

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора ФГБУН

«Институт проблем управления

им. В. А. Трапезникова РАН»

Физ.-мат. наук, профессор РАН



М.В. Губко

» ноября 2017 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Скороходова Владимира Александровича на тему

«Графы с нестандартной достижимостью:

маршрутизация, случайные процессы и потоковые задачи»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.17 – Теоретические основы информатики

Диссертационная работа В. А. Скороходова посвящена разработке и исследованию методов решения оптимизационных задач на ориентированных графах специального вида – графах с ограничениями на достижимость. В таких графах, помимо обычных дуг, существуют дуги различных нестандартных типов, которые, как правило, имеют некоторые ограничения на доступность. Таким образом, ограничивается доступность некоторых путей, в которые эти дуги входят. Форма ограничений задает вид достижимости на графе. Так, введены понятия нескольких видов магнитной и вентильной достижимости, а также механической достижимости. В общем случае, графы с теми или иными ограничениями на пути получили название графов с нестандартной достижимостью. Для графов с нестандартной достижимостью разработаны методы решения задач о кратчайших путях, о случайных блужданиях, о потоках в сетях с нестандартной достижимостью, а также рассмотрены их некоторые дополнительные математические свойства.

Актуальность темы. Графовые модели и методы применяются при описании разнообразных процессов во многих предметных областях: при исследовании системных свойств сложных объектов, в оптимизационных задачах, в задачах сетевого управления, обработки информации,

прогнозирования и пр. Эти модели используются при решении классических потоковых задач, задач комбинаторной оптимизации, при моделировании стохастических и детерминированных процессов с конечным или бесконечным множеством состояний, при решении проблем централизованного и децентрализованного управления сложными системами, задач распределения нагрузки в электрических, транспортных, компьютерных, коммуникационных и других сетях, в системах обработки распределенной информации. Большинство графовых моделей связано с некоторым передвижением по путям соответствующего графа, а среди задач, которые приходится решать, можно особо выделить следующие три: задачу о кратчайшем пути, о случайных блужданиях и потоковую задачу. Перечисленные задачи хорошо изучены в классических постановках, однако, возникает всё большее число прикладных проблем, в которых существуют ограничения выбора пути на соответствующем графе и которые не охватываются классической теорией графов. Введение тех или иных ограничений на дуги делает неприменимыми классические методы и алгоритмы исследования графов и порождаемых ими сетей. В диссертации разработан новый исследовательский аппарат, применимый к графам с различными видами нестандартной достижимости.

Структура и содержание диссертации. На отзыв представлена диссертационная работа (255 страниц) и автореферат (32 страницы). Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы (139 наименований).

Во **введении** обосновывается актуальность работы, описывается степень разработанности проблемы, ставится цель исследования, формулируются объект, предмет и методы исследования, приводятся основные положения, выносимые на защиту, обосновывается научная новизна полученных результатов, представляются апробация работы и основные публикации.

В **первой главе** описано несколько видов нестандартной достижимости на графах: магнитная достижимость различных типов, вентиляционная достижимость различных типов, механическая достижимость. Введены понятия допустимых и недопустимых путей на графе с нестандартной достижимостью. Показано, что произвольный граф, на котором не все пути могут быть допустимыми, описывается в терминах графов с нестандартной достижимостью. В частности, классические ориентированные графы являются графами с тривиальной нестандартной достижимостью.

Показано, что классические алгоритмы нахождения кратчайших путей становятся неприменимыми на графах с нестандартной достижимостью, поскольку переход от рассмотрения всего множества путей на графе к рассмотрению только множества допустимых путей приводит к утрате основных свойств (транзитивного и экстремального) пути на графе, на использовании которых основаны известные алгоритмы нахождения кратчайших путей.

Предложен и обоснован общий метод решения задачи о кратчайших путях на графах с нестандартной достижимостью, согласно которому строится вспомогательный граф большего размера, на котором все пути являются допустимыми. Приведены правила построения вспомогательного графа. Сформулированы и доказаны теоремы о соответствии путей вспомогательного графа и допустимых путей исходного графа, а также о соответствии кратчайших путей вспомогательного и исходного графов. Разработаны алгоритмы нахождения кратчайших путей на графе с нестандартной достижимостью, и приведена оценка их вычислительной сложности.

Вторая глава посвящена изучению задачи о случайном блуждании по вершинам графов с нестандартной достижимостью. Показано, что хотя в общем случае процесс случайного блуждания на графе с нестандартной достижимостью не является марковским, он сводится к марковскому процессу на вспомогательном графе. Разработан метод нахождения вероятностей перехода из вершины в вершину графа с нестандартной достижимостью за некоторое конечное число шагов. Предложенный метод позволил рассмотреть «туннельный эффект» при бомбардировании твердокристаллической решетки частицами как приложение графов с нестандартной достижимостью. Показано, что внутренняя структура связей такой решетки может существенно влиять на прохождение частиц сквозь решетку.

