

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального
государственного учреждения
«Федеральный исследовательский
центр «Информатика и управление»
Российской академии наук»,



М.А. Посыпкин

«27» 01 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации — Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» — на диссертацию Цыганова Никиты Игоревича «Оптимизация древовидных транспортных систем энергетических рынков», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3 «Теоретическая информатика, кибернетика»

Актуальность темы диссертации

Задачи оптимизации транспортной инфраструктуры сложных систем возникают в самых разных областях и являются чрезвычайно важными в силу высокой затратности развития передающих сетей, в особенности, энергоресурсов (прокладка железных дорог, трубопроводов, ЛЭП, землеотвод, средства защиты, физические расстояния и т.д.). Транспортные расходы составляют большую долю в конечной стоимости энергоресурсов для потребителей. Тем не менее, математический аппарат решения соответствующих задач оптимизации проработан недостаточно из-за их существенной трудности для сетей общей конфигурации, поскольку с учетом наличия указанных выше постоянных затрат целевые функции будут нелинейными. Поэтому актуальной представляется задача выделения частных видов сетевых систем, для которых удастся разработать эффективные алгоритмы оптимизации либо, в случае невозможности подобных алгоритмов, построить такие схемы сокращения перебора, чтобы их практическая сходимость в большинстве случаев не была экспоненциальной.

При оптимизации энергетических систем также следует принимать во внимание их рыночную природу, когда различным подсистемам - производства / добычи, доставки, потребления энергоресурса соответствуют различные независимые агенты (субъекты управления) со своим целеполаганием. Так что оптимизационные постановки для них имеют смысл поиска равновесия и сведение полученных задач к стандартной оптимизации потребовало отдельного обоснования. Указанными вопросами в течение последних лет занимаются на кафедре Исследования операций МГУ им. М.В. Ломоносова под научным руководством профессора А.А. Васина. В частности, сформулировано условие на потоки в сети, названное УИСП, и получен ряд достаточных условий существования эффективных алгоритмов для сетей типа «цепочка», обобщение которых имеется в данной диссертации. В развитие этих исследований Н.И. Цыгановым разработаны алгоритмы решения задач на максимум функции благосостояния сетевого рынка для структур «цепочка», «звезда» и для комбинации данных конфигураций при выполнении УИСП. Возможность переноса (в случае УИСП) предложенных диссертантом алгоритмов на произвольные структуры типа «дерево» обоснована в магистерской работе И.И. Силаева - еще одного ученика профессора

А.А. Васина - на базе метода Н.И. Цыганова. В свою очередь Н.И. Цыгановым применимость к древовидным системам подтверждена на примере задачи развития региональной газотранспортной сети, рассмотренной для анализа перспектив газификации Иркутской области. Появление способов решения подобных актуальных задач еще раз подчеркивает актуальность темы диссертации Н.И. Цыганова.

Структура и основное содержание диссертации

Диссертационная работа Н.И. Цыганова состоит из введения, двух глав, заключения и списка литературы из 88 наименований. Во введении дан обзор литературы и ранее полученных результатов других авторов, обосновывающий постановку задач диссертации и разработку специальных вычислительных алгоритмов для их решения. Сформулированы цели исследования и основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена теоретическому изучению модели распределенного рынка однородного товара с сетевой структурой типа "дерево". Поставлена задача оптимизации транспортной системы рынка по критерию максимизации функции благосостояния, т.е. суммарной полезности потребления энергоресурса за минусом суммарных затрат на его добычу, транспортировку и развитие транспортной сети. Подробно рассмотрен случай кусочно-линейных функций затрат. Проведено разбиение задачи на оптимизацию выбора транспортных линий для их расширения / построения и на набор подзадач оптимизации при заданном множестве таких линий. Получены оценки сложности указанных типов задач и предложены алгоритмы их решения.

Наибольший интерес представляет алгоритм решения первой задачи, основанный на выделении линий, заведомо оптимальных или, напротив, заведомо неоптимальных для расширения, что дает потенциальную возможность сокращения перебора. В целях анализа практических свойств данного подхода диссертант провел для разных структур рынка серию вычислительных экспериментов, позволивших оценить среднестатистическую сложность алгоритма, что продемонстрировало приближенно квадратичную зависимость числа решаемых подзадач от количества узлов/линий сети.

