УДК
519.179.2:
004.925.8

**А.О. Аристов**

# О НЕКОТОРЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ КВАЗИКЛЕТОЧНЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВЫХ СИСТЕМ*

Рассмотрен особый тип дискретных структур не имеющих явно заданной сигнатуры – квазиклеточные сети. Указанные дискретные структуры предназначены для компьютерного моделирования на микро- и макроуровне и визуализации потоковых систем в различных предметных интерпретациях. Рассмотрены примеры представления моделей и моделирования распространенных ситуаций – очередей на обслуживание (обработку), задержки потоков при обработке.

Ключевые слова: поток, потоковая система, квазиклеточные сети, моделирование, визуализация, дискретные структуры.

## Введение

В работах автора [1, 2, 3] предложен новый тип дискретных структур – квазиклеточные сети. Указанные дискретные структуры предназначены для компьютерного моделирования систем, поведение которых сводится к распространению потоков в пространстве.

*Определение 1.* Статической структурой двухмерной координатной квазиклеточной сети называется дискретная структура, включающая в себя множество $Q = \{Q_1, Q_2, \ldots, Q_n\}$ круговых областей в двухмерном пространстве, имеющих радиус $R$, каждая из которых взвешена соответственно элементами из множеств $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$, $Y = \{y_1, y_2, \ldots, y_n\}$. Тогда для каждой $Q_u \in Q$ найдется хотя бы одна $Q_v \in Q$ $(u, v = 1, 2, \ldots, n; u \neq v)$ такая, что выполняется условие

$$(x_u - x_v)^2 + (y_u - y_v)^2 \leq 4R^2 .$$

Первоначальное представление о статической структуре квазиклеточной сети дается на основе построения ей элементов (клеток) на ребрах графа – базового графа квазиклеточной сети (рис. 1).

* Выполнено при поддержке РФФИ. Тема № 15-08-06453А.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 205–217.
© 2017. А.О. Аристов.

Каждая клетка квазиклеточной сети как область пространства может содержать некоторый микрообъект. Параметры клетки и микрообъекта образуют ее 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 $B_i = (B_1, B_2, \ldots)$ – неизменные (базовые) параметры клетки (от англ. Basic); $C_i = (C_1, C_2, \ldots)$ – параметры клетки, изменяющиеся при прохождении объектов через клетку (от англ. Changeable); $S_i = (S_1, S_2, \ldots)$ – 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* – счетчик микрообъектов, проходящих через клетку. Квазиклеточные сети с рассмотренной структурой клетки называются квазиклеточными сетями с бинарным состоянием.

Введем модельное время $t = 0, \theta, 2\theta, 3\theta, \ldots$, где $\theta$ – 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:

$$P(Q_u, Q_v) = P(x_u, y_u, x_v, y_v) =$$

$$= \begin{cases} 0, при\,(x_u - x_v)^2 + (y_u - y_v)^2 > 4R^2 \cdot \\ 1, при\,(x_u - x_v)^2 + (y_u - y_v)^2 \le 4R^2 \end{cases}$$

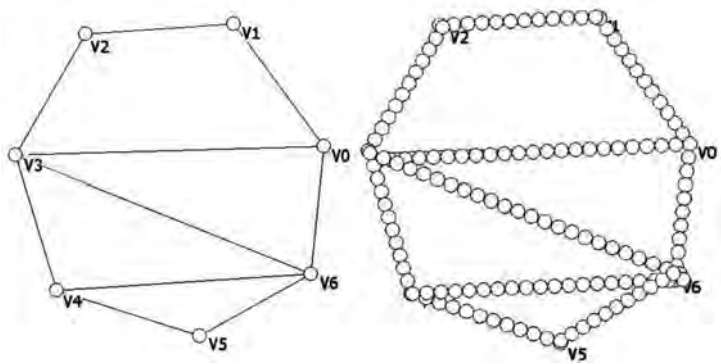



*Рис. 1. Квазиклеточная сеть и ее базовый граф*

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

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

$$\begin{cases} S_u(t) = S \\ P(Q_u, Q_v) = 1 \end{cases} \to \begin{cases} S_v(t+\theta) = S_u(t) \\ S_u(t+\theta) = \overline{S} \end{cases},$$

где $S$ – некоторое передаваемое (потокообразующее) состояние, $\overline{S}$ – 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.

Таким образом, квазиклеточная сеть представляет собой динамическую дискретную структуру.

