



ОТКРЫТАЯ НАУКА
издательство

Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.7

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТОКОВ ДАННЫХ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЕЙ

¹Зыков С.В., ²Маличенко С.В.

ФГБОУ ВО «МИРЭА - РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Москва, Россия (119454, г. Москва, Пр-т Вернадского, д. 78, стр.4), e-mail: ¹zykov_s@mirea.ru, ²malichenko@mirea.ru

В статье рассматривается эффективность применения моделей транспортного равновесия при распределении потоков данных программно-конфигурируемой сети (ПКС). Цель исследования состоит в проверке возможности улучшения характеристик трафика данных задействованием алгоритмов поиска равновесия при распределении потоков данных. В работе были использованы методы математического моделирования и теории графов, а также доказана целесообразность использования предложенных моделей для задач оптимизации ПКС. В качестве вывода отмечается улучшение показателей пропускной способности (goodput) и снижение задержек при передаче данных по сетевому каналу.

Ключевые слова: Программно-конфигурируемые сети.

OPTIMIZATION OF DATA FLOWS OF SOFTWARE-CONFIGURABLE NETWORKS

¹Zykov S.V., ²Malichenko S.V.

MIREA - RUSSIAN TECHNOLOGICAL UNIVERSITY, Moscow, Russia (119454, Moscow, avenue. Vernadsky, 78, b. 4), e-mail: ¹zykov_s@mirea.ru, ²malichenko@mirea.ru

The article examines the effectiveness of the application of transport equilibrium models in the distribution of data flows of a software-configurable network. The purpose of the study is to test the possibility of improving the characteristics of data traffic by using algorithms to find an equilibrium in the distribution of data flows. The methods of mathematical modeling and graph theory were used in the work, as well as the expediency of using the proposed models for optimization problems of the control system was proved. As a conclusion, there is an improvement in throughput (goodput) and a reduction in delays when transmitting data over a network channel.

Keywords: Software-configurable networks.

Введение

Постоянное увеличение объема передаваемых данных ставит перед специалистами задачи, связанные с обеспечением высокого качества сетевых услуг и характеристик каналов передачи. Одним из наиболее перспективных решений в этой области является использование программно-конфигурируемых сетей (ПКС), обеспечивающих масштабируемость при организации сетевой инфраструктуры. Многоуровневая архитектура ПКС позволяет гибко управлять трафиком для оптимального соблюдения требований к качеству обслуживания (QoS).

В условиях растущей сложности и разнообразия требований к качеству обслуживания (QoS) традиционные методы маршрутизации часто оказываются недостаточно гибкими и

эффективными. Множество научных исследований посвящены изучению и решению проблем оптимизации ПКС.

Актуальные исследования инжиниринга трафика ПКС

TCP Slice

Работа «TCP Slice: A Semi-Distributed TCP Algorithm for Delay-Constrained Applications» [1] посвящена разработке нового алгоритма управления потоками данных в протоколе TCP, специально предназначенного для приложений с жесткими требованиями к задержкам, таких как мультимедийные приложения, видеоконференции и интерактивные сервисы. Традиционный TCP ориентирован на обеспечение надежности передачи и справедливого использования сетевых ресурсов, однако он не всегда способен удовлетворить потребности современных приложений, где критически важны низкие задержки.

Основная проблема, рассматриваемая в статье, заключается в том, что стандартные реализации TCP не обеспечивают достаточного контроля над задержками передачи. Это связано с механизмами управления перегрузкой и подтверждениями (ACK), которые могут приводить к увеличению задержек и нестабильности производительности в условиях высокой нагрузки сети. Для решения этой проблемы в работе предложен алгоритм под названием TCP Slice, который представляет собой полураспределенный подход к управлению передачей данных

TCP Slice отличается тем, что разделяет основной поток данных на несколько «слайсов» или под-потоков, каждый из которых управляется отдельно для оптимизации задержек и пропускной способности. Полураспределенная архитектура алгоритма сочетает централизованные и децентрализованные методы управления, позволяя принимать часть решений на уровне конечных устройств, а другую часть — на промежуточных узлах сети. Это обеспечивает более гибкое и адаптивное управление трафиком.

