

24. Vladimirova D.B. Indeks fraktal'nosti v issledovaniyakh determinirovannosti diskretnykh vremennykh ryadov [The index of fractality in the study of a deterministic discrete time series], *Science and Business: Development Ways*, 2015, No. 8 (50), pp. 86-91.
25. Dubovikov M.M., Starchenko N.V. and Dubovikov M.S. Dimension of the minimal cover and fractal analysis of time series, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2004, Vol. 339, Issues 3-4, pp. 591-608.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Тютиков.

Клевцов Сергей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: sergkmps@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 88634328025; к.т.н.; доцент.

Klevtsov Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: sergkmps@mail.ru; 81, Petrovsky street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634328025; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 519.178

DOI 10.23683/2311-3103-2019-4-15-26

Е.М. Герасименко

**НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ НАХОЖДЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО
ДИНАМИЧЕСКОГО ПОТОКА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЭВАКУАЦИИ
ЗДАНИЙ***

Данная статья посвящена решению важной задачи эвакуации зданий, а именно, эвакуации максимального количества пострадавших из опасных зон в безопасные в течение заданного временного интервала. Построенная модель эвакуируемого здания представлена транспортной сетью с динамической структурой, так как пропускные способности и параметры времени прохождения потока могут меняться во времени. Кроме того, вершины транспортной сети имеют веса, ограничивающие максимальное количество людей, которые могут находиться в данной вершине-помещении. Нечеткий и неопределенный характер параметров сети ведет к постановке задачи в нечетких условиях, что позволяет моделировать реальную ситуацию эвакуации, при которой пропускные способности дуг в различные временные отрезки точно не известны, а могут быть оценены приблизительно, в некотором интервале и пр. Это приводит к заданию пропускных способностей дуг в нечетком виде. Особенностью алгоритма также является возможность учитывать веса вершин транспортной сети; это реализуется путем замены вершины с пропускной способностью двумя вспомогательными вершинами, дуга между которыми имеет пропускную способность, равную исходной пропускной способности вершины. Решен численный пример, иллюстрирующий работу предложенного алгоритма. Результаты, полученные в ходе решения задачи эвакуации с помощью предложенного алгоритма, могут применяться на практике при решении задач эвакуации зданий в условиях, когда точно не известно количество эвакуируемых и нужно перевести максимально возможное число пострадавших в безопасные зоны, учитывая изменяющиеся во времени пропускные способности и ограничения на вместимость помещений.

Задачи эвакуации зданий; нечеткая транспортная сеть; моделирование эвакуации.

Е.М. Gerasimenko

**FUZZY MODEL FOR THE MAXIMUM DYNAMIC FLOW FINDING
FOR SOLVING THE TASK OF EVACUATION FROM BUILDINGS**

This article is devoted to solving the important task of evacuation from building, particularly, evacuating the maximum number of victims from dangerous areas to safe ones within a given time interval. The constructed model of the evacuated building is represented by a transportation network with a dynamic structure, since the capacities and parameters of the flow time can vary in time. In addition, the

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-01-00559 а).

nodes of the transportation network have weights that limit the maximum number of people who can be arranged in a given vertex-room. The fuzzy and uncertain nature of the network parameters leads to the problem statement in fuzzy conditions, which allows simulating a real evacuation situation, in which the arc capacities in different time intervals are not exactly determined, however can be estimated approximately, in a certain interval, etc. This leads to the necessity of the specifying arcs in a fuzzy form. A feature of the algorithm is the ability to take into account the weights of the vertices of the transportation network; this is accomplished by replacing the vertex with the arc capacity with two auxiliary vertices, the arc between which has capacity equal to the initial capacity of the vertex. The numerical example illustrating the operation of the proposed algorithm is solved. The results obtained in the course of solving the evacuation task using the proposed algorithm can be applied in practice to solve the building evacuation tasks in uncertain conditions, where the exact number of evacuees is not known and the maximum possible number of evacuees must be transferred to safe zones, taking into account the time-varying capacities and limitations on the capacity of the rooms.

Tasks of evacuation from building; fuzzy transportation network; evacuation simulation.

Введение. Задачи составления оптимальных планов эвакуации представляют огромный интерес для исследователей благодаря их первостепенной важности при спасении людей. Эвакуация представляет собой процесс перевозки пострадавших из опасных зон в безопасные таким образом, чтобы минимизировать время перевозки, увеличить количество эвакуируемых, перевезти пострадавших как можно быстрее в каждый из заданных промежутков времени в зависимости от задачи, конкретной чрезвычайной ситуации, времени эвакуации и пр. Существуют несколько групп методов, которые могут применяться при решении задач моделирования эвакуации. Среди них выделяют методы теории графов, оперирующие теорией потоков, методы имитационного моделирования, такие как клеточные автоматы. Одна из наиболее важных областей исследования связана с эвакуацией зданий. В этой задаче модель здания представляется транспортной сетью, вершинами которой могут быть комнаты, холлы, а дугами – коридоры, ступеньки и пр. Такие модели могут иметь несколько начальных вершин-источников и одну конечную вершину – сток.

Важными задачами, возникающими в данной области исследования, являются задачи транспортировки максимального количества пострадавших в безопасные зоны, минимизации общего времени транспортировки, нахождения самых безопасных маршрутов **транспортировки** и др. Описанные постановки задач относятся к макроскопическим моделям, так как индивидуальные характеристики эвакуируемых, такие как поведение, скорость реакции, время эвакуации не учитываются.