Квазиклеточные сети предназначены для компьютерного моделирования систем (в различных интерпретациях), поведение которых сводится к распространению потоков в ограниченном пространстве. В различных интерпретациях поток рассматривается как совокупность взаимодействующих потокообразующих микрообъектов, поведение каждого их которых описывает поток в целом. Далее рассмотрим некоторые приложения квазиклеточных сетей, достаточно распространенные в различных предметных областях [1].

**Моделирование прохождения через области задержки**

Распространенной ситуацией является прохождение потока через некоторые области, обеспечивающие его задержку. Примерами подобных ситуаций является прохождение потока людей через турникеты, прохождение транспортных средств через терминалы платных дорог [3, 4]. Также примером является выполнение какой-либо технологической операции на конвейере.

Рассмотрим пример моделирования потоков на объекте массового пребывания людей (рис. 2). На первом этапе определяется представление объекта в виде модели квазиклеточной сети. В данном случае квазиклеточная сеть синтезируется методом базового графа (рис. 3). В базовом графе ребра моделируют траектории движения потока. Синтезированная квазиклеточная сеть представлена на рис. 3.

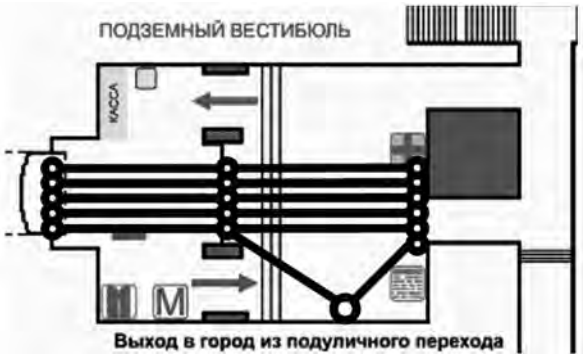



*Рис. 2. Представление объекта массового пребывания людей в виде базового графа*

В отличие от аналогичных моделей на основе клеточного автомата здесь предполагается разделение каждого ребра графа на «клетки». Если клеточный автомат предполагает, что на клетки разбито все пространство, то здесь разбиты отдельные ребра. Чаще всего на объектах массового пребывания людей, транспортных и промышленных системах встречаются ситуации с линейными областями (очереди, коридоры, переходы, линейные участки дорог, конвейеры).

Каждая клетка рассматривается как единица пространства, заполняемая единицей потока.

Квазиклеточные сети позволяют рассматривать как замкнутые системы (предполагающие циркуляцию некоторого неизменного количества потокообразующих объектов), так и разомкнутые, в которых потокообразующие объекты приходят из-за границ системы (из внешней среды). В случае разомкнутых систем используются генераторы и стоки, моделирующие взаимо-