В третьей главе изучены вопросы устойчивости и стационарного распределения на графах, в том числе на графах с нестандартной достижимостью. Даны определения устойчивых, полуустойчивых и неустойчивых контуров графа. Разработаны алгоритмы нахождения устойчивых и неустойчивых контуров. Показано, что при возникновении ограничения на достижимость устойчивыми контурами на графе могут стать контуры, которые были неустойчивыми на этом же графе без ограничения на достижимость, а устойчивые – исчезнуть. Также в терминах графовой структуры цепи Маркова

сформулирована и доказана теорема о существовании стационарного распределения.

В качестве приложения ограничения механической достижимости и устойчивых контуров рассмотрена задача нахождения областей локального экстремума ограниченных функций, заданных на сетке.

Четвертая глава посвящена изучению потоковых задач в сетях с нестандартной достижимостью. Данные задачи оказались существенно сложнее, чем рассмотренные в предыдущих главах. Показано, что применение предложенного метода построения вспомогательных графов для решения задачи о максимальном потоке в сети с нестандартной достижимостью недостаточно. Для моделирования потока введены в рассмотрение и изучены новые объекты – обобщенные сети со связанными дугами. Данное обобщение понятия сети потребовало корректировки и определения допустимого потока в ней. Предложены эвристические алгоритмы для нахождения максимального потока в обобщенной сети со связанными дугами. Показано, что потоковая задача в сети, построенной на исходном графе с нестандартной достижимостью, сводится к потоковой задаче в обобщенной сети со связанными дугами, основой для которой служит вспомогательный граф. Получены точные оценки величины максимального потока в обобщенной сети со связанными дугами.

Сформулированы и решены потоковые двухкритериальные оптимизационные задачи: задача о максимальной прибыли в сети от прохождения по ней потока заданной величины и задача о максимальной прибыли от потоков с обратной связью в сетях с нестандартной достижимостью.

Кроме того, рассмотрена задача о максимальном потоке в сети, для каждой дуги которой кроме пропускной способности задана ещё одна величина: доля потока, которая должна быть пропущена по этой дуге. Рассмотрены два условия распределения потока: жесткое и нежесткое. Показано, что для условия жесткого распределения решение рассматриваемой задачи существует и единственно. Предложены алгоритмы нахождения максимального потока для каждого условия распределения потока, приведена оценка их вычислительной трудоёмкости.

В пятой главе изучены аналоги графов с нестандартной достижимостью – графы с зависимостью весов дуг от времени, графы с зависимостью длительностей прохождения по дугам от времени и графы с динамической

нестандартной достижимостью. Показано, что для решения классических задач на таких графах (поиск кратчайших путей, максимальных потоков, случайные блуждания) можно использовать методы, разработанные для решения аналогичных задач на графах с нестандартной достижимостью.

Шестая глава посвящена изучению дискретного аналога оператора Лапласа, а также краевых задач, порождаемых оператором Лапласа на графах с нестандартной достижимостью. Изучены некоторые свойства гармонических и субгармонических функций, заданных в вершинах графа с нестандартной достижимостью. Введены понятия границы и внутренности графа с нестандартной достижимостью, получены дискретные аналоги первой и второй формул Грина, а также сформулирована и доказана теорема существования и единственности решения задачи Дирихле на графе с нестандартной достижимостью.

Научная новизна исследования заключается в получении следующих результатов:

1. Введено понятие графа с нестандартной достижимостью, обобщающее различные классы графов с ограничениями на пути разного рода. Для нового объекта исследования предложен и обоснован обобщенный метод построения вспомогательного графа (развертки).
2. Для графов с нестандартной достижимостью предложены методы нахождения кратчайших путей и исследованы процессы случайного блуждания.
3. Для исследования потоков в сетях с нестандартной достижимостью введены новые математические объекты «обобщенные сети со связанными дугами». Описаны их свойства. Исследованы потоки в таких сетях, получены оценки для величины максимального потока.
4. Разработаны эвристические алгоритмы поиска кратчайших путей и максимальных потоков.
5. Исследованы графы с переменным временем прохождения дуг.
6. Предложены методы решения краевых задач, порожденных лапласианом на графах с нестандартной достижимостью. Доказаны существование и единственность решения задачи Дирихле.

Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных в работе, заключается в существенном расширении возможностей применения аппарата теории графов. Новые объекты, графы с различными видами достижимости, позволяют строить новые дискретные математические модели,

в которых могут быть учтены реальные ограничения, возникающие в том числе в задачах маршрутизации и навигации, в потоковых задачах в информационных сетях и пр. Предложенный в работе общий метод решения классических графовых задач позволяет не разрабатывать алгоритмы под каждое конкретное ограничение достижимости, а строить алгоритмы, применимые для решения соответствующих задач на графе с произвольным ограничением.

Разработанные методы применены к решению задачи о перераспределении ресурсов между отдельными элементами среднего или крупного предприятия.

Результаты, полученные в диссертационном исследовании, могут быть использованы в научно-исследовательских и проектных организациях телекоммуникационного профиля при решении задач о маршрутизации в телекоммуникационных и компьютерных сетях с помехами, затуханием сигнала и пр.; при решении задач планирования перевозок в логистике и транспортных задач с ограничениями; на промышленных предприятиях при решении задач для систем управления технологическими процессами, в которых имеются ограничения на порядок (последовательность) выполнения некоторых операций или их совместимость, и т.п.

Степень достоверности и обоснованности полученных результатов. Достоверность и обоснованность теоретических результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечиваются корректным применением математического аппарата и строгим математическим обоснованием предложенных методов и алгоритмов.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в ИПУ РАН, ЮФУ, МГТУ им. Баумана, НИУ ВШЭ, АО «НИИАС» и других ведущих научных и учебных учреждениях, а также в различных организациях, занимающихся анализом транспортных, финансовых, энергетических потоков и задачами распределения ресурсов.

Соответствие диссертационного исследования паспорту специальности. Тема диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.17 – Теоретические основы информатики (п. 10. Разработка основ математической теории языков и грамматик, теории конечных автоматов и теории графов).

Апробация полученных результатов. Результаты диссертации прошли достаточную апробацию на международных и всероссийских конференциях. Все основные результаты своевременно опубликованы в 41 печатной работе, из

которых 15 – в журналах, рекомендованных ВАК РФ и зарубежных журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus. Результаты диссертации докладывались на многих всероссийских и международных конференциях.

Замечания к работе

1. Обзор современного состояния проблемы в диссертационной работе рассредоточен по главам. Хотя он достаточно полон, такая форма изложения затрудняет формирование целостной картины современного состояния исследований. Обзор следовало бы сконцентрировать в первой главе.

2. Переусложнены определения в первой главе диссертации.

3. Теоремы 2.1, 2.2, 2.3 начинаются так: «*После такого перестроения (построения)....*». Какого «такого»? Формулировка теоремы должна быть самодостаточной – без ссылок на предыдущий текст.

4. Техническое исполнение рисунков, как в самой диссертации, так и в автореферате, довольно низкого качества. Не на всех рисунках дуги графов помечены, это затрудняет понимание иллюстрируемых примеров.

Однако указанные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

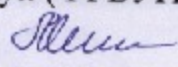
Диссертационная работа В. А. Скороходова представляет собой завершённое математическое исследование по актуальной теме в рамках нового научного направления «Ориентированные графы и сети с ограничениями на достижимость». Текст работы изложен ясным математическим языком, основные теоремы четко сформулированы и полностью доказаны, имеется достаточное количество иллюстративных примеров. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертационной работы. Совокупность результатов, теоретических положений и выводов позволяет квалифицировать её как научное достижение, имеющее несомненную значимость для специальности 05.13.17 – теоретические основы информатики (физико-математические науки).

Диссертация «Графы с нестандартной достижимостью: маршрутизация, случайные процессы и потоковые задачи» соответствует п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.17 –

теоретические основы информатики (физико-математические науки), а ее автор, Скороходов Владимир Александрович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по данной специальности.

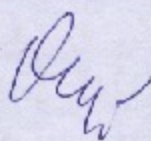
Отзыв подготовила:

д.ф.-м.н., в.н.с. лаборатории № 11 «Методов интеллектуализации дискретных процессов и систем управления» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук (ФГБУН ИПУ РАН)

 Жилиякова Людмила Юрьевна

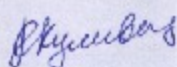
Отзыв на диссертационную работу Скороходова Владимира Александровича обсужден и одобрен на научном семинаре лаборатории № 11 «Методов интеллектуализации дискретных процессов и систем управления» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук 01 ноября 2017 г., протокол № 8/2017.

Председатель семинара



д.т.н., проф. О.П. Кузнецов

Секретарь семинара



к.т.н., с.н.с. С.Г. Куливец

Адрес ФГБУН ИПУ РАН: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65

Телефон: +7 495 334-89-10

Электронная почта: dan@ipu.ru