При решении задач моделирования процесса эвакуации исследователи часто сталкиваются с проблемами отсутствия актуальной информации о количестве эвакуируемых. Учитывая заданный временной горизонт, данная задача может быть сведена к перевозке максимально возможного числа пострадавших в течение заранее установленного интервала, следовательно, приходят к задачам нахождения максимального динамического потока.

Исходными данными для такой задачи являются динамические модели зданий. Традиционная структура рассматриваемых транспортных сетей предполагает частично динамический характер сетей, при котором учитываются только временные параметры.

В прикладных задачах эвакуации необходимо учитывать возможность пропускных способностей сети и временных параметров изменяться в зависимости от времени отправления потока. Действительно, пропускные способности в различные временные промежутки могут уменьшаться или даже быть заблокированными в силу пожара или задымления. Такие ситуации приводят к динамическим пропускным способностям. Аналогичная ситуация имеет место с временным интервалом: из-за возможной блокировки пропускных способностей или уменьшения их величин временные параметры также могут изменяться в зависимости от времени отправления потока.

Таким образом, мы приходим к динамическим транспортным сетям, пропускные способности которых ограничивают максимально возможное количество эвакуируемых, которые могут быть доставлены из одной вершины в другую.

Исследуя структуру сетей как основу эвакуации зданий часто возникает ситуация, когда вершины рассматриваемой модели имеют ограничения на количество эвакуируемых, которые могут быть размещены в конкретной вершине. Данные условия неизбежны в силу ограниченного пространства комнат. Данная ситуация приводит к изменению структуры сети таким образом, что позволяет оперировать графом без весов, приписанных вершин, а рассматривать только весовые параметры дуг графа.

При моделировании процесса эвакуации исследователь часто сталкивается с неопределённой и нечёткой природой параметров сети. Эксперт может только оценить пропускные способности, уровень их уменьшения, время перевозки в условиях чрезвычайных ситуаций, когда инциденты происходят одновременно.

Эти ситуации приводят к необходимости рассмотрения динамических сетей в нечетких условиях и оперирования параметрами как нечёткими числами.

Обзор источников. Первой фундаментальной задачей, возникшей в процессе исследования задач эвакуации, была задача нахождения максимального динамического потока, впервые предложенная Фордом и Фалкерсоном [1]. Ее актуальность заключается в эвакуации максимально возможного числа пострадавших их опасных зон. Распространены подходы, базирующиеся на нахождении кратчайших путей [2–4], так как они позволяют находить лучшие пути согласно некоторым критериям, таким как стоимость, время перевозки, уровень удобства. Такие параметры, как погодные условия, влияют на выбор оптимальных путей и имеют динамическую природу.

Задачи нахождения потоков минимальной стоимости обобщают проблему нахождения кратчайших путей путем пересылки потока по кратчайшим путям и определением оптимальной стоимости транспортировки исходного количества единиц потока

В работах [5–6] было предложено расширить традиционную постановку задачи эвакуации в чрезвычайных ситуациях, применяя распределение напряженных участков дорог для преодоления блокировки потоков и пробок.

Одной из разновидностей динамических потоковых задач является задача наискорейшего прибытия [7]. Суть данной задачи заключается в транспортировке максимально возможного количества эвакуируемых в каждый момент времени из заданного временного горизонта. В статьях [8–10] представлено решение задачи нахождения “контрпотока” на серии параллельных графов. Namacher [11] модифицировал упомянутую проблему для рассмотрения различных уровней приоритетов для различных компонентов транспортной сети.

В статьях [12–13] рассматриваются зависящие от времени задачи наискорейшего прибытия в динамических транспортных сетях.

Однако, несмотря на интенсивные исследования задачи эвакуации в нечётких условиях [14–17] не были рассмотрены в литературе. Хотя изменения в величинах пропускных способностей влияют на структуру моделируемой сети, значения пропускных способностей могут быть уменьшены или даже сведены к нулю в процессе эвакуации по причине блокировки аварийных выходов-стоков, задымлений, огня и пр. [18–19]. Кроме того, пропускные способности вершин-источников транспортной сети могут быть ограничены количеством эвакуируемых, одновременно находящихся в конкретной вершине. Следовательно, актуальна задача макроскопической эвакуации [20–21] максимального числа пострадавших в динамической сети с ограниченными пропускными способностями вершин и дуг в нечётких условиях.

Постановка задачи. Дадим определение динамической сети с весами, приписанными дугам и вершин. Это определение является ключевым определением алгоритма, так как динамическая сеть является моделью реальной транспортной сети для решения задач эвакуации.

Определение 1.

Динамическая сеть в контексте эвакуации $\tilde{G} = (X, \tilde{A})$ – это сеть, состоящая из двух множеств: множество вершин $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ и множество дуг $\tilde{A} = \{ \langle \mu_{\tilde{A}} < x_i, x_j \rangle / \langle x_i, x_j \rangle, \langle x_i, x_j \rangle \in X^2, \mu_{\tilde{A}} < x_i, x_j \rangle$ с заданным значением степени живучести $\mu_{\tilde{A}}(x_i, x_j)$, отражающим степень принадлежности каждой дуги множеству дуг.

