

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

На правах рукописи

Федин Геннадий Геннадьевич

**Математические методы принятия оптимальных стратегических
решений по развитию грузовых региональных транспортных систем**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени кандидата наук
по прикладной математике

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Беленький Александр Соломонович

Москва, 2020

Актуальность исследования

По мере развития экономики любой страны грузопотоки через отдельные регионы увеличиваются. В определенный момент существующая инфраструктура грузоперевозок в этих регионах или даже во всей стране может оказаться недостаточной для обработки возросших грузопотоков. Модернизация существующей и строительство новой транспортной инфраструктуры обычно осуществляется в рамках масштабных инженерных проектов. Реализация этих проектов требует большого объема инвестиций, которые федеральные и региональные власти обычно не могут предоставить в полном объеме. В таких ситуациях создание эффективных партнерских отношений с частным сектором, таких как государственно-частные партнерства или подписание концессионных соглашений для реализации проектов, может быть эффективным стратегическим решением, которое могут принять власти. (Здесь вполне естественно предположить, что как юридические, так и финансовые условия, которые власти предлагают своим потенциальным частным партнерам, являются приемлемыми для последних.) Чтобы начать переговоры с частным сектором по этому вопросу, власти должны оценить а) объем инвестиций, необходимых для конкретного проекта и б) экономическую целесообразность проекта (каким образом проект будет приносить доход на конкретном горизонте планирования).

При разработке/модернизации региональной инфраструктуры грузовых перевозок строительство нового транспортного узла или набора новых транспортных узлов с подъездными путями к ним является одной из двух важнейших частей инженерного проекта, который региональные администрации могут предложить финансировать своим потенциальным партнерам из частного сектора. Еще один важный элемент связан с эффективным управлением этой новой или модернизированной транспортной инфраструктурой в условиях конкуренции.

Хотя правительство страны в целом и/или администрация конкретного региона страны могут признавать важность проекта, связанного с развитием/модернизацией региональной транспортной инфраструктуры, без обеспечения необходимого финансирования все обещания правительств и региональных администраций избирателям, особенно в отношении развития/модернизации местной инфраструктуры грузовых перевозок, могут оставаться только обещаниями. Чтобы избежать нереалистичных обещаний, а также сделать хотя бы некоторые из уже сделанных обещаний реальными, правительствам/администрациям необходимы инструменты поддержки принятия решений. Эти инструменты должны помочь им а) оценить расходы и экономическую целесообразность, связанные с реализацией проекта и б) договориться с частными инвесторами как о юридических, так и финансовых условиях их потенциального

финансового вклада. Последнее необходимо, если региональная администрация и правительство страны не могут профинансировать конкретный проект по развитию/модернизации местной инфраструктуры грузовых перевозок в полном объеме.

Диссертация предлагает соответствующие аналитические инструменты для разработки таких инструментов поддержки принятия решений. В частности, предлагается набор математических моделей и задач для определения оптимального плана модернизации региональной транспортной системы и оценки экономической целесообразности строительства нового транспортного узла в конкретной конкурентной среде.

Постановка задачи рассматриваемой в диссертации

В главе 1 диссертации рассматриваются две части проекта по развитию региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок, а именно: определение набора строительных и инженерных работ, связанных со строительством транспортных узлов и подъездных путей к ним, и эффективное управление этими элементами инфраструктуры грузовых перевозок.

Любая дискуссия об экономическом развитии региона обычно включает в себя обмен идеями по улучшению его грузовой транспортной системы. Это особенно актуально, если предполагаемое улучшение частично обусловлено преимуществом географического положения региона. Какие бы услуги перевозки грузов ни рассматривались – между пунктами в регионе, между пунктами в других областях и в данном регионе, а также транзитом через территорию региона – эти услуги, в конечном итоге, позволяют обеспечить более быструю и более дешевую доставку грузов. Математические модели, которые могут использоваться для количественной оценки этих преимуществ и расчета транспортных тарифов, при которых экономически целесообразно строительство нового грузового транспортного узла в регионе, предложены в главе 2 диссертации.

