

3.4. ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ СЕТЕВЫХ СТРУКТУР НЕСТАЦИОНАРНОЙ РОССИЙСКОЙ ЭКОНОМИКИ: МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ¹

Лившиц В.Н., д.э.н., профессор, засл. деят. науки РФ,
зав. лаб., Институт системного анализа РАН;
Позамантур Э.И., д.т.н., профессор, г.н.с.,
Институт системного анализа РАН;
Белоусова Н.И., к.э.н., с.н.с., Институт
системного анализа РАН;
Бушанский С.П., к.э.н., с.н.с., Центральный
экономико-математический институт РАН;
Васильева Е.М., к.э.н., с.н.с., Институт
системного анализа РАН

В развитие созданных ранее авторским коллективом методологических и методических подходов по оптимизации многоэкстремальных нелинейных сетевых транспортных задач большой размерности разработаны методы построения информационной технологии синтеза магистральных сетей. Сформированы основные положения методологии моделирования, прежде всего, принципы синтеза нелинейных сетевых структур с учетом условий финансирования их развития в нестационарной российской экономике. Построены модифицированные модели оптимизации динамических нелинейных сетевых многопродуктовых транспортных задач (с дискретно-непрерывными переменными) с учетом особенностей критериев и ресурсных ограничений – схем финансирования развития сетей – в условиях нестационарной российской экономики. Разработаны модифицированные декомпозиционные алгоритмы оптимизации (с элементами имитационного моделирования) многоэкстремальных частично-целочисленных сетевых задач большой размерности. Разработаны модели формирования оценок параметров, включаемых в предлагаемые модифицированные алгоритмы поиска эффективных вариантов развития транспортных сетей (характеристик спроса в виде шахматной таблицы корреспонденций, оценок внутранспортных эффектов через анализ межотраслевых взаимодействий, затратных характеристик в виде нелинейных зависимостей издержек от загрузки дуг одно- или многопродуктовыми потоками на разных иерархических уровнях магистральной сети). Сформированы требования к компьютерному обеспечению решения задач развития сети в уточненной постановке и разработаны основные блоки экспериментального программного комплекса, применительно к автодорожным сетям выполнено тестирование для обобщенных значений параметров.

1. ОСНОВНЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ СЕТЕВЫХ СТРУКТУР НЕСТАЦИОНАРНОЙ РОССИЙСКОЙ ЭКОНОМИКИ

В настоящей статье речь идет о методах построения информационной технологии синтеза магистральных сетей, ориентированных на учет условий нестационарной российской экономики, которые разрабатываются преимущественно в развитие созданных ранее авторами методологических и методических подходов по оптимизации многоэкстремальных нелинейных сетевых транспортных задач большой размерности [1-5].

Задача (например, применительно к магистральным сетям автомобильных дорог) состоит в отыскании набора хозяйственных мероприятий по строительству и

реконструкции дорог на сети заданной топологии, которые позволяют достичь максимума суммарного общественного эффекта от осуществления грузовых и пассажирских перевозок. В результате каждого мероприятия меняется техническое состояние дороги, основные характеристики которого – пропускная способность в час и тип покрытия дороги. При этом должны выполняться ограничения на финансовые средства, затрачиваемые на хозяйственные мероприятия. Возможно привлечение финансовых средств, полученных в результате организации платных дорог и функционирования придорожной инфраструктуры.

Рассматриваемая задача синтеза нелинейных сетевых структур большой размерности относится к тому классу инженерных и социально-экономических задач, для решения которых наиболее адекватным является применение философии, методологии, методов и процедур прикладного системного анализа. Действительно, речь в ней идет о необходимости решения сложной динамической многовариантной задачи оптимизации развития сети, состоящей из большого числа элементов с нелинейными нагрузочными характеристиками, интенсивно взаимодействующих как между собой, так и с элементами «внешней среды», причем в рамках анализируемого довольно продолжительного расчетного периода надо ответить на следующие вопросы:

- какие и в каком году изменения целесообразно осуществить в топологии и структуре сети (т. е. когда и где, какие новые элементы – звенья, узлы сети – должны быть введены в действие или существующие «закрыты» или развиты и до какого уровня из заданного их допустимого множества);
- какой уровень загрузки при этом должен быть у каждого из элементов в каждом году расчетного периода;
- какие объемы финансовых ресурсов и из каких инвестиционных источников (государственных, частных, международных и др.) возможно и целесообразно привлечь в каждом году для того, чтобы все заданные экзогенно или самоорганизующиеся (по объемам и направлениям) коммутационные потоки (например, перевозки грузов и пассажиров по железнодорожной, автодорожной и т.д. сети) могли быть выполнены наиболее эффективным (или близким к нему) способом с учетом всех экзогенно задаваемых в динамике условий и ограничений финансового, экологического, технологического и т.д. характера, включая и рыночные требования эффективности, формулируемые каждым инвестором.