Каждой дуге приписана динамическая пропускная способность $\tilde{u}_{ij}(\theta)$ и время перевозки $\tau_{ij}(\theta)$, которое может изменяться в зависимости от времени в связи с задымлением коридоров или пожаром.

Заданный временной горизонт $T = \{0, 1, \dots, p\}$ связан с параметром времени, определяющим необходимость всех единиц потока, отправленных из источника, вернуться в сток не позднее времени p . Каждая вершина графа имеет пропускную способность w_{ij} , ограничивающую максимальное количество эвакуируемых, которые одновременно могут размещаться в вершине.

Основная идея предложенного метода заключается в нахождении путей транспортировки в остаточной сети, полученной из исходной сети и представленной в форме расширенного во времени графа. Кроме того, каждая вершина x_i с заданной пропускной способностью будет заменена двумя вершинами x_i^+ и x_i^- , связанными дугой с пропускной способностью, равной исходной пропускной способности вершины x_i . Исходные пропускные способности сети (x_i, x_j) заменяются дугами вида (x_i^-, x_i^+) , как показано на рис. 1.

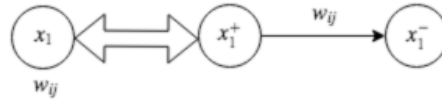


Рис. 1. Переход к двум вершинам

Представим модель эвакуации зданий, основанную на нахождении максимального потока в нечетком динамическом графе с весами вершин

$$\text{Maximize } \tilde{v}(p), \quad (1)$$

$$\sum_{\theta=0}^p \left(\sum_{x_j \in \Gamma(x_i)} \tilde{\xi}_{ij}(\theta) - \sum_{x_j \in \Gamma^{-1}(x_i)} \tilde{\xi}_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta)) \right) = \tilde{v}(p), x_i = s, \quad (2)$$

$$\sum_{\theta=0}^p \left(\sum_{x_j \in \Gamma(x_i)} \tilde{\xi}_{ij}(\theta) - \sum_{x_j \in \Gamma^{-1}(x_i)} \tilde{\xi}_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta)) \right) = \tilde{0}, x_i \neq s, t; \theta \in T, \quad (3)$$

$$\sum_{\theta=0}^p \left(\sum_{x_j \in \Gamma(x_i)} \tilde{\xi}_{ij}(\theta) - \sum_{x_j \in \Gamma^{-1}(x_i)} \tilde{\xi}_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta)) \right) = -\tilde{v}(p), x_i = t, \quad (4)$$

$$\tilde{0} \leq \tilde{\xi}_{ij}(\theta) \leq \tilde{u}_{ij}(\theta), \forall (x_i, x_j) \in \tilde{A}, \theta \in T, \quad (5)$$

$$\xi_{ij} \leq w_j, \forall (x_i, x_j) \in A, \theta \in T. \quad (6)$$

Уравнение (1) в модели эвакуации показывает максимизацию потока значения \tilde{v} за p периодов времени, т.е. $\tilde{v}(p)$. Уравнения (2) и (4) показывают, что равные единицы потока покидают источник и входят в сток и имеют значение $v(p)$. Равенство (3) является условием сохранения потока. Оно показывает, что количество потока, покидающее источник, равно количеству потока, втекающему в сток для всех промежуточных вершин кроме источника и стока. Неравенство (5) является ограничением сверху на значения потоков, ограниченных пропускными способностями. Неравенство (6) – это ограничение на значения потоков вершин (максимальное количество эвакуируемых, одновременно находящихся в вершине).

Разработанный алгоритм решения задачи. Представим алгоритм для решения задачи эвакуации как нахождение максимального динамического потока в нечетких условиях.

Этап 1. Представим исходную динамическую сеть \tilde{G}_0 в виде эвакуационной сети \tilde{G} таким образом, что каждая вершина x_i исходной сети заменяется двумя вершинами x_i^+ и x_i^- , которые связаны дугой с пропускной способностью w_j , равной исходной пропускной способности вершины x_j . Каждой дуге (x_i, x_j) из \tilde{G}_0 , которая инцидента x_j , соответствует дуга (x_i^-, x_j^+) из \tilde{G} , инцидентная x_j^+ . Каждой дуге (x_j, x_k) из \tilde{G}_0 , покидающей x_j , соответствует дуга (x_j^-, x_k^+) из \tilde{G} , покидающая x_j^+ .

Этап 2. Переходим к расширенной версии графа $\tilde{G}_p = (X_p, \tilde{A}_p)$, создавая копию каждой вершины $x_i \in X$ в каждый из моментов времени $\theta \in T$, включая пару вершин (x_i^-, x_i^+) . Множество вершин X_p графа \tilde{G}_p – это множество расширенных пар $X_p = \{(x_i^+, x_i^-, \theta) \in X \times T$. Множество дуг \tilde{A}_p состоит из пары «вершина-время» $X_p = (x_i^+, x_i^-, \theta)$ в каждую пару «вершина-время» $\{(x_j^+, \vartheta = \theta + \tau_{(x_i^+, x_i^-)x_j^+}(\theta)$, где $x_j \in \Gamma(x_i)$ и $\theta + \tau_{(x_i^+, x_i^-)x_j^+}(\theta) \leq p$. Пропускные способности $\tilde{w}(x_i^+, x_i^-, \theta, \theta)$, соединяющие (x_i^+, θ) и (x_i^-, θ) , равны w_i . Нечеткие пропускные способности $\tilde{w}((x_i^+, x_i^-, \theta), (x_j^+, \vartheta))$, соединяющие (x_i^+, x_i^-, θ) с (x_j^+, ϑ) , равны $\tilde{w}_{ij}(\theta)$. Параметры времени $\tau((x_i^+, x_i^-, \theta), (x_j^+, \vartheta))$, соединяющие (x_i^+, x_i^-, θ) с (x_j^+, ϑ) , равны $\tau_{ij}(\theta)$, $w(x_i^+, x_i^-)$ равна w_j . Добавим искусственные источник s' и сток t' и соединим s' и t' дугами с истинными источником и стоком, соответственно. Искусственные дуги имеют бесконечные пропускные способности.