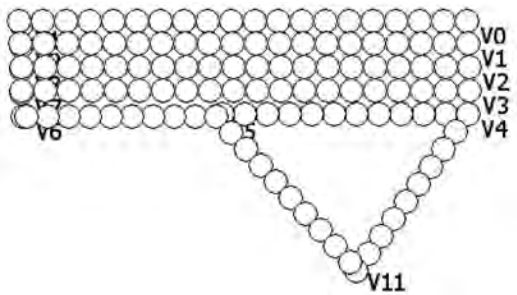



*Рис. 3. Представление объекта массового пребывания людей квазиклеточной сетью*

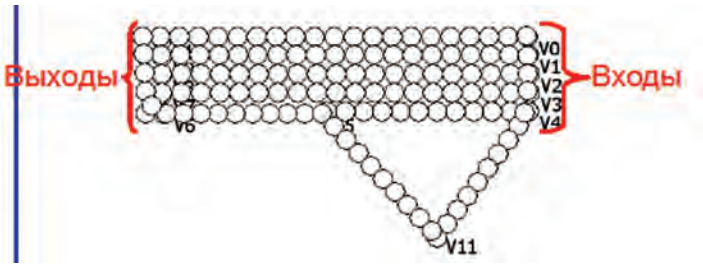



*Рис. 4. Границы системы*

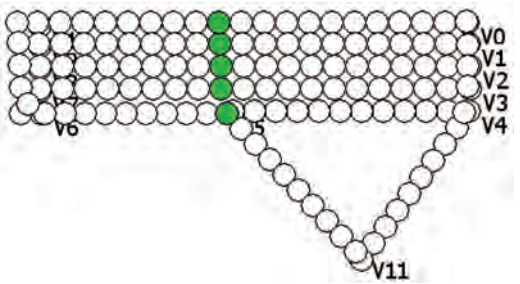



*Рис. 5. Клетки задержки (турникеты)*

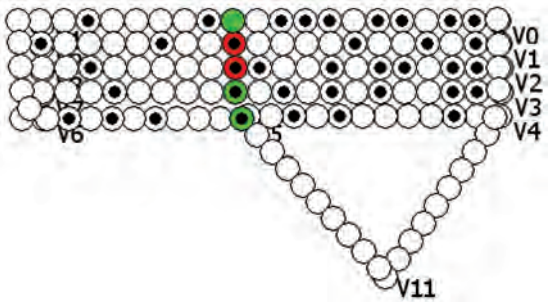



*Рис. 6. Пример визуализации потоков в системе*

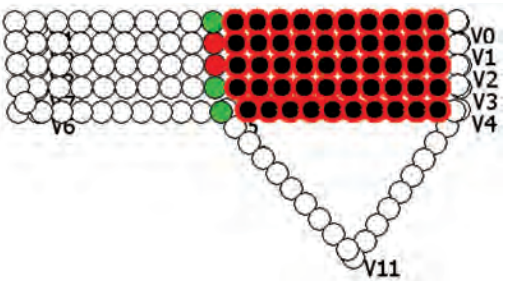



*Рис. 7. Измерительный участок*

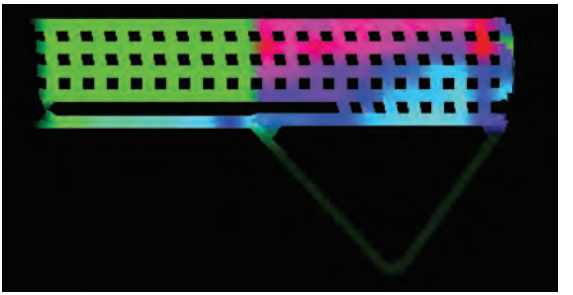


*Рис. 8. Нагрузка на участки потоковой системы (величина потока за время)*

действие моделируемой потоковой системы (в установленных границах) с внешней средой (рис. 4). Пропускная зона моделируется множеством клеток-турникетов (клеток задержки) (рис. 5).

Разработанная модель позволяет получить мгновенные значения параметров каждой клетки (области пространства), а также визуализировать текущее состояния потоков в системе (рис. 6). Кроме мгновенных параметров клеток, модель пригодна как для получения данных с группы клеток (измерительного участка) (рис. 7). В рассматриваемом примере моделируется количество посетителей объекта массового пребывания в очереди к турникетам. Данные, получаемые с измерительных участков используются для дальнейшей статистической обработки, а также так и для визуализации текущего состояния (рис. 6), в виде графиков (рис. 8), тепловых карт (рис. 9) и т.д.

*Рис. 9. Количество микрообъектов на измерительном участке (текущее и среднее количество)*

В выбранной части потоковой системы (предприятия/стадиона/станции метро/участка технологической схемы и т.д.) позволяет провести измерения количества потокообразующих микрообъектов в каждый момент времени; средняя величина потока; интенсивность, плотность потока; время ожидания и др. [5].

Кроме того, рассмотренная модель позволяет получить как характеристики микроуровня, так и характеристики макроуровня.

**Моделирование очередей**

Выше была рассмотрена распространенная ситуация, связанная с моделированием турникетов, которые обеспечивают задержку потоков (в различных интерпретациях) с течением времени. Особое внимание в таких задачах уделялось исследованию областей, в которых возникает скопление потокообразующих объектов перед клетками задержки. Фактически клетки задержки моделируют какое-либо продолжительное обслуживание или преобразование потоков в потоковых системах. Рассмотрим ситуацию, когда на пути распространения потока установлены один или несколько клеток задержки (пунктов обслуживания). Подобные ситуации достаточно часто встречаются в промышленных, логистических и других системах массового обслуживания.

Примерами подобных систем является обслуживание очереди покупателей в магазине несколькими кассами; заполнение карьерных самосвалов несколькими погрузчиками; работа нескольких мастеров на конвейере и др.

Базовый граф для описанных ситуаций для случая трех турникетов (независимо от предметной интерпретации) приведен на рис. 10. Ребро (V1, V2) моделирует пространство очереди; (V2, V0), (V2, V3), (V2, V4) моделируют области распространения потока после обслуживания на турникете и до выхода из системы.

