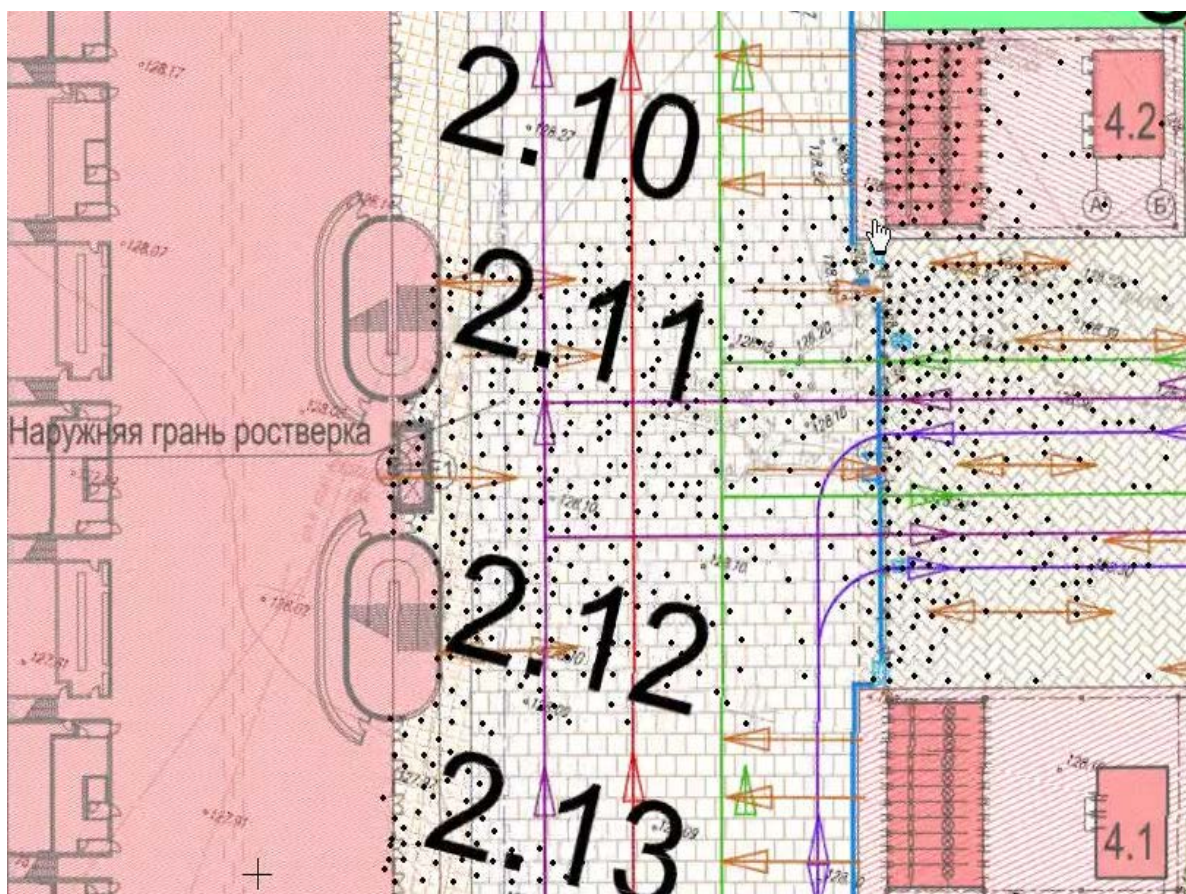


Рис. 15. Пример визуализации потоков людей на объекте массового пребывания

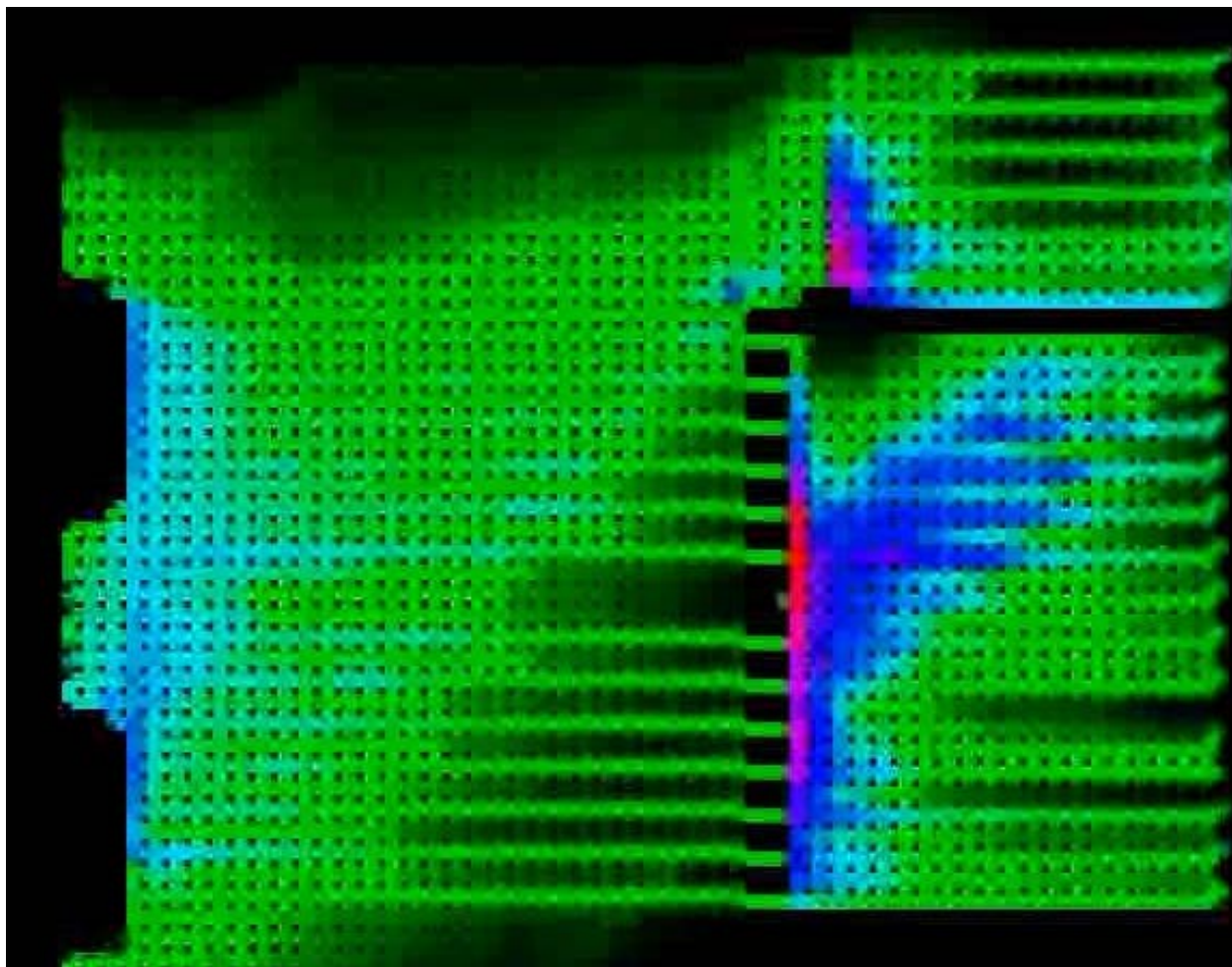


Рис. 16 Визуализация нагрузки на участки объекта массового пребывания в виде тепловой карты

Примером промышленно-логистической интерпретации квазиклеточных сетей является визуальное моделирование карьера. Траектории движения транспортных средств в карьере задаются в виде базового графа (рис. 17), на основе которого синтезируется квазиклеточная сеть (рис. 18). Моделирование полученной квазиклеточной сети позволяет получить широкий набор данных о работе карьера[16]:

- состояние каждого транспортного средства в каждый момент времени;
- длительность прохождения карьера каждым транспортным средством;
- объём добытой руды за время;
- нагрузку на участки карьера в виде тепловой карты (рис. 19).

Следует отметить, что указанные характеристики зависят от варьируемых параметров клеток-источников потока, позволяющих определять интенсивность появления самосвалов в карьере[16].