Этап 3. Строим нечеткую остаточную сеть $\tilde{G}_p^\mu = (X_p^\mu, \tilde{A}_p^\mu)$, зависящую от значений потоков, текущих по дугам графа \tilde{G}_p . Каждая дуга остаточной сети \tilde{G}_p^μ , соединяющая $(x_i^{+\mu}, x_i^{-\mu}, \theta)$ и $(x_j^{+\mu}, \vartheta)$ со значением потока $\tilde{\xi}(x_i^+, x_i^-, \theta, x_j^+, \vartheta)$ посланного в момент $\theta \in T$, имеет нечеткую остаточную пропускные способности $\tilde{w}^\mu(x_i^+, x_i^-, \theta, x_j^+, \vartheta) = \tilde{w}(x_i^+, x_i^-, \theta, x_j^+, \vartheta) - \tilde{\xi}(x_i^+, x_i^-, \theta, x_j^+, \vartheta)$. $\tilde{\tau}^\mu(x_i^+, x_i^-, \theta, x_j^+, \vartheta) = \tilde{\tau}(x_i^+, x_i^-, \theta, x_j^+, \vartheta)$ и обратные дуги, соединяющие $(x_j^{+\mu}, \vartheta)$ и $(x_i^{+\mu}, x_i^{-\mu}, \theta)$, имеют нечеткие пропускные способности $\tilde{w}^\mu(x_j^+, \vartheta, x_i^+, x_i^-, \theta) = \tilde{\xi}(x_i^+, x_i^-, \theta, x_j^+, \vartheta)$ и время $\tilde{\tau}^\mu(x_j^+, \vartheta, x_i^+, x_i^-, \theta) = -\tilde{\tau}(x_i^+, x_i^-, \theta, x_j^+, \vartheta)$.

Этап 4. Находим увеличивающий кратчайший путь \tilde{P}_p^μ по количеству дуг из искусственного источника s' в искусственный сток t' в построенной нечеткой остаточной сети \tilde{G}_p^μ . Выбор кратчайшего пути осуществляется в соответствие с поиском в ширину.

4.1. Переходим к этапу 5, если \tilde{P}_p^μ найден.

4.2. Нечеткий максимальный поток $(x_i^+, x_i^-, \theta, x_j^+, \vartheta) + \delta_p^\mu \times P_p^\mu = \tilde{v}(p)$ в расширенном нечётком статическом графе, если путь из s в t нельзя найти, затем переходим к шагу 7.

Этап 5. Передаем максимальное количество потока в зависимости от дуг с минимальной остаточной пропускных способностей $\tilde{\delta}_p^\mu = \min[\tilde{u}(\tilde{P}_p^\mu)]$, $\tilde{u}(P_p^\mu) = \min [\tilde{u}^\mu(x_i^+, x_i^-, \theta, x_j^+, \vartheta)] (x_i^+, x_i^-, \theta, x_j^+, \vartheta) \in P_p^\mu$.

Этап 6. Обновляем нечеткий поток в графе \tilde{G}_p и переходим к этапу 3.

Этап 7. Переходим к исходному динамическому нечёткому графу \tilde{G} , если максимальный поток $\xi(x_i^+, x_i^-, \theta, x_j^+, \vartheta) + \delta_p^\mu \times P_p^\mu = \tilde{v}(p)$ из искусственного источника s в искусственный сток t , заданный множеством путей \tilde{P}_p^μ , найден в \tilde{G}_p : удаляем искусственные вершины и дуги s и t . Следовательно, максимальный поток значения $\tilde{v}(p)$ получен в исходном графе, эквивалентный потоку из источников (исходная вершина, развернутая на p периодов) в стоки (конечная вершин, развернутая на p периодов) в \tilde{G}_p после удаления искусственных вершин. Каждый путь, соединяющий пары “вершина-время” (s, ζ) и $(t, \psi = \zeta + \tau_{st}(\zeta)), \psi \in T$, по которому идет поток $\tilde{\xi}(s, t, \theta, \zeta)$, равен $\tilde{\xi}_{st}(\vartheta)$.

Численный пример. Представим численный пример, отражающий основные шаги метода.

План эвакуации зданий представлен на рис. 2.

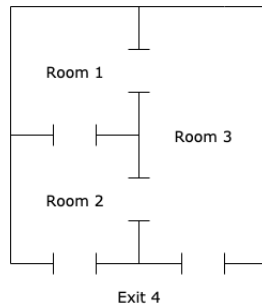


Рис. 2. План эвакуации зданий

Исходная модель эвакуации представлена на рис. 3.