Объектами диссертационного исследования являются задачи а) размещения транспортных узлов в регионе, б) определение пропускных способностей и схем перевалки грузов этими транспортными узлами, в) оценки общих затрат, которые, как ожидается, потребуются для строительства и обслуживания новых транспортных узлов; г) оценка доходов, которые может принести функционирование новых транспортных узлов и е) оценка целесообразности строительства грузового транспортного узла в географической точке региона.

Целью диссертационного исследования является разработка математических моделей и задач для анализа модернизации и функционирования грузовых транспортных систем, которые могут быть использованы в качестве основы для инструментов поддержки принятия решений, которые были бы полезны для лиц, принимающих решения по

модернизации транспортной системы региона в целом и строительстве новых транспортных узлов в частности. Этот инструмент должен позволить региональной администрации начать переговоры с потенциальными инвесторами из частного сектора о финансировании соответствующего проекта. Предлагаемая модель отражает правовые, инженерные и финансовые параметры, которые администрация региона может предложить частному сектору в рамках, например, государственно-частного партнерства.

Задача диссертационного исследования предложить и исследовать новые математические модели и методологии, которые

- (1) Помогут определить а) оптимальные (с точки зрения администрации области) местоположений новых грузовых транспортных узлов в регионе, б) общие расходы, связанные со строительством как новых транспортных узлов в выбранных (оптимальных) местах, так и подъездных путей к ним, в) доходов, которые, как ожидается, будут получены за счет функционирования модернизированной региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок в любой представляющий интерес для региональной администрации планируемый период, г) конкурентоспособность тарифов на транспортировку которые может предложить транспортный узел и д) экономическую целесообразность строительства нового грузового транспортного узла в географической точке региона;
- (2) Могут быть использованы в качестве основы для инструментов поддержки принятия решений, которые были бы полезны для лиц, принимающих решения по модернизации транспортной системы региона в целом и строительстве новых транспортных узлов в частности.

Исследования наиболее близкие к задаче исследования

(Merakli and Yaman 2016, 2017) предлагает модель размещения транспортных узлов при неопределенном спросе, описываемым системами линейных ограничений. Как и в (Беленький, 1981), они формулируют минимаксную задачу оптимизации на двух многогранниках и применяют двойное преобразование, чтобы линеаризовать сформулированную задачу и найти наилучшее решение при наихудшем спросе.

(Serper and Alumur 2016) рассматривает модель размещения транспортных узлов с различными видами транспорта и пропускными способностями. Модель позволяет выбрать а) виды транспорта (воздушный, наземный) и тип транспортного средства (самолет, прицеп, грузовой автомобиль) как для перевозок между узлами, так и между узлами и клиентами и б) пропускные способности узлов для каждого вид транспорта.

Подход к рассмотрению пропускных способностей транспортных узлов, применяющийся в (Alumur et al., 2018), предусматривает возможность задержек в узлах в

задаче размещения транспортных узлов с ограничениями на время обслуживания. (Alibeug et al., 2016) представляет класс задач проектирования транспортных систем с целевыми функциями, ориентированными на прибыль, которые отражают баланс между выручкой, полученной от перемещения товаров, и затратами на строительство транспортных сетей.