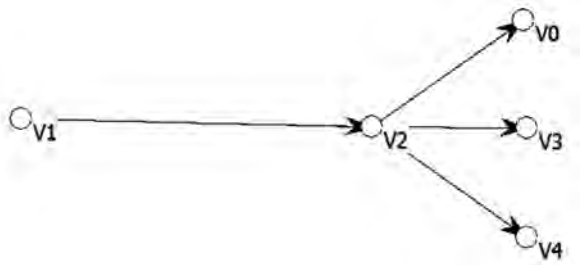



*Рис. 10. Базовый граф для очереди на обслуживание*

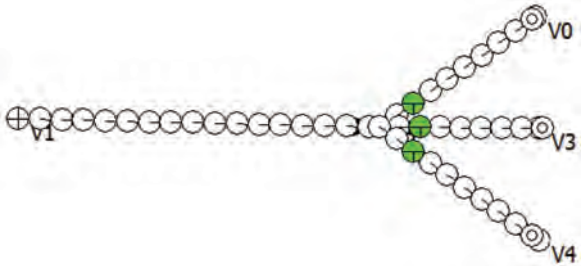



*Рис. 11. Квазиклеточная сеть для моделирования очереди*

Таким образом синтезируем квазиклеточную сеть (рис. 11), содержащую источник (генератор), 3 стока, 3 турникета. Предлагаемая квазиклеточная сеть позволяет моделировать ряд систем, связанных с обслуживание одной очереди несколькими «операторами» (различных предметных интерпретациях). Модель позволяет изменять плотность потока (свойство генератора); перекрывать доступ к одному или нескольким турникетам; варьировать время обслуживания турникетов.

Подобные манипуляции позволяют оценить потенциальную нагрузку на указанную систему (ее пропускную способность), количество микрообъектов, ожидающих обслуживания и т.п.

Рассмотрим примеры варьирования параметрами системы. Описание результатов моделирования приведено в таблице. При расчете используется измерительный участок, приведенный на рис. 12. Моделирование будем осуществлять в течение 300 тактов модельного времени. Также в таблице приведены данные о количестве микрообъектов, прошедших в системе от истока к стоку в течение времени моделирования [6, 7].

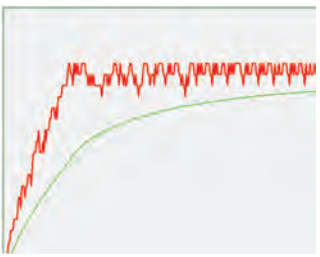
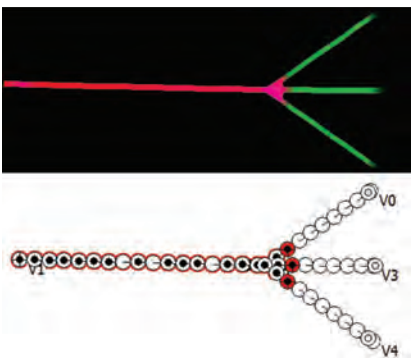
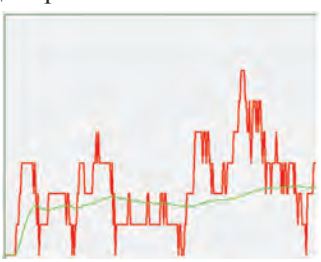
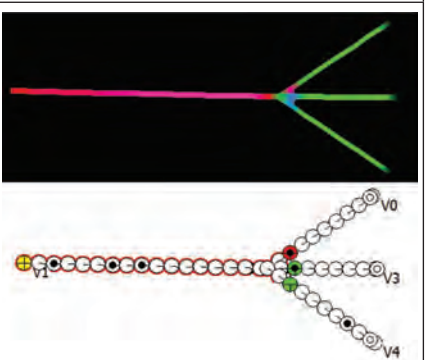
Отдельно следует остановится на некоторых ситуациях, представленных в результатах моделирования (таблица) на графиках и тепловых картах [8]. Визуализация на тепловых картах