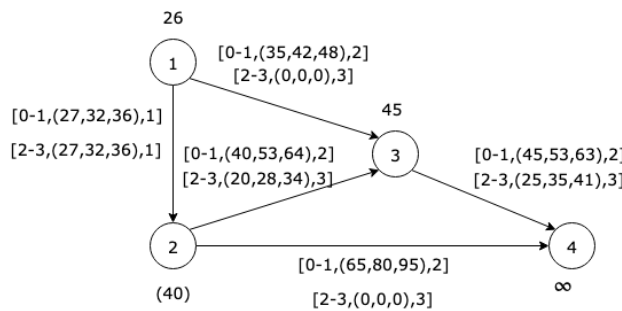


Рис. 3. Исходная сеть для эвакуационного моделирования

Этапы 2-3. Перейдем к расширенной версии исходного динамического графа, как представлено на рис. 4. Вершины во все моменты времени, которые имеют символ «квадрат» рядом с ними, соединены с вершиной-источником и имеют бесконечную пропускную способность.

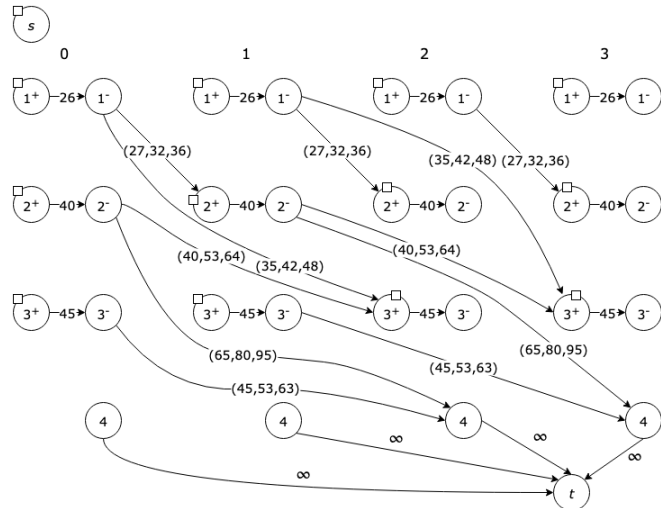


Рис. 4. Динамический граф, соответствующий исходной сети

Этапы 4-5. Находим увеличивающие пути согласно поиску в ширину ($s, 3^+, 3^-, x_4, t$), начиная с 1 периода времени и передаем $(45,45,45)$ единиц потока в качестве максимального потока, как показано на рис. 5.

Этап 6. Обновляем значения потоков в эвакуационной моделируемой сети согласно рис. 5.

Этап 3. Перестроим остаточную сеть в соответствие с посланным потоком и переходим к этапу 4.

Этап 4-5. Находим увеличивающие пути в соответствие с поиском в ширину ($s, 3^+, 3^-, x_4, t$), начиная с 0 периода времени и передаем $(45,45,45)$ единиц потока по нему, как показано на рис. 6.

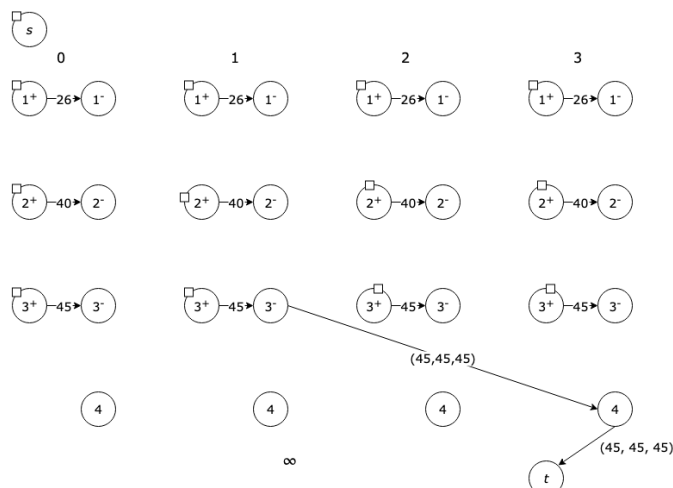


Рис. 5. Расширенная сеть с потоком

Этап 6. Обновляем значения потоков в модели эвакуационной сети в соответствии с рис. 6.

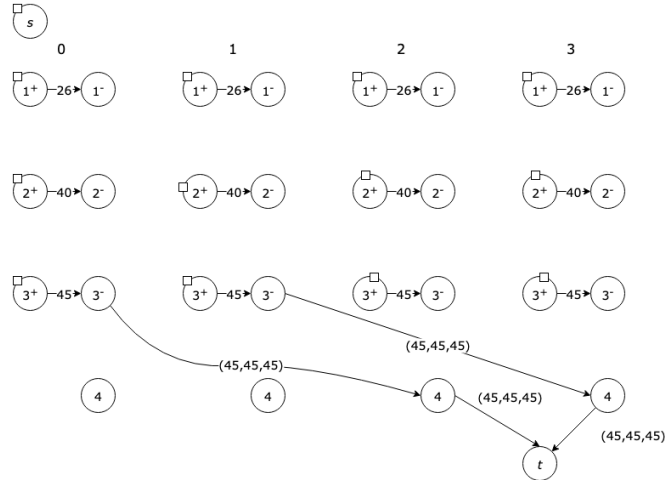


Рис. 6. Расширенная сеть

Этап 3. Перестроим остаточную сеть в соответствии с посланным потоком и переходим к этапу 4.