Таким образом кратко описаны приложения квазиклеточных сетей, построенные на базе программного симулятора, рассмотренного выше. Более подробно приложения рассмотрены в работах автора[16,17].

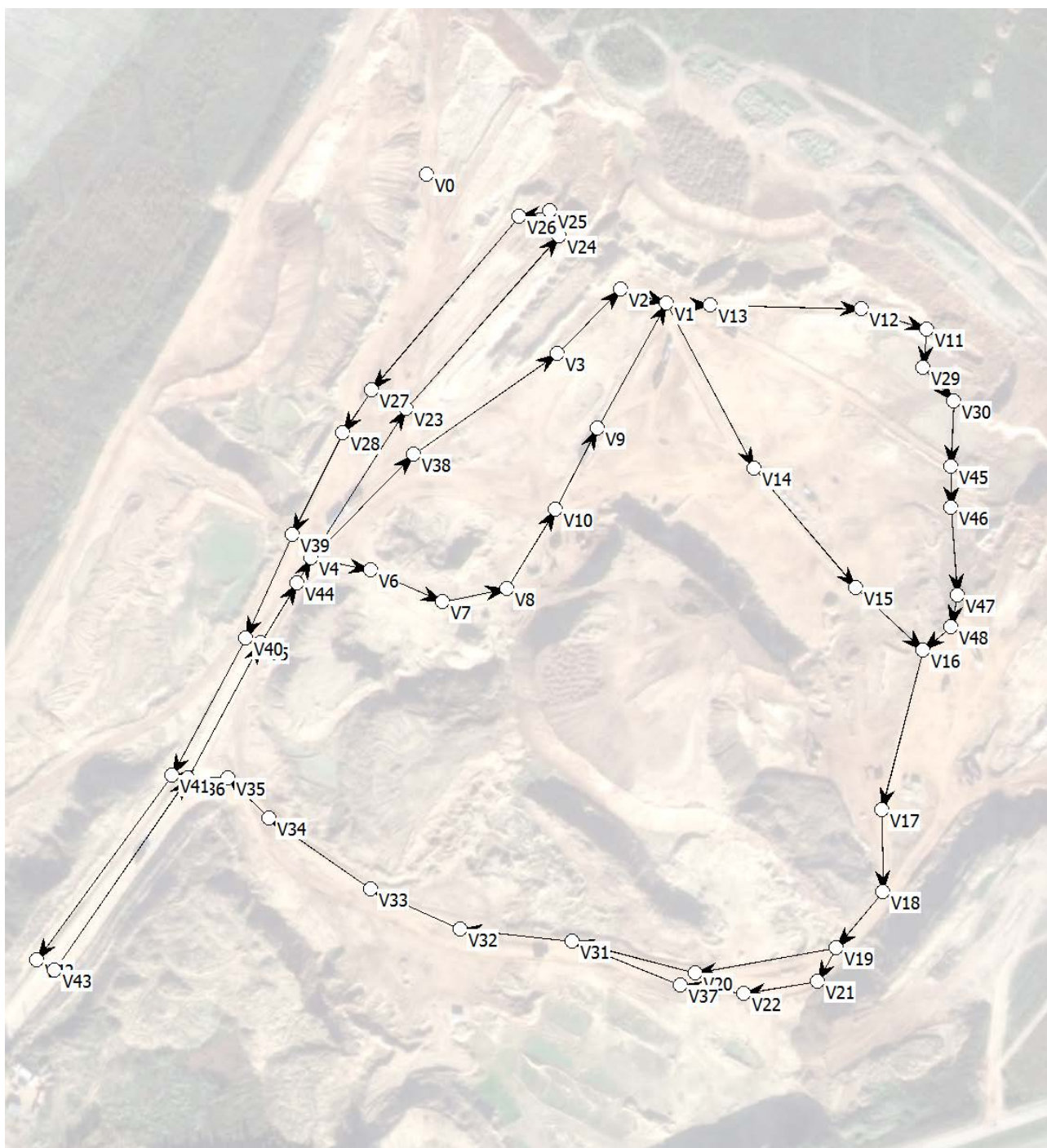


Рис. 17. Базовый граф квазиклеточной сети при моделировании движения самосвалов в карьере