Среди задач, связанных с размещением объектов, есть те, которые рассматривают различные аспекты проектирования объекта совместно с задачей размещения, например, определение цены услуг, ассортимента продукции и размера объекта. Такая задача была рассмотрена в (Küçükaydin et al., 2011). В (Küçükaydin et al., 2011) новый участник стремится определить местоположение и привлекательность каждого из центров обслуживания, который будет открыт в регионе с существующими центрами обслуживания конкурентов. Участник может регулировать привлекательность центров обслуживания, находящихся под его контролем. Целью каждого игрока является максимизация собственной прибыли, которая зависит от доли рынка игрока. Эта доля рынка рассчитывается по «гравитационному правилу», то есть доля рынка пропорциональна привлекательности объекта и обратно пропорциональна расстоянию между объектом и клиентом. Авторы сформулировали рассматриваемую проблему как двухуровневую задачу смешанного нелинейного программирования. Используя условия оптимальности Каруша-Куна-Такера, авторы преобразовали эту двухуровневую задачу нелинейного программирования в эквивалентную одноуровневую задачу смешанного нелинейного программирования.

Другие авторы фокусируются на ценовых играх как на части задачи размещения объектов. Например, (Fleckinger and Lafay, 2010) изучают игру, в которой игроки выбирают свои цены и местоположение одновременно. В результате авторы доказывают, что в этой последовательной игре ведомый всегда зарабатывает больше, чем лидер. Хотя задачи учитывающие конкуренцию при принятии решений о размещении были изучены, конкуренция между существующим оператором и новым участником в транспортных системах с парами отправитель-получатель (ОП) изучена гораздо меньше. Возможно, (Marianov et al., 1999) является первой статьей, посвященной этому типу задач, в которой авторы предложили математическую формулировку проблемы ведомого, в которой существующая транспортная компания работает в сети с центральным транспортным узлом, а новая компания хочет выйти на тот же рынок. В предлагаемой математической модели предпочтения клиента моделируются следующим образом: участник захватывает долю потока пары ОП, которая зависит от разницы между тарифами участника и существующего оператора, которые установлены для клиентов. Проблема, аналогичная (Marianov et al., 1999), была рассмотрена в (Eiselt and Marianov, 2009), где авторы изучили

задачу ведомого, рассмотрев ее на примере размещения аэропорта. Основное отличие от модели, предложенной в (Marianov et al., 1999), связано с моделированием предпочтений потребителей. А именно в (Eiselt and Marianov, 2009) предпочтения клиента моделируются с помощью непрерывных гравитационных функций полезности.

Обзор, представленный в диссертации, показывает, что существуют классы задач, формулировки которых близки к задачам, которые рассматриваются диссертации. Однако это задачи не решаются таким образом, чтобы можно было использовать результаты рассмотренных публикаций для выработки стратегических решений сторонами, ведущими переговоры о потенциальном частно-государственном партнерстве по развитию региональной инфраструктуры грузовых перевозок.

Научная новизна

Настоящая диссертация рассматривает масштабные практические задачи, связанные с принятием стратегических управленческих решений по инвестированию в развитие или модернизацию региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок. В ней представлены новые аналитические инструменты для а) разработки оптимального плана развития или модернизации региональной транспортной системы, б) оценки объема инвестиций, необходимых для реализации этого плана и в) оценки эффективности будущего функционирования системы в конкурентной среде.

В главе 1 диссертации представлена новая математическая модель для анализа модернизации и функционирования грузовых транспортных систем как в детерминированной ситуации, так и в условиях неопределенности, путем оценки объема инвестиций, необходимых для развития региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок. Здесь представлены две математические формулировки соответствующей задачи, а именно а) постановка задачи с зафиксированными коэффициентами целевой функции, являющимися известными действительными числами и б) постановка задачи, когда, по меньшей мере, некоторые из этих параметров неизвестны и рассматриваются как переменные. Вторая формулировка предлагается в виде минимаксной задачи со смешанными переменными и линейной структурой системы ограничений. Глава содержит доказательство теоремы, которая позволяет свести эту минимаксную задачу к задаче смешанного математического программирования с целевой функцией и ограничениями, имеющими линейную структуру.