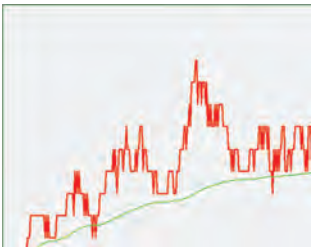
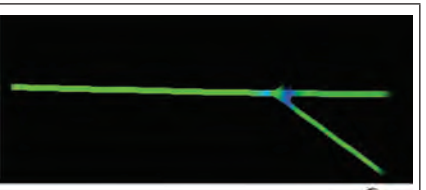
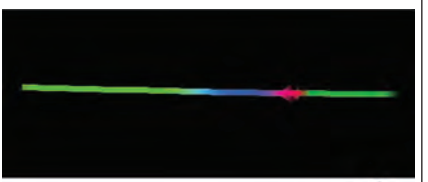
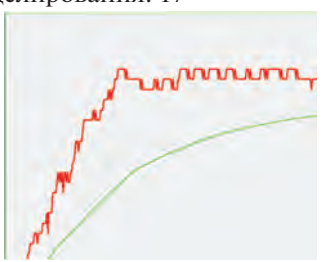
*Рис. 12. Измерительный участок*

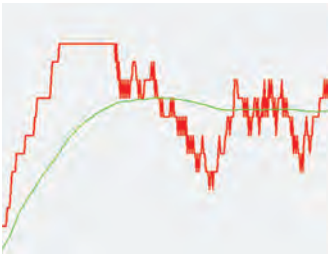
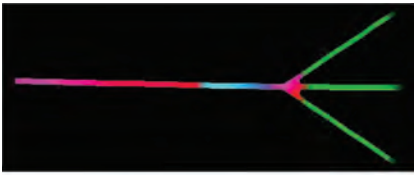
*Рис. 13. Относительная цветовая шкала*

осуществляется в относительной цветовой шкале (рис. 13). Согласно приведенной шкале участки квазиклеточной сети, на которых за время моделирования находится наибольшее число потокообразующих микрообъектов (наибольшая нагрузка на участок), обозначаются красным. К этой категории относятся участки, заполняемые микрообъектами, ожидающими обслуживания (перехода в клетку задержки).

***Примеры моделирования очередей***

| **Описание, график зависимости количества фишек от времени** | **Визуализация состояния, тепловая карта (относительная шкала)** |
|---|---|
| Вероятность появления фишки каждый такт модельного времени на генераторе 50%<br>Прошло микрообъектов за время моделирования: 52<br>  |  |
| Вероятность появления фишки каждый такт модельного времени на генераторе 10%<br>Прошло микрообъектов за время моделирования: 20<br>  |  |

| | |
|---|---|
| Вероятность появления фишки каждый такт модельного времени на генераторе 10%<br>работает 2 турникета из 3<br>Прошло микрообъектов за время моделирования: 21<br>  |  <br> |
| Вероятность появления фишки каждый такт модельного времени на генераторе 10%<br>работает 1 турникет из 3<br>Прошло микрообъектов за время моделирования: 14<br> |  <br> |
| Вероятность появления фишки каждый такт модельного времени на генераторе 20%<br>работает 1 турникет из 3<br>Прошло микрообъектов за время моделирования: 17<br>  | <br> |

| | |
|---|---|
| Вероятность появления фишки каждый такт модельного времени на генераторе 20%<br>работают все турникеты<br>До момента некоторого момента времени доступ к турникетам закрыт<br>Прошло микрообъектов за время моделирования: 29<br>  |  <br> |

Отдельно рассмотрим представление некоторых ситуаций на графиках, полученных как результат моделирования (рис. 14). На представленной кривой отмечено перекрытие участка в направлении микроциркуляции, что приводит к его наполнению микрообъектами. Рассматриваемые графики позволяют оценивать загруженность участка квазиклеточной сети, в т.ч. оценивать пиковые нагрузки. Кроме того, на графике (рис. 14) представлена кривая среднего количества микрообъектов на участке (с течением времени).