Рис. 18. Визуализация движения самосвалов в карьере

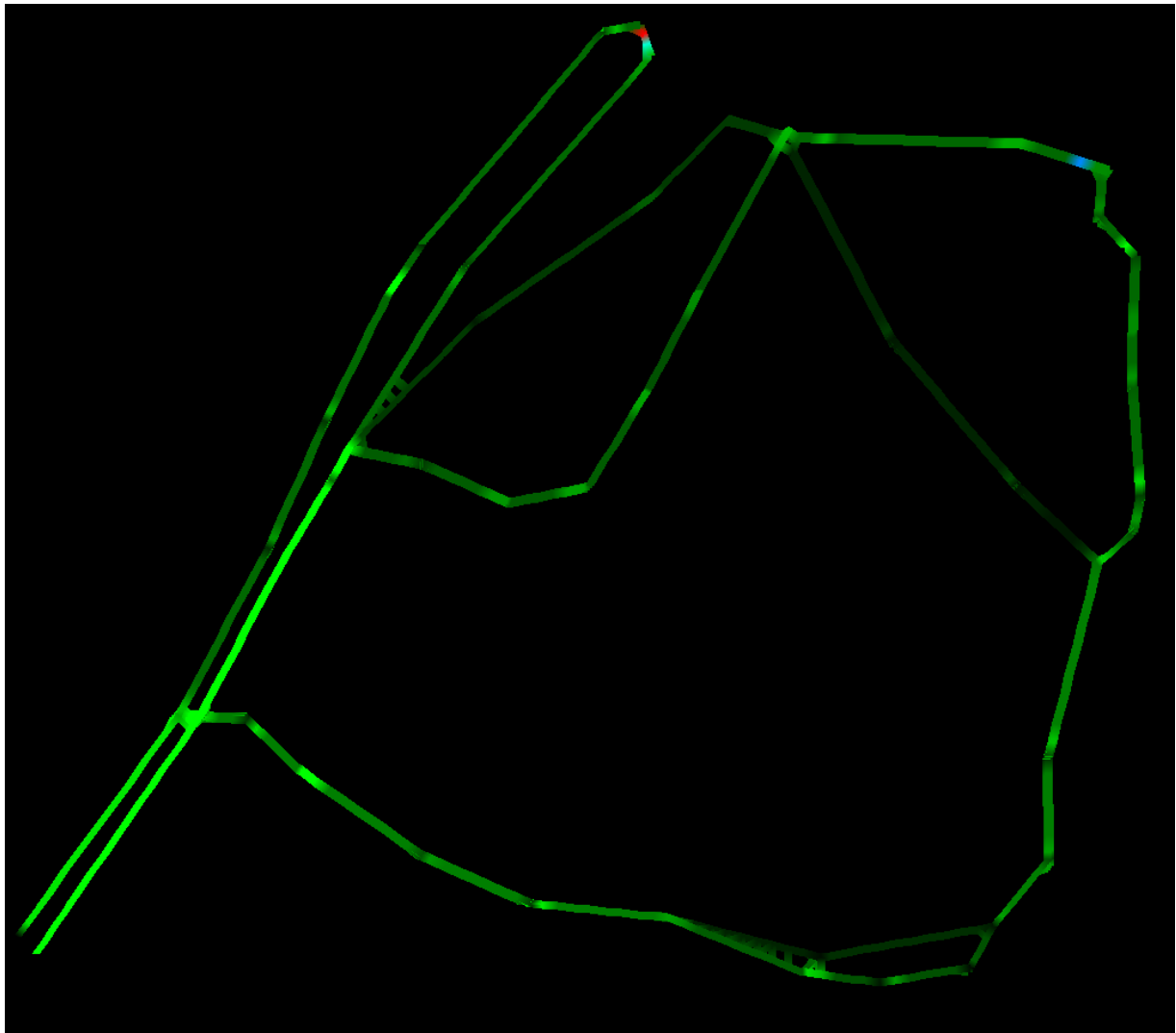


Рис. 19. Представление результатов моделирования карьера
в виде тепловой карты

Заключение

В работе рассмотрены вопросы разработки среды визуального моделирования и анализа потоковых систем на основе квазиклеточных сетей. Квазиклеточные сети представляют собой дискретные структуры, не имеющие явно заданной сигнатуры, и предназначенные для моделирования потоковых систем на микро- и макроуровне в рамках единой модели. Следует отметить, что построение квазиклеточных сетей основано на идеях, связанных с визуализацией графов, визуализацией клеточных автоматов и ещё рядом приёмов, характерных для геометрического моделирования и компьютерной

визуализации. Поскольку квазиклеточные сети представляют собой математическое обеспечение компьютерного моделирования потоковых систем, на практике рассматривается именно их машинная реализация. В настоящее время разработана программная среда визуального моделирования и анализа потоковых систем, адаптируемая под различные предметные интерпретации потоковых систем и их моделирование на дискретных структурах.

Литература

1. Зельдович Я.Б. Высшая математика для начинающих и её приложения к физике – М.:Наука, 1968. – 576с.
2. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учеб. пособие / А.В. Гасников, С.Л. Кленов, Е.А. Нурминский, Я.А. Холодов, Н.Б. Шамрай; Приложения: М.Л. Бланк, Е.В. Гасникова, А.А. Замятин и В.А. Малышев, А.В. Колесников, А.М. Райгородский; Список литературы Под ред. А.В. Гасникова. — М.:МФТИ, 2010. — 362 с.ISBN 978-5-7417-0334-2
3. Лидовский В.В. Теория информации:Учебное пособие. —М.:Компания Спутник+, 2004. — 111 с.
4. Альтшуллер Г. Творчество как точная наука. Теория решения изобретательских задач. – Петрозаводск: Скандинавия, 2004. — 131с.
5. Аристов А.О. Теория квазиклеточных сетей : научная монография — М: МИСиС, 2014. — 188с. ISBN 978-5-600-00321-7