Этап 4-5. Находим увеличивающие пути в соответствии с поиском в ширину ($s, 2^+, 2^-, x_4, t$), начиная с 0 периода времени и передаем (40,40,40) единиц потока по нему в качестве максимального потока, как показано на рис. 7.

Этап 6. Обновляем значения потоков в моделируемой сети в соответствии с рис. 7.

Этап 3. Перестраиваем остаточную сеть в соответствии с посланным потоком и переходим к этапу 4.

Этапы 4-5. Находим увеличивающие пути согласно поиску в ширину ($s, 1^+, 1^-, 2^+, 2^-, x_4, t$), начиная с 0 периода времени и передаем (26,26,26) единиц потока по нему, как показано на рис. 8.

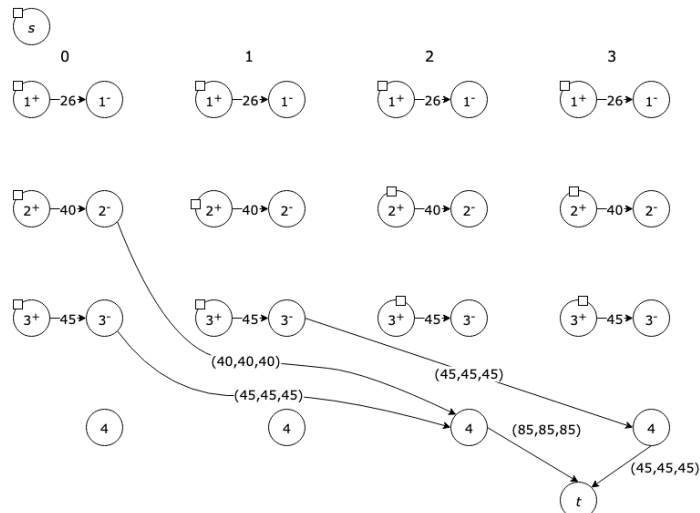


Рис. 7. Расширенная сеть с потоком

Этап 6. Обновляем значения потоков в моделируемой сети в соответствии с рис. 8.

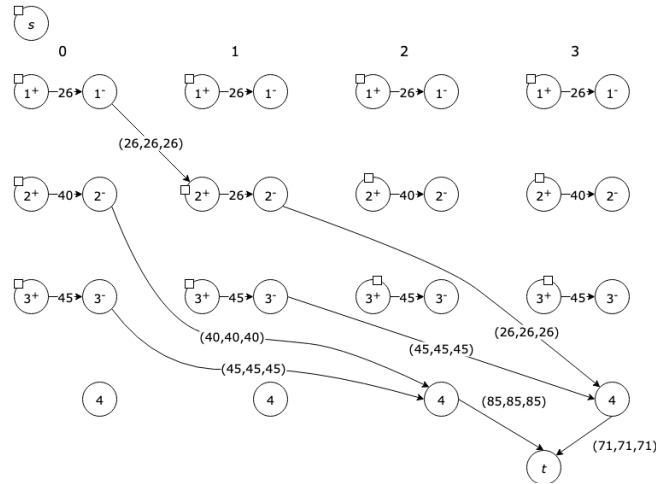


Рис. 8. Расширенная сеть с потоком

Так как мы не можем послать дополнительных единиц потока в моделируемой сети, поток представленный на рис. 8, максимален и равен $(45,45,45)+(45,45,45)+(40,40,40)+(26,26,26)=(156,156,156)$ единиц потока.

Временная сложность алгоритма. Для вычисления временной сложности алгоритма была разработана программная реализация на языке C#. Оценка временной сложности разработанного алгоритма производилась с помощью измерения времени работы его программной реализации для различных входных данных. При этом оценка временная сложность проводилась по количеству ребер графа, учитывающему связи между элементами графа.

На рис. 9 приведен график зависимости времени работы алгоритма от количества ребер в графе.

При построении графика на рис. 9 в качестве времени работы алгоритма был взят 90-й перцентиль для пятидесяти итераций.



Рис. 9. Временная сложность алгоритма

Заключение. Данная статья иллюстрирует метод моделирования максимального потока при решении задач эвакуации в нечетких транспортных сетях в случае, когда общее количество эвакуируемых не указано. Предложенный метод ос-