Алгоритм TCP Slice включает адаптивное управление перегрузкой, которое динамически регулирует скорость передачи данных каждого слайса в зависимости от текущих условий сети и требований к задержкам приложения. Кроме того, он позволяет приоритизировать критически важные данные, обеспечивая их более быстрое и надежное доставление по сравнению с менее важными потоками. Такие механизмы позволяют существенно снизить задержки передачи данных и увеличить общую пропускную способность сети.

Результаты симуляций и экспериментов, демонстрируют значительное улучшение производительности TCP Slice по сравнению с традиционными реализациями TCP. В частности, отмечается существенное снижение средних и пиковых задержек передачи данных, что подтверждает пригодность алгоритма для чувствительных приложений. Кроме того, благодаря более эффективному управлению перегрузкой и адаптивной маршрутизации, TCP Slice обеспечивает увеличение пропускной способности сети и повышение стабильности работы в условиях изменяющейся нагрузки. Алгоритм также демонстрирует высокую гибкость и масштабируемость, что позволяет ему эффективно функционировать в больших сетях, сохраняя низкие задержки и высокую производительность.

Reinforcement Learning

Работа «Intelligent Routing Algorithm over SDN: Reusable Reinforcement Learning Approach» [2] посвящена разработке алгоритма маршрутизации, использующего программно-определяемые сети (SDN) и методы обучения с подкреплением (Reinforcement Learning, RL). Авторы стремятся улучшить эффективность и адаптивность маршрутизации в современных сетевых инфраструктурах, сталкивающихся с постоянно меняющимися условиями функционирования сети.

Основная проблема, рассматриваемая в статье, заключается в необходимости разработки маршрутизирующих алгоритмов, которые могут не только адаптироваться к изменениям в реальном времени, но и эффективно использовать имеющиеся сетевые потенциалы. Текущие подходы часто требуют значительных вычислительных ресурсов и времени для обучения, что ограничивает их применимость в реальных условиях.

В RL предлагается использовать подход на основе обучения с подкреплением, который позволяет алгоритму самостоятельно обучаться и адаптироваться к изменениям в сети. Особенностью предложенного метода является его «переиспользуемость» (reusability), что означает возможность применения уже обученных моделей в различных сетевых сценариях без необходимости полного переобучения. Это достигается за счет использования методов *трансферного обучения* и создания универсальных политик маршрутизации, способных эффективно работать в разных условиях.

Алгоритм маршрутизации, предложенный в RL, интегрируется в архитектуру SDN, где контроллер SDN управляет сетевыми устройствами и направляет трафик на основе решений, принимаемых алгоритмом RL. Использование RL позволяет анализировать текущие сетевые условия, такие как загруженность каналов, задержки и потери пакетов, и принимать решения, направленные на оптимизацию маршрутов для минимизации задержек и повышения пропускной способности сети.

Алгоритм состоит из нескольких ключевых компонентов: агента RL, среды сети, состояний, действий и наград. Агент RL наблюдает за состоянием сети, выбирает действия (маршруты) и получает награды на основе эффективности выбранных маршрутов. Переиспользуемость достигается за счет обучения агента на разнообразных сетевых сценариях, что позволяет ему обобщать полученные знания и применять их в новых, ранее не встречавшихся условиях.

Результаты экспериментов, демонстрируют существенное превосходство предложенного алгоритма над традиционными методами маршрутизации. В различных тестовых сценариях, включая динамические изменения топологии и нагрузок, алгоритм на основе RL показал более высокую пропускную способность. Переиспользуемость модели позволила алгоритму быстро адаптироваться к новым условиям без необходимости полного переобучения.

Подобный подход позволяет создавать более адаптивные и эффективные сетевые инфраструктуры, способные удовлетворять растущие требования к производительности и надежности.

Модели транспортного равновесия

В целях улучшения характеристик и качества трафика в данном исследовании был произведен анализ моделей транспортного равновесия и их применимости для оптимального распределения потоков. Наиболее популярной моделью в транспортном проектировании

является модель Бекмана, которая основывается на принципе равновесия, согласно которому каждый агент способен выбрать такой маршрут, который минимизирует затраты на перемещение. В результате применения модели достигается состояние, при котором ни один участник движения не может сократить свое время в пути, изменив маршрут самостоятельно.

Модель учитывает зависимость времени прохождения маршрута от объема трафика, что позволяет более точно прогнозировать поведение транспортной системы при изменении условий или топологии сети.