Глава 2 диссертации Н.И. Цыганова посвящена исследованию применимости на практике разработанного математического аппарата. Здесь круг энергоресурсов ограничен природным газом, для которого естественно выполнение структурных условий, принятых в диссертации. Кроме того, задачи газификации представляются весьма актуальными для регионов Сибири в свете идеи снижения вредных выбросов в атмосферу, возникающих при использовании угля и мазута. Самым сложным для применения предложенного подхода является построение исходной модели рынка. Если она будет слишком подробной, то для нее трудно получить достоверные данные, а число узлов/линий окажется слишком большим для поиска оптимального решения. Поэтому основное внимание в главе 2 автор уделил вычислению функций производственных и транспортных затрат и агрегированных характеристик узлов модели в различной компоновке для оценки полезности потребления. После чего на базе выведенных формул диссертант создал математическую модель для расчета возможного положительного эффекта от газификации ряда ТЭЦ и/или котельных Иркутской области (в терминах максимума функции благосостояния) в зависимости от порядка величины экологической составляющей в затратах.

Рассмотренная схема транспортной сети содержит 76 потенциальных линий - путей прокладки отрезков газопровода для газификации подсоединяемых (в случае решения о строительстве линии) узлов. Использование предложенных Н.И. Цыгановым алгоритмов дало существенное сокращение перебора (по сравнению с полным 2^{76}), что позволило ему получить интерпретируемые оценки целесообразности и масштабов перевода на газ ТЭЦ и котельных Иркутской области с учетом стремления улучшить ее экологию (результаты вынесены в приложение). В заключении диссертации автор подводит итоги исследования.

В целом работа написана ясно, четко и хорошо иллюстрирована.

Степень обоснованности научных положений и выводов, новизна результатов

Научные положения и выводы диссертации Н.И. Цыганова строго обоснованы и прошли всестороннюю апробацию. Теоретические результаты снабжены математическими доказательствами, а практические подтверждены большим числом тестовых примеров и решением задач реальной размерности. Результаты, выносимые на защиту, являются новыми.

Диссертантом доказана NP-трудность исследуемой задачи даже для простейшей структуры типа «звезда» при наличии фиксированных затрат. Разработан специальный алгоритм полиномиальной сложности для решения вспомогательной подзадачи при задании множества расширяемых линий и получена оценка сложности алгоритма для кусочно-линейных исходных функций. Для такого случая количество вычислительных операций алгоритма не превосходит значения некоторой квадратичной функции от числа узлов в рынке.

Разработаны полиномиальные алгоритмы решения исходной задачи для рынка типа «цепочка» с нулевыми начальными значениями пропускной способности без ограничений на монотонность начальных равновесных цен и с этим ограничением монотонности, но без условия нулевой пропускной способности всех линий. Получены оценки сложности.

Разработаны алгоритмы решения исходной задачи для транспортных структур: «звезда» и «звезда-цепочка» в случае выполнения УИСП (условия инвариантности потока, при котором направления перетоков в транспортных линиях не зависят от их пропускной способности). Показано, что даже для большого числа узлов (больше 50) исходная задача решается за разумное время, а зависимость среднего числа решаемых вспомогательных подзадач от количества узлов в рынке аппроксимируется квадратичной функцией.

Для рынка природного газа предложены методы оценки входных параметров задачи (функций транспортных затрат для новых газопроводов, функций производственных затрат для газовых месторождений и функций спроса для негазифицированных узлов с учетом агрегирования потребителей и структуры узла).

Значимость для науки и практики полученных автором диссертации результатов

Теоретическое значение полученных результатов состоит в постепенном переходе от решения модельных задач оптимизации развития транспортной сети к решению задач с более сложной структурой, уже встречающейся на практике. Декомпозиция изначальной задачи на переборную часть с параллельным решением серии вспомогательных подзадач, допускающих эффективные алгоритмы, открывает новые возможности создания методов сокращения перебора. Это обуславливает значимость работы Н.И. Цыганова для теории математического программирования. Ее значимость для теории исследования операций связана с построением математической модели для анализа целесообразности перевода на газ систем теплоснабжения, учитывающей различие интересов участников процесса при неполноте и неточности имеющейся информации, а также с разработкой методов решения ряда задач оптимизации систем с сетевой структурой связей.