6. Аристов А.О. Методы синтеза квазиклеточных сетей // Научный вестник МГГУ. - 2013. - № 9 (42). - С. 16-21.
7. Аристов А.О. Об элементах квазиклеточных сетей // Горный информационно-аналитический бюллетень : научно-технический журнал. – 2013. – №11 . — С.322-332
8. Горбатов В.А. Фундаментальные основы дискретной математики. — М.:Физматлит, 1999. — 544с.
9. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. — М.:Мир, 1978. — 432 с.

10. Петров А.Е. Тензорный метод двойственных сетей– М.: ООО «Центр информационных технологий в природопользовании», 2007. –496 с.:ил.
11. Аристов А.О. Циркуляция в квазиклеточных сетях и их классификация // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – №9. — С.188-194
12. Фёдоров Н.В. Математическое и имитационное моделирование сложных систем – М.:МГИУ, 2015. – 213 с.
13. Аристов А.О. Поток в квазиклеточных сетях // Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление. — Электрон. Журн. — 2013. — №3(20).—С. 36-41. — Режим доступа: <http://www.rupravlenie.ru>.
14. Аристов А.О. Программный комплекс синтеза, анализа и моделирования работы координатных квазиклеточных сетей с бинарным состоянием // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016662128
15. Аристов А.О. Геометрическое моделирование и визуализация данных моделирования в квазиклеточных сетях // Научная визуализация (Scientific Visualization) №5'2014 – С.81-87.
16. Аристов А.О. О некоторых приложениях квазиклеточных сетей в задачах компьютерного моделирования потоковых систем // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 4. С. 205-217.
17. Аристов А.О. Квазиклеточные сети и их приложения в задачах моделирования посетителей объектов массового пребывания людей // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – т. 6, № 2. – С. 285-294

Сведения об авторах

Аристов Антон Олегович

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Рабочий адрес: 119049, Москва, Ленинский пр., 4

Ученая степень, звание: к.т.н.

Должность: доцент

Электронная почта: batan-87@mail.ru

SPIN-код: 6925-2672