Модель стабильной динамики, также известная как модель Нестерова-де-Пальма, представляет собой подход в транспортном проектировании, который учитывает временные характеристики транспортных потоков и стремится к достижению стабильного состояния равновесия с учетом совокупных затрат на передвижение. В отличие от модели Бекмана, модель стабильной динамики учитывает пропускную способность сети и динамику увеличения затрат при выборе маршрута следования.

Рассмотрим граф сети $G = G(V, E)$, представляющий собой последовательность графов G_l , которые сменяют друг друга посредством операций добавления или удаления вершин, изменения весов ребер, а также добавления или удаления ребер. Обозначим V – множество вершин, соответствующих узлам, а E – как множество ребер, отображающих связи между этими узлами. Пусть f^e — это поток на ребре $e \in E$, где $e = (i, j)$. Путь $p_{ij} \in P$ начинается в узле i и заканчивается в узле j . Ребро (i, j) характеризуется функцией стоимости $\tau(f)$, зависящей от потока $x_{p_{ij}}$, проходящего по этому ребру из узла i в узел j при $i, j \in V$. $T(\tau)$ – функция общей стоимости. Параметр d_{ij} описывает количество пакетов (корреспонденций), отправляемых из узла i в узел j , при этом предполагается, что за временной интервал Δt_k в системе распределяется $\Delta t_k d_{ij}$ пакетов, причем каждый поток $x_{p_{ij}}$ занимает долю пропускной способности. Равновесие в подобной системе можно представить в виде [3]:

$$x_p > 0 \Leftrightarrow C_p(x^{eq}) = \min_{q \in P_{st}} C_q(x^{eq}) \quad (1)$$

$$f^{eq} = \Theta x^{eq} \quad (2)$$

где C_q – функциональная зависимость затрат на маршруте q при распределении x^{eq} . Подобное условие удовлетворяет критериям Нэша в равновесии. Для модели стабильной динамики равновесие представимо в виде [4]:

$$\sum_{(s,t)} d_{st} T_{st}(\tau) - \langle \bar{f}, \tau - \bar{\tau} \rangle \rightarrow \max_{\tau \geq \bar{\tau}} \quad (3)$$

где d_{st} – объем корреспонденции (s, t) , $T_{st}(\tau)$ – минимальные затраты для (s, t) . При этом скалярное произведение определяет объем корреспонденции, находящейся в ожидании, \bar{f} и $\bar{\tau}$ характеризуют величины в предельном состоянии – при полной загруженности сети.

Алгоритм постепенного заполнения сети

Популярный алгоритм распределения потоков – алгоритм постепенного заполнения сети ISM (Incremental Assignment Method), также известный как поэтапный или пошаговый алгоритм заполнения, представляет собой метод, используемый в транспортном моделировании для распределения потоков или грузов, основная цель которого – определить оптимальное или приближенное распределение потоков с учетом пропускной способности каналов при стремлении минимизировать затраты на прохождение пути.

Инкрементальный алгоритм представляет собой методику поэтапного обновления решения задачи распределения потоков в транспортной сети. Для решения оптимизационной задачи распределения потоков трафика в сети использовалась модификация данного алгоритма с применением целочисленного линейного программирования (ILP). ILP использует формальную математическую модель для определения решения. Задача формулируется в виде целочисленной линейной программы с целевой функцией с ограничениями. При достижении сходимости решателя ILP гарантирует нахождение глобально оптимального решения, соответствующего заданным условиям.

Иная модификация ISM имеет «жадную» стратегию выбора маршрута следования. Жадный алгоритм последовательно обрабатывает каждый поток корреспонденции OD , выбирая для него из всех доступных кратчайших маршрутов P_{st} тот, который в данный момент имеет наименьшую загрузку. После выбора маршрута загрузка всех каналов этого пути увеличивается, что учитывается при распределении следующих потоков. Такой подход позволяет быстро распределять потоки, однако он не гарантирует достижения наилучшего возможного распределения, так как решения принимаются на основе текущей информации без учета загрузки потоков на следующей итерации. В результате алгоритм обеспечивает оперативное распределение потоков корреспонденции, что делает его подходящим для больших и динамических сетей, несмотря на возможные субоптимальные решения.

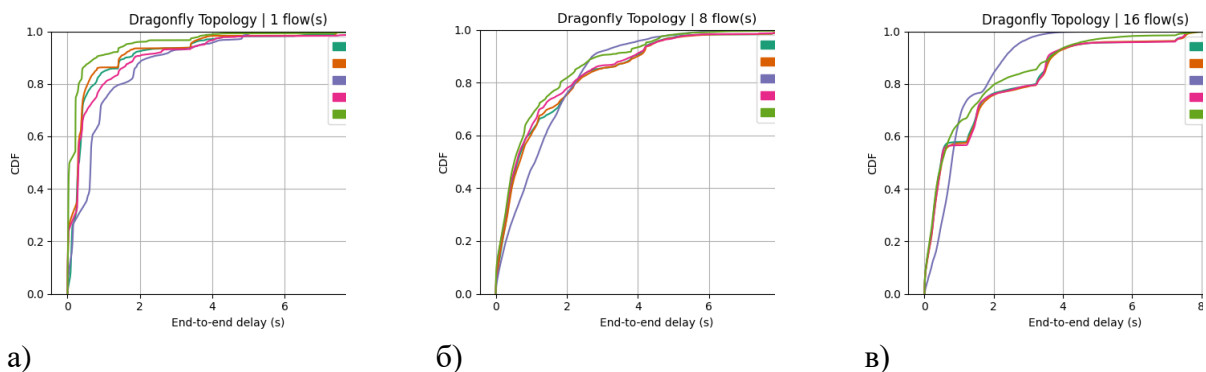


Рисунок 1 – CDF для величины e2e delay, а – 1 поток, б – 8, в – 16.

С топологией Dragonfly симуляция работы алгоритмов ECMP, ILP, OSPF, GRD («жадный» алгоритм), FWA (Франка-Вульфа) показала ожидаемый результат – для одного (а) потока от каждого хоста задержки незначительны и при наличии свободных маршрутов алгоритм FWA становится более эффективен. На четырех (б) и шестнадцати (в) потоков количество незагруженных маршрутов меньше, однако наличие данных загруженности сети для OSPF и FWA позволили при расчете уменьшить значение сквозной задержки.

Для поиска равновесия в модели Бекмана был задействован алгоритм Франка-Вульфа, также известный как метод условного градиента, представляет собой итеративный подход к оптимизации, для решения задач выпуклого программирования с линейными ограничениями. Алгоритм начинается с произвольного допустимого решения и на каждой итерации строит линейную аппроксимацию целевой функции вокруг текущей точки, используя градиент функции (2). Затем решается линейная оптимизационная задача, которая определяет направление наилучшего улучшения. После этого выбирается оптимальный шаг вдоль найденного направления, чтобы обновить текущее решение. Этот процесс повторяется до тех

пор, пока изменения в решении не станут пренебрежимо малыми. Нахождение решения в модели стабильной динамики осуществляется задействованием алгоритма UMST (Universal Method of Similar Triangles) [5].

Программная реализация балансировки

Практическое исследование производилось с использованием среды Mininet и модели VMv2 (behavioral model v2). Был произведен анализ трафика при задействовании ESMР (Equal-cost multi-path) маршрутизации и моделей транспортного равновесия. Исследование потоков TCP (Transmission Control Protocol) производилось на трех алгоритмах контроля перегрузки (congestion control): Cubic, Westwood и YeAH. Cubic использует кубическую функцию для регулирования размера окна передачи, что позволяет эффективно использовать высокоскоростные сети, обеспечивая более плавный и устойчивый рост окна по сравнению с линейными методами. Westwood ориентирован на точную оценку доступной полосы пропускания путем анализа скорости подтверждений пакетов, что особенно полезно в беспроводных сетях, где условия передачи могут часто меняться. YeAH (Yet Another Highspeed TCP) стремится повысить производительность в высокоскоростных сетях, делая более резкий рост окна передачи при сохранении стабильности в распределении ресурсов.

Результаты практического моделирования

В данном разделе представлены результаты практического моделирования эффективности применения моделей транспортного равновесия для распределения потоков данных в программно-конфигурируемых сетях (ПКС). Моделирование проводилось в среде Mininet с использованием модели VMv2, что позволило создать виртуальные топологии сети и протестировать различные алгоритмы маршрутизации при различных нагрузках.

На Рисунке 1 представлена зависимость пропускной способности сети от объема передаваемых данных для модели Бекмана.

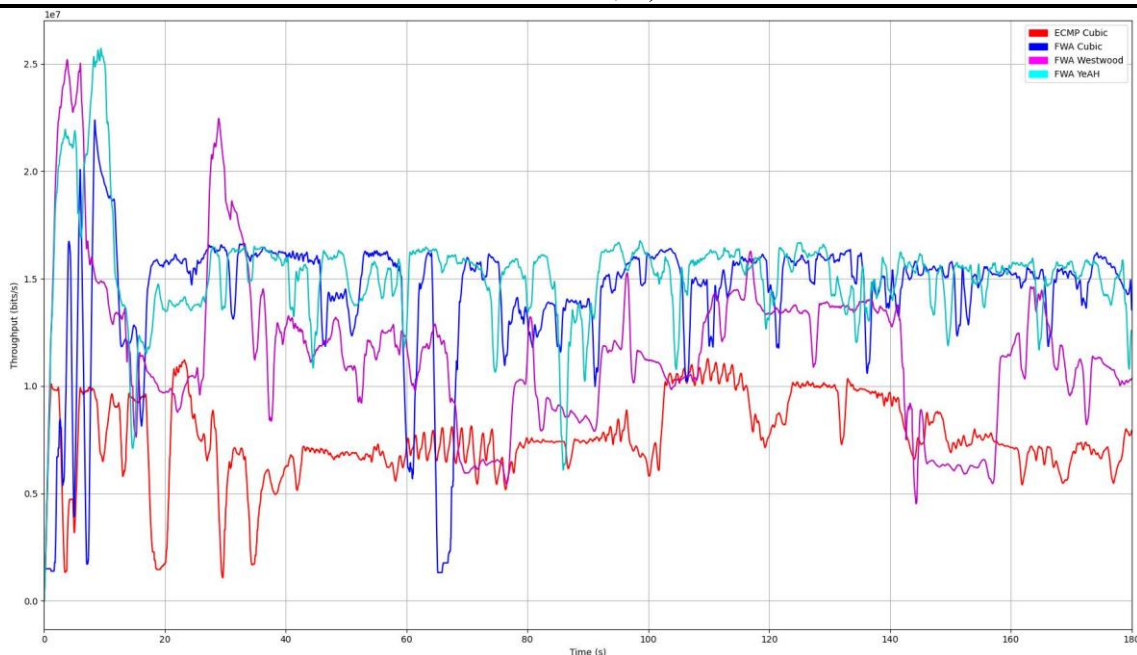


Рисунок 1 – График пропускной способности для модели Бекмана

Аналогичные замеры для модели стабильной динамики представлены на Рисунке 2.

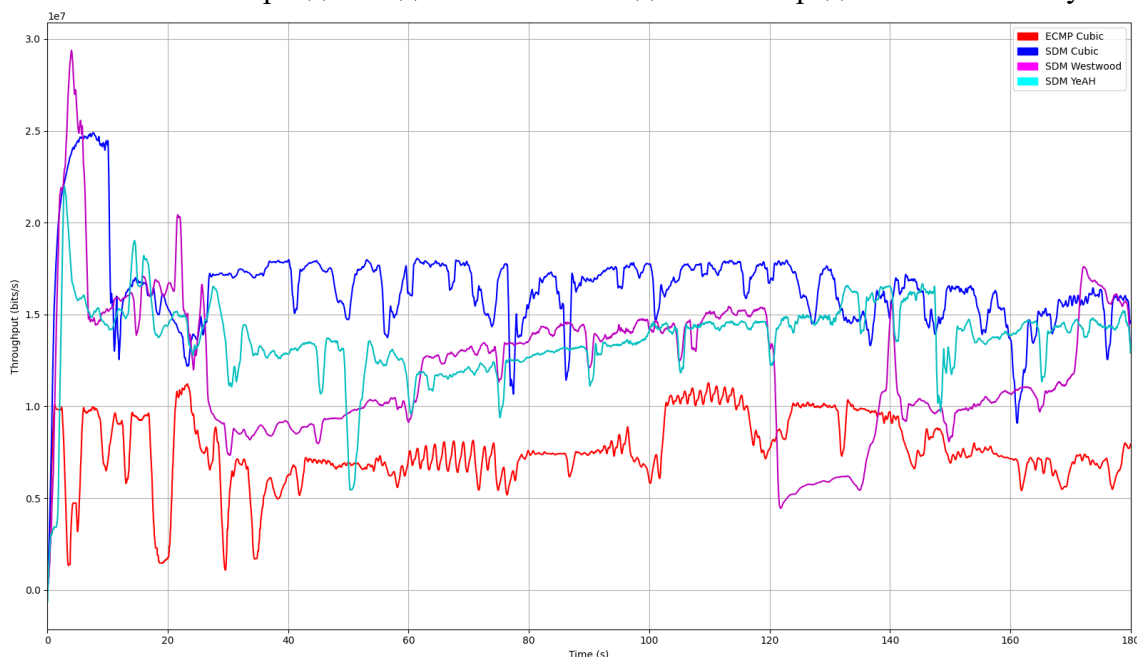


Рисунок 2 – График пропускной способности для модели стабильной динамики

ЕСМР маршрутизация по объему передаваемых данных уступает равновесной маршрутизации. Улучшение показателей пропускной способности (Throughput) в сети для модели Бекмана составило ~1,4 раза (TCP Cubic), для SDM этот показатель составил ~1,6. Данный результат требует проведения более детального изучения работы алгоритмов контроля перегрузки с методами оптимизации потоков, но и подтверждает достижение целей настоящего исследования.

Заключение

Предложенная в настоящей статье аналогия использования моделей транспортного равновесия в задачах распределения потоков трафика показала свою состоятельность и возможность их применения для оптимизации сети. Практическая реализация балансировки с использованием среды Mininet и VMv2 позволила провести детальный анализ трафика при различных методах маршрутизации и алгоритмах контроля перегрузки. Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение моделей транспортного равновесия совместно с современными алгоритмами контроля перегрузки значительно повышает эффективность и надежность сетевых систем. Улучшение показателей пропускной способности подтверждает достижение поставленных целей исследования.

Список литературы

1. Roy D., Das G. TCP Slice: A semi-distributed TCP algorithm for Delay-constrained Applications //arXiv preprint arXiv:2312.01869. – 2023.
2. Wumian W. et al. Intelligent Routing Algorithm over SDN: Reusable Reinforcement Learning Approach //arXiv preprint arXiv:2409.15226. – 2024.
3. Дорн Ю.В. МОДЕЛЬ НЕСТЕРОВА-ДЕ ПАЛЬМЫ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ МАКРОСКОПИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ: дис. канд. техн. наук: 1.2.2. - М., 2022
4. Kubentayeva M. et al. Primal-dual gradient methods for searching network equilibria in combined models with nested choice structure and capacity constraints //Computational Management Science. – 2024. – Т. 21. – №. 1. – С. 15.
5. Kubentayeva M., Gasnikov A. Finding equilibria in the traffic assignment problem with primal-dual gradient methods for Stable Dynamics model and Beckmann model //Mathematics. – 2021. – Т. 9. – №. 11. – С. 1217.

References

1. Roy D., Das G. TCPSlice: A semi-distributed TCP algorithm for Delay-constrained Applications //arXiv preprint arXiv:2312.01869. – 2023.
 2. Wumian W. et al. Intelligent Routing Algorithm over SDN: Reusable Reinforcement Learning Approach //archive preprint arXiv:2409.15226. – 2024.
 3. Dorn Yu.V. NESTEROV-DE PALMA MODELS AND THEIR APPLICATION IN PROBLEMS OF MACROSCOPIC MODELING OF TRANSPORT FLOWS: dis. candidate of Technical Sciences:1.2.2. - M., 2022
 4. Kuantayev M. et al. Primal-dual gradient methods for searching network equilibrium in combined models with nested choice structure and capacity constraints //Computational Management Science. – 2024. – Vol. 21. – No. 1. – p. 15.
 5. Kubentaeva M., Gasnikov A. Finding equilibrium in the traffic assignment problem with primal-dual gradient methods for Stable Dynamics model and Beckmann model //Mathematics. – 2021. – Vol. 9. – No. 11. – p. 1217.
-