Выполненный в ИСА РАН абстрактный математический и конкретный экономический анализ ряда задач подобного рода (прежде всего сетевых транспортных применительно к российским автодорожной и железнодорожной магистральным сетям) позволил установить, что, несмотря на ряд факторов, резко усложняющих процесс решения задачи (большая размерность многих реальных сетей, с которыми приходится иметь дело, существенно нелинейный характер стоимостных характеристик элементов сети, динамический характер задачи, разрывный характер функций, идентифицирующих уровень технического состояния элементов сети, нетривиальная система ограничений и т.д.), вопрос существования допустимого решения в задаче, как правило, решается положительно. Более того, в силу комбинаторной природы множества допустимых изменений количество допустимых решений, различных по топологии и структуре сети, обычно весьма велико, и это на первый план выдвигает сложности моделирования и алгоритмизации процесса поиска оптимального (или хотя бы квазиоптимального, т.е. в данном случае близкого по качеству) допустимо-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №06-06-08010 офи).

го решения. Представляется, что методы моделирования и процедуры поиска решений в соответствии с методологией прикладного системного анализа должны опираться на следующие принципы:

- системный подход при моделировании, т. е. отражение в расчетной экономико-математической модели наличия нескольких активных участников коммутационного процесса (государство, частные инвесторы, население и др.) с необязательно совпадающими интересами и интенсивно меняющимися во времени потребностями сетевого обслуживания и т.п.;
- включение в состав моделей блоков формирования (генерирования) допустимых решений и сравнительной оценки их качества (эффективности) с учетом синергических (внетранспортных) эффектов;
- многовариантного анализа альтернатив инвестиционного изменения сети и распределения нагрузки между ее элементами, для чего необходимо использовать комплексное экономико-математическое моделирование, включающее как иерархически построенные модели математического программирования с их типовыми элементами (целевая функция, ограничения, оптимизируемые переменные и др.), так и системы имитационного моделирования;
- применение в моделях эндогенных переменных смешанного типа – в силу существенности в задаче факторов дискретности и динамичности неизбежно идентификаторы развития элементов сети будут описываться дискретными переменными, а нагрузки элементов – непрерывными, причем и те, и другие векторами высокой размерности;
- целесообразность использования для анализа альтернатив и выбора наиболее выгоднейшего варианта развития сети моделей, применяемых при оценке эффективности реальных инвестиционных проектов;
- учет при моделировании факторов недетерминированности (риска и неопределенности), так же как и в инвестиционном проектном анализе – путем многовариантного экономического анализа различных сценариев и синтеза оценок их эффективности для условий нестационарной экономики [6-8].

2. МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНЫХ СЕТЕВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ЗАДАЧ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ КРИТЕРИЕВ И РЕСУРСНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

2.1. Содержательное описание модифицированных моделей

Модификация моделей оптимизации динамических нелинейных сетевых многопродуктовых транспортных задач построена в рамках разработки информационной технологии синтеза сложных сетевых структур с включением 1 – моделей распределения или самоорганизации грузо- и пассажиропотоков по существующей или проектируемой транспортной сети (при неизменных технических состояниях ее элементов) и 2 – моделей собственно развития сети, выбора наиболее рациональных технических состояний элементов сети².