новывается на нахождении максимального динамического потока в нечёткой динамической сети, в которой пропускные способности и параметры времени могут изменяться во времени. Научная новизна предложенного метода заключается в нечетком характере пропускных способностей дуг сети, а также в возможности вершин сети накапливать поток, что выражается в ограничении на максимальное количество эвакуируемых, которые одновременно могут располагаться в вершине, так как вместительность помещений для эвакуации ограничена. Предложенный алгоритм моделирует реальную задачу эвакуации, так как учитывается зависимость пропускных способностей дуг сети и параметров времени перевозок пострадавших от моментов отправления потока. Рассматриваемый подход имеет важное практическое значение, так как позволяет решать задачи реальной эвакуации зданий, целью которой является эвакуация максимально возможного числа пострадавших в рамках заданного временного интервала. Это позволяет перевести максимально число пострадавших из опасных зон в безопасные, учитывая ограниченные емкости помещений для эвакуации и временные диапазоны эвакуации. В дальнейших исследованиях будут рассмотрены задачи, основанные на методах наискорейшего прибытия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Matuschke J.* Network flows and network design in theory and practice. Ph.D. Thesis, Technical University, Berlin, 2014.
2. *Bozhenyuk A.V., Gerasimenko E.M., Kasprzyk J., Rozenberg I.* Flows in networks under fuzzy conditions // *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. – 2017. – Vol. 346.
3. *Малодушев С.В., Воронов П.В.* Определение оптимальных путей эвакуации из здания // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 10-3. – С. 495-502.
4. *Станкевич Т.С.* Определение оптимального пути спасения людей из горящего здания // *Технологии техносферной безопасности*. – 2013. – № 5. – С. 1-9.
5. *Dhamala T.N.* A survey on models and algorithms for discrete evacuation planning network problems // *Journal of Industrial and Management Optimization*. – 2015. – No. 11. – P. 265-289.
6. *Siebel F., Mauser W., Moutari S., Rasclé M.* Balanced vehicular traffic at a bottleneck // *Mathematical and Computer Modeling*. – 2007. – Vol. 49. – P. 689-702.
7. *Baumann N., Köhler E.* Approximating Earliest Arrival Flows with Flow-Dependent Transit Times. In: Fiala J., Koubek V., Kratochvíl J. (eds.). *Mathematical Foundations of Computer Science 2004. MFCS 2004. Lecture Notes in Computer Science*. Vol 3153. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.
8. *Wang J.W., Wang H. F., Zhang W. J. et al.* Evacuation planning based on the contra flow technique with consideration of evacuation priorities and traffic setup time // *In IEEE Trans. Intell. Trans. Syst.* – 2013. – Vol. 14. – P. 480-485.
9. *Pyakurel U., Nath H.N., Dhamala T.N.* Efficient contraflow algorithms for quickest evacuation planning // *Science China Mathematics*. – Vol. 61, No. 11. – P. 2079-2100.
10. *Lin M, Jaillet P.* On the quickest flow problem in dynamic networks: A parametric min-cost flow approach // *Twenty-Sixth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics. – 2015. – P. 1343-1356.
11. *Hamacher H.W., Heller S., Rupp B.* Flow location (FlowLoc) problems: Dynamic network flows and location models for evacuation planning // *Annals of Operations Research*. – 2013. – Vol. 207. – P. 161-180.
12. *Miller-Hooks E., Patterson S.S.* On solving quickest time problems in time-dependent, dynamic networks // *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*. – 2004. – Vol. 3, No. 1. – P. 39-71.
13. *García-Ojeda J., Bertok B.* Building-evacuation-route planning via time-expanded process-network synthesis // *Fire Safety Journal*. – 2013. – Vol. 61. – P. 338-347.
14. *Kureichik V., Gerasimenko E.* Approach to the Minimum Cost Flow Determining in Fuzzy Terms Considering Vitality Degree. In Silhavy R., Senkerik R., Kominkova Oplatkova Z., Prokopova Z., Silhavy P. (eds) // *Artificial Intelligence Trends in Intelligent Systems. CSOC 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 573. – Springer, Cham, 2017. – P. 200-209.

15. Kureichik V., Gerasimenko E. Multi-Commodity Maximum Flow Determining in a Fuzzy Graph with Vitality Degrees // Proceedings of 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2017, Moscow, Russia. – P. 347-351.
16. Герасименко Е.М. Нахождение потока минимальной стоимости в транспортной сети методом ранжирования математического ожидания нечетких функций стоимостей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 4 (129). – С. 247-251.
17. Герасименко Е.М. Нахождение потоков в транспортных сетях в условиях нечеткости и частичной неопределенности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Таганрог, 2014. – 22 с.
18. Кирик Е.С., Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю., Харламов Е.Б., Малышев А.В. Математическое моделирование эвакуации при пожаре // Математическое моделирование. – 2014. – Т. 26, № 1. – С. 3-16.
19. Самошин Д.А. Состав людских потоков и параметры их движения при эвакуации: монография. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – 210 с.
20. Yusoff M., Ariffin J., Mohamed A. Optimization Approaches for Macroscopic Emergency Evacuation Planning: A Survey // International Symposium on Information Technology. – 2008. – Vol. 3. – P. 1-7.
21. Yueming, C., Deyun, X. Emergency evacuation model and algorithms // Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology. – 2008. – Vol. 8 (6). – P. 96-100.