Разработанные автором алгоритмы и методы применены для оценки перспектив газификации Иркутской области с возможным подключением ТЭЦ и котельных региона к магистральному газопроводу «Сила Сибири». Согласно проведенным в диссертации расчетам, газификация приносит положительный эффект только в случае учета экологической составляющей, выражающейся в виде штрафа за сжигание каждой единицы используемого в настоящий момент в области угля. Выявленные оценки среднестатистической сложности алгоритмов (путем проведения серии вычислительных экспериментов при случайном генерировании исходных задач) показали применимость разработанных алгоритмов при планировании развития реальных энергетических рынков, что подтверждает практическую значимость полученных Н.И. Цыгановым результатов.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертации Н.И. Цыганова рекомендуется использовать в научных исследованиях ФИЦ ИУ РАН, ЦЭМИ РАН, ИПУ РАН, ВЦ СО АН и других организаций и коллективов, занимающихся изучением и оптимизацией сложных систем с сетевой структурой типа “дерево”, а также в учебном процессе МФТИ, ВШЭ, на факультете ВМиК МГУ, в СпбГУ и др. по специальности “Прикладная математика и информатика”.

Замечания

В качестве недостатков работы Н.И. Цыганова отметим следующее.

1. Не указано, при каких условиях существует решение задачи (1.5).
 2. В п. 1.3.7 дается оценка сложности алгоритма в зависимости от $|N|$, но не указана его сложность по M (числу участков линейности).
 3. В сноске № 13 на стр. 43 дана ссылка на довольно старый учебник, тогда как на современный учебник по выпуклой оптимизации Ю.Е. Нестерова ссылок нет.
 4. Используются неудачные обозначения для сносок - в форме степени (например, на стр. 89 получилось 42^{20} млрд м³, а на стр 90 - 1.134^{21} млн.руб.), также ряд обозначений главы 2 противоречит главе 1 (N в главе 1 - множество узлов, а в главе 2 - число скважин).
 5. Упрощающее предположение о несущественности снижения давления и запасов газа для залежи (стр. 97) представляется мало реальным, хотя в контексте задачи, поставленной в п. 2.6, оно имеет смысл (но на стр. 97 это не указано).
 6. Не описано, как технологически осуществляется расширение линий: проведение дополнительной нитки газопровода, строительство новых компрессорных станций или иное?
 7. На стр. 117, 118 хорошо бы рассмотреть не только узлы, объединяющие объекты потребления на территориях, имеющих форму круга или прямоугольника, но и для случаев линейного расположения объектов потребления.
 8. Не поясняется, какие теоретические результаты из главы 1 и какие инструменты использовались для проведения расчетов по Иркутской области.
 9. Следовало бы четче очертить в работе круг решаемых задач, в частности, видов энергоресурсов (например, ограничиться углеводородами) или оптимизируемых сетей (распределительных), т.к. условия древовидности структуры и УИСП слишком жесткие.
- Приведенные замечания носят уточняющий или рекомендательный характер и не меняют общей положительной оценки диссертации Н.И. Цыганова.

Заключение

Диссертационная работа Цыганова Никиты Игоревича «Оптимизация древовидных транспортных систем энергетических рынков» является научно-квалификационной работой, представляющей завершенное исследование, в котором решены важные научные задачи в рамках направлений 8 и 9 паспорта специальности 1.2.3 «Теоретическая информатика, кибернетика» (физико-математические науки). Она удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертационным работам, выдвигаемым на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности, и установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О Порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете» к кандидатским диссертациям, а ее автор Цыганов Никита Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3 «Теоретическая информатика, кибернетика».

Отзыв подготовил Соломатин Александр Николаевич, руководитель отдела 32 ФИЦ ИУ РАН, ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук (по

специальности 05.13.11 - математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов, систем и сетей).

Результаты диссертации Н.И. Цыганова рассмотрены и отзыв ведущей организации обсужден и принят на расширенном заседании отдела № 32 «Математические методы регионального программирования» ФИЦ ИУ РАН 21.01.2025, протокол № 1 (присутствовало: 10 чел. Результаты голосования: за - 10, против - 0, воздержались - 0).



А.Н. Соломатин

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН)

Адрес: 119333, Москва, Вавилова, д. 44, кор. 2

<http://www.frcsc.ru/>

Тел: +7 (499) 135-62-60

E-mail: frcsc@frcsc.ru