Модификация в части моделей распределения потоков связана с изменениями:

- способов задания исходной информации о спросе, распределенном по сети (пунктам зарождения и погашения потоков) в виде шахматных таблиц корреспонденций, которые не считаются заданными априори (в отличие от принятых ранее в [5] постановок), а формируются в итеративном режиме в процессе решения в зависимости от издержек транспортировки по элементам сети;
- вида критериальной функции, связанного с учетом спроса как эндогенной переменной (в отличие от постановок задач развития сети, когда спрос на перевозку считается выявленным заранее и зафиксированным);
- введением в явном виде оценок результатов от увеличения интенсивности движения по сети, обусловленного ее развитием, переходом элементов сети в более высокие технические состояния (в отличие от наиболее широко распространенного подхода при оптимизации развития транспортных сетей через минимизацию интегральных издержек);
- уточнением параметров чистого дисконтированного дохода рассматриваемого крупномасштабного инвестиционного проекта развития магистральной транспортной сети за счет включения в расчет таких факторов нестационарности, как инфляция, риск, неопределенность.

Модификация в части моделей развития элементов сети, выбора их наиболее рациональных технических состояний связана с изменениями:

- вида ресурсных ограничений, предусматривающих учет различных условий финансирования развития транспортной сети. Выделяемые на хозяйственные мероприятия объемы инвестиций подразделяются на эндогенную и экзогенную составляющие, причем эндогенная часть зависит от уровня транспортных издержек, эксплуатационных расходов на содержание дорог, изменения стоимости земли, тарифов за проезд по платным дорогам (применительно к автомобильным дорогам в предположении, что каждой платной дороге соответствует параллельная дуга сети, по которой проезд осуществляется без взимания платы). Эндогенная часть выделяемых финансовых средств формируется за счет увеличения налоговых отчислений (в виде сальдо от бюджетных поступлений) и коммерческих кредитов (в виде внутренних и иностранных займов). Применительно к автомобильным дорогам сальдо бюджетных поступлений может складываться из:
 - изменений налоговых отчислений от фонда оплаты труда водителей;
 - налоговых отчислений, входящих в стоимость продуктов и услуг, используемых при эксплуатации автомобилей;
 - затрат на компенсацию экологических издержек, не включенных в стоимость строительных работ;
 - затрат на восполнение ущерба от ДТП.
 Учет длительности сроков строительных работ и способов распределения во времени осваиваемых инвестиций, в частности, учет возможных переходящих остатков средств финансирования выражается в дополнительных ограничениях, связывающих отдельные статические сечения при поиске эффективных вариантов решения задачи развития сети в динамической постановке (в простейшем случае принимается допущение о возможности простого переноса недоиспользованных в расчетном периоде средств на последующий период без начисления процентов);
- вида транспортных издержек по элементам сети, которые применительно к автодорожным сетям включают стоимостную оценку затрат времени водителей и пассажиров, эксплуатационные расходы автомобильного транспорта, плату за проезд для платных дорог, экологические издержки и расчетный ущерб от дорожно-транспортных происшествий. В отечественной практике экономического обоснования проектов дорожного строительства эксплуатационные расходы автомобильного транспорта обычно оцениваются суммой двух укрупненных слагаемых: переменных затрат на 1 км поездки и постоянных затрат на 1 ч поездки автомобиля. Более точная оценка эксплуатационных издержек должна включать затраты на топливо, затраты на

² Заметим, что модификации моделей и алгоритмов строятся с учетом не только отечественного, но и зарубежного опыта, прежде всего, в части критериев и процедур оптимизации, моделирования параметров спроса и оценок внешних эффектов (см., например, [9-25]).

прочие горюче-смазочные материалы, затраты на шины и затраты на техобслуживание и ремонт. Эти затраты, особенно затраты на топливо, зависят от условий движения (средней скорости, количества торможений и разгонов), параметров дороги (повороты, наклоны, дорожное покрытие) и погодных условий. Разработанная модель предусматривает оба варианта учета эксплуатационных затрат автомобилей (или их комбинацию, например, если затраты на горюче-смазочные материалы рассчитываются «точно», а прочие элементы затрат «укрупненно»).

2.2. Развернутое содержательное описание постановки задач и формальное представление модифицированных моделей

Задача состоит в отыскании набора хозяйственных мероприятий по строительству и реконструкции дорог на сети заданной топологии, которые позволяют достичь максимума суммарного общественного эффекта от осуществления грузовых и пассажирских поездок несколькими видами автомобильного транспорта, объемы которых являются эндогенными переменными. В результате каждого мероприятия меняется техническое состояние дороги, основные характеристики которого – пропускная способность в час и тип покрытия дороги. При этом должны выполняться ограничения на