REFERENCES

1. Matuschke J. Network flows and network design in theory and practice. Ph.D. Thesis, Technical University, Berlin, 2014.
2. Bozhenyuk A.V., Gerasimenko E.M., Kacprzyk J., Rozenberg I. Flows in networks under fuzzy conditions, *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 2017, Vol. 346.
3. Malodushev S.V., Voronov R.V. Opredelenie optimal'nyh putey evakuatsii iz zdaniya [Determination of the optimal ways of evacuation from the building], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental study], 2015, No. 10-3, pp. 495-502.
4. Stankevich T.S. Opredelenie optimal'nogo puti spaseniya lyudey iz goryashchego zdaniya [Determination of the optimal way to rescue people from a burning building], *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* [Technology of technosphere safety], 2013, No. 5, pp. 1-9.
5. Dhamala T.N. A survey on models and algorithms for discrete evacuation planning network problems, *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2015, No. 11, pp. 265-289.
6. Siebel F., Mauser W., Moutari S., Rasclé M. Balanced vehicular traffic at a bottleneck, *Mathematical and Computer Modeling*, 2007, Vol. 49, pp. 689-702.
7. Baumann N., Köhler E. Approximating Earliest Arrival Flows with Flow-Dependent Transit Times. In: Fiala J., Koubek V., Kratochvíl J. (eds.). *Mathematical Foundations of Computer Science 2004. MFCS 2004. Lecture Notes in Computer Science*. Vol 3153. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.
8. Wang J.W., Wang H. F., Zhang W. J. et al. Evacuation planning based on the contra flow technique with consideration of evacuation priorities and traffic setup time, *In IEEE Trans. Intell. Trans. Syst.*, 2013, Vol. 14, pp. 480-485.
9. Pyakurel U., Nath H.N., Dhamala T.N. Efficient contraflow algorithms for quickest evacuation planning, *Science China Mathematics*, Vol. 61, No. 11, P. 2079-2100.
10. Lin M, Jaillet P. On the quickest flow problem in dynamic networks: A parametric min-cost flow approach, *Twenty-Sixth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics*, 2015, pp. 1343-1356.
11. Hamacher H.W., Heller S., Rupp B. Flow location (FlowLoc) problems: Dynamic network flows and location models for evacuation planning, *Annals of Operations Research*, 2013, Vol. 207, pp. 161-180.
12. Miller-Hooks E., Patterson S.S. On solving quickest time problems in time-dependent, dynamic networks, *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 2004, Vol. 3, No. 1, pp 39-71.
13. García-Ojeda J., Bertok B. Building-evacuation-route planning via time-expanded process-network synthesis, *Fire Safety Journal*, 2013, Vol. 61, pp. 338-347.
14. Kureichik V., Gerasimenko E. Approach to the Minimum Cost Flow Determining in Fuzzy Terms Considering Vitality Degree. In Silhavy R., Senkerik R., Kominkova Oplatkova Z., Prokopova Z., Silhavy P. (eds), *Artificial Intelligence Trends in Intelligent Systems. CSOC 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 573. Springer, Cham, 2017, pp. 200-209.

15. Kureichik V., Gerasimenko E. Multi-Commodity Maximum Flow Determining in a Fuzzy Graph with Vitality Degrees, *Proceedings of 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2017, Moscow, Russia*, pp. 347-351.
16. Gerasimenko E.M. Nahozhdenie potoka minimal'noy stoimosti v transportnoy seti metodom ranzhirovaniya matematicheskogo ozhidaniya nechetkih funktsiy stoimostey [Finding the flow of the minimum cost in the transport network by ranking the expectation of fuzzy cost functions], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 4 (129), pp. 247-251.
17. Gerasimenko E.M. Nahozhdenie potokov v transportnyh setyah v usloviyah nechetkosti i chastichnoy neopredelennosti: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Finding flows in transport networks in conditions of fuzziness and partial uncertainty: abstract. cand. of eng. sc. diss.]. Taganrog, 2014, 22 p.
18. Kirik E.S., Dekterev A.A., Litvintsev K.Yu., Harlamov E.B., Malyshev A.V. Matematicheskoe modelirovanie evakuatsii pri pozhare [Mathematical modeling of evacuation in case of fire], *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical modeling], 2014, Vol. 26, No. 1, pp. 3-16.
19. Samoshin D.A. Sostav lyudskih potokov i parametry ih dvizheniya pri evakuatsii: monografiya [Composition of human flows and parameters of their movement during evacuation: monograph]. Moscow: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2016, 210 p.
20. Yusoff M., Ariffin J., Mohamed A. Optimization Approaches for Macroscopic Emergency Evacuation Planning: A Survey, *International Symposium on Information Technology*, 2008, Vol. 3, pp. 1-7.
21. Yueming, C., Deyun, X. Emergency evacuation model and algorithms, *Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology*, 2008, Vol. 8 (6), pp. 96-100.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженок.

Герасименко Евгения Михайловна – Южный федеральный университет; e-mail: egerasimenko@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371621; к.т.н.; кафедра систем автоматизированного проектирования; к.т.н.; доцент.

Gerasimenko Evgeniya Michailovna – Southern Federal University; e-mail: egerasimenko@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371621; the department of CAD; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 519.712.2

DOI 10.23683/2311-3103-2019-4-26-36

Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова

ЭВОЛЮЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ РАЗРАБОТКИ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ*

Предлагается методика эволюционного проектирования автономных агентов и много-агентных систем (МАС), на основе которой осуществляется разработка и реализация нечетких и гибридных моделей формирования агентов. Рассмотрены существующие подходы к проектированию информационных систем на основе многоагентных организаций. Проанализированы особенности и недостатки существующих подходов. Отмечено, что использование принципов теории эволюционного развития, разработка новых подходов, использующих природные аналоги, позволяет повысить эффективность действующей методологии проектирования многоагентных систем. Описана модель взаимодействия агентов в мультиагентной системе. Рассмотрены различные подходы к эволюционному проектированию агентов и многоагентных систем, которые могут опираться на различные модели эволюции. Представлена формальная постановка задачи эволюционного проектирования искусственных систем. Выделены принципиальные проблемы, возникающие при создании общей теории эволюции агентов и многоагентных систем. Рассмотрены особенности различных моделей и уровней эволюции. Разработана концепция проектирования агентов и многоагентных систем, согласно которой процесс проектирования включает в себя базовые компоненты самооргани-

* Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 19-01-00715).