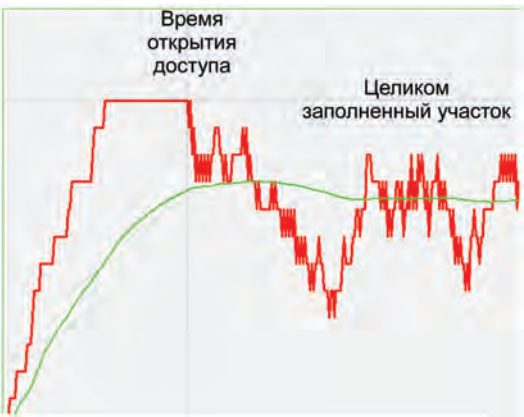



*Рис. 14. Интерпретация графика*

## Заключение

Рассмотренные выше ситуации являются наиболее распространенными примерами потоковых систем, моделируемых квазиклеточными сетями. Следует отметить, что при разработке моделей реальных систем необходимо выбрать масштаб модельного времени, а также определить размеры клетки как области пространства. Несмотря на это, разобранные примеры показывают возможности квазиклеточных сетей в ряде задач моделирования потоковых систем, а именно моделировании очередей, систем массового обслуживания, объектов массового пребывания людей и других. Основная идея моделирования и представления моделей потоковых систем квазиклеточными сетями основана на аналогии потоковых систем в различных предметных интерпретациях, где поток рассматривается как множество потокообразующих микрообъектов. В таком виде модели позволяют не только получить микро- и макропараметры потоковых систем, но и осуществлять их визуализацию. Особое внимание при визуализации результатов уделено графикам и тепловым картам. Таким образом, интерпретация результатов моделирования (в т.ч. в визуализированном виде) позволяет решать широкий круг задач (достигать различных целей моделирования), связанных с получением мгновенного состояния потоковых систем во времени, оценивать величину потока, пропускную способность и другие характеристики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аристов А.О.* Теория квазиклеточных сетей: научная монография. – М.: МИСиС, 2014. – 188 с.

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

3. *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.

4. *Еремин В.М.*, *Аристов А.О.* Компьютерные системы поддержки принятия решений по управлению транспортными потоками на автомобильных дорогах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 11. – С. 341–344.

5. *Федоров Н.В.* Математическое и имитационное моделирование сложных систем – М.:МГИУ, 2015. – 213 с.

6. *Кристофидес Н.* Теория графов. Алгоритмический подход. – М.: Мир, 1978. – 432 с.

7. *Аристов А.О.* Потоки в квазиклеточных сетях // Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление. – Электрон.

Журн. – 2013. – № 3(20). – С. 36–41 – Режим доступа: www.rypravlenie.ru/wp-content/uploads/2013/10/04-Aristov.pdf

8. *Аристов А.О.* Геометрическое моделирование и визуализация данных моделирования в квазиклеточных сетях // Научная визуализация (Scientific Visualization). – 2014. – № 5. – С. 81–87. ГИАБ

**КОРОТКО ОБ АВТОРЕ**

*Аристов Антон Олегович* – доцент, e-mail: batan-87@mail.ru,
НИТУ «МИСиС».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 4, pp. 205–217.

UDC
519.179.2:
004.925.8

**A.O. Aristov**

# ABOUT THE APPLICATIONS OF QUASI-CELLULAR NETS IN COMPUTER-AIDED SIMULATIONS OF FLOW-BASED SYSTEMS

It considered special type of discrete structures named Quasi cellular nets. These discrete structures may be used for computer-aided simulation and visualization of flow-based systems in different subject areas on micro and macro levels. It also considered samples of widespread situations – queue to services (processing), delay flows on processing.

Key words: flow, flow-based system, quasi-cellular net, simulation, visualization, discrete structures.

**AUTHOR**

*Aristov A.O.*, Assistant Professor, e-mail: batan-87@mail.ru,
National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

**ACKNOWLEDGEMENTS**

Made with the support of the Russian Foundation for Basic Research, Topic No. 15-08-06453A.

**REFERENCES**

1. Aristov A.O. *Teoriya kvazikletochnykh setey*: nauchnaya monografiya (Теория квазиклеточных сетей: научная монография), Moscow, MISiS, 2014, 188 p.

2. Aristov A.O. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 2, pp. 125–131.

3. Aristov A.O. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*. 2014, vol. 6, no 2, pp. 285–294.

4. Eremin V.M., Aristov A.O. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2011, no 11, pp. 341–344.

5. Fedorov N.V. *Matematicheskoe i imitatsionnoe modelirovanie slozhnykh sistem* (Математическое и имитационное моделирование сложных систем), Moscow, MGIU, 2015, 213 p.

6. Kristofides N. *Teoriya grafov. Algoritmicheskiy podkhod* (Теория графов. Алгоритмический подход), Moscow, Mir, 1978, 432 p.

7. Aristov A.O. *Ustoychivoe innovatsionnoe razvitie: proektirovanie i upravlenie*. 2013, no 3(20), pp. 36–41, available at: www.rypravlenie.ru/wp-content/uploads/2013/10/04-Aristov.pdf

8. Aristov A.O. *Nauchnaya vizualizatsiya*. 2014, no 5, pp. 81–87.