Во второй главе диссертации представлена новая математическая модель, которая позволяет сформулировать задачу оценки целесообразности строительства нового грузового транспортного узла в географической точке региона как нелинейную задачу нахождения максимума минимакса, взятого от разности двух билинейные функции четырех

векторных переменных на многогранных множествах. Теорема, доказанная в этой главе, позволяет свести поиск решения этой задачи к решению задачи квадратичного программирования. Кроме того, в этой главе предлагается новая математическая модель для оценки конкурентоспособности тарифов на услуги по транспортировке, которые может предложить транспортный узел при наиболее неблагоприятных тарифах на рынке транспортных услуг региона. Эта модель позволяет сформулировать, задачу нахождения этих тарифов как задачу отыскания минимакса билинейной функции с обоими векторными аргументами, принадлежащими многогранным множествам, которая сводится (Беленький, 1981) к решению задач линейного программирования, формирующих двойную пару. Возможность свести рассмотренную задачу к задаче линейного программирования важна для крупных транспортных сетей. Разрешимость вышеупомянутой пары задач линейного программирования становится достаточным условием конкурентоспособности тарифов на транспортировку. Использование заведомо конкурентоспособных тарифов на транспортировку позволяет администрации региона оценить объем инвестиций, необходимых для создания нового транспортного узла в региональной транспортной системе, и, таким образом, оценить экономическую целесообразность строительства этого нового грузового транспортного узла.

Основные результаты выносимые на защиту

- (1) Новые математические модели для формализации задач, связанных с поиском количественных оценок инвестиций, необходимых для развития региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок;
- (2) Три задачи оптимизации формулируются на основе предложенной математической модели. Две из этих трех задач позволяют находить оценки, предполагая, что информация о значениях параметров модели известна точно либо по всем параметрам, либо по их части. В обоих случаях соответствующие задачи оптимизации формулируются как задачи смешанного математического программирования. Задача робастной оптимизации формулируется на основе той же математической модели в условиях неопределенности значений всех параметров модели;
- (3) Доказательство то, что эта задача робастной оптимизации сводится к задаче смешанного математического программирования с системой ограничений и целевой функцией, имеющей линейную структуру при естественных предположениях о множествах, в пределах которых значения параметров могут изменяться. То есть, рассматривая задачу может быть решена с использованием методов решения задач смешанного программирования с ограничениями и целевыми функциями, имеющими линейную структуру, которые реализованы в рамках стандартных пакетов программного обеспечения;

- (4) Достаточное условие конкурентоспособности тарифов на транспортировку и методология для оценки того, следует ли строить новый грузовой транспортный узел или модернизировать существующий в конкретной географической точке региона;
- (5) Методология нахождения а) конкурентных тарифов на новые услуги по транспортировке, предлагаемых группе потенциальных клиентов, б) достаточных объемов грузов, которые будет выгодно перемещать через транспортный узел и в) значения тарифов на транспортировку в наихудшем сценарии.

Вклад автора включает в себя разработку и реализацию математических моделей и алгоритмов, доказательства теорем, разработку алгоритмов и их тестирование, сбор данных, проведение вычислительных экспериментов и подготовку научных статей.

Достоверность результатов исследований, проведенных автором, подтверждается численными экспериментами, обсуждениями в научных коллективах. Результаты исследований были представлены на ведущих международных конференциях и опубликованы в научных журналах.

Ценность исследований для математической теории заключается в а) предложенных математических моделей для анализа функционирования и модернизации грузовой транспортной системы, б) сформулированных и исследованных задачах оптимизации, в) доказанных утверждениях, позволяющих сводить задачи робастной оптимизации к более простым решаемым задачам.

Основным **практическим применением** предложенных моделей является их использование при разработке инструментов поддержки принятия решений для оценки а) объема инвестиций, необходимых для развития или модернизации региональной инфраструктуры грузовых перевозок и б) экономической целесообразности создания нового грузового транспортного узла. Кроме того, задачи, рассматриваемые в главе 1 диссертации, могут быть использованы для решения задач размещения в широком спектре промышленных и транспортных систем, например, при оптимальном размещении станций зарядки/смены батарей электрического транспорта.

Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертации докладывались автором диссертации и обсуждались на конференциях:

- (1) “Optimization models for estimating the volume of investment needed for developing regional infrastructures”. XX April International Academic Conference On Economic and Social Development, Moscow, Russia, 2019.

- (2) “Robust mathematical models associated with negotiating financial investments in large-scale transportation projects”. 21st Conference of the International Federation of Operational Research Societies, IFORS-2017, Quebec City, Canada, 2017.
- (3) “An example of the application of a robust approach to choosing an optimal regional freight transportation infrastructure”. 2017 International Transportation Economics Association Conference, Barcelona, Spain, 2017.
- (4) “Mixed programming problems of optimally allocating and scheduling the openings of transport hubs and access roads to them in a geographic region”. 28th European Conference On Operational Research, Poznan, Poland, 2016.

Список опубликованных статей, где отражены основные научные результаты диссертации

Статьи по теме диссертации, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus:

- (1) Fedin, G. An approach to estimating the economic expediency of developing a new cargo transport hub by a regional public administration / Belenky, A., Fedin, G., Kornhauser, A., // International Journal of Public Administration (in press, has received favorable reviews, in press. 2020) (Scopus Q2)
- (2) Fedin, G. Estimating the needed volume of investment in a public–private partnership to develop a regional energy/freight transportation infrastructure/ Belenky, A., Fedin, G., Kornhauser, A., // International journal of Public Administration. 2019. 42:15-16, 1275-1310 (doi.org/10.1080/01900692.2019.1652315) (Scopus Q2)

Статьи по теме диссертации, опубликованные в журналах высокого уровня, входящих в список НИУ ВШЭ:

- (1) Федин Г.Г. Моделирование взаимодействия участников переговоров по формированию государственно-частного партнерства для разработки/развития региональной инфраструктуры грузовых перевозок/ Беленький А.С., Корнхаузер А.Л., Федин Г.Г. // Управление большими системами: сборник трудов. Вып. 81. М.: ИПУ РАН, 2019. С.50-89. DOI: <https://doi.org/10.25728/ubs.2019.81.3>
- (2) Федин Г.Г., Применение робастного подхода к задаче размещения транспортных узлов с подъездными путями в географическом регионе с существующей транспортной системой // Управление большими системами. 2018. 72. 108-137 (doi.org/10.25728/ubs.2018.72.5)

Список использованной литературы

1. Alibeyg A., Contreras I., Fernandez E., (2016) Hub network design problems with profits. Transportation Research Part E. 96. 40-59.

2. Belenky A., (1981) Minimax planning problems with linear constraints and methods of their solutions. *Automation and Remote Control*. 42 (10). 1409-1419.
3. Eiselt, H.A., Marianov, V., (2009). A conditional p-hub location problem with attraction functions. *Computers & Operations Research*, 36, 3128-3135.
4. Fleckinger, P., Lafay, T., (2010). Product flexibility and price competition in Hotelling's duopoly. *Mathematical Social Sciences*, 60, 61-68.
5. Küçükaydin, H., Aras, N., Kuban Altınel, I., (2011). Competitive facility location problem with attractiveness adjustment of the follower: A bilevel programming model and its solution. *European Journal of Operational Research*, 208(3), 206-220.
6. Marianov, V., Serra, D., ReVelle, C., (1999). Location of hubs in a competitive environment. *European Journal of Operational Research*, 114, 363-371.
7. Merakli M., Yaman H., (2016) Robust intermodal hub location under polyhedral demand uncertainty. *Transportation Research Part B*. 86. 66-85.
8. Merakli M., Yaman H., (2017) A capacitated hub location problem under hose demand uncertainty. *Computers and Operations Research*. 88. 58-70.
9. Serper E., Alumur S., (2016) The design of capacitated intermodal hub networks with different vehicle types. *Transportation Research Part B*. 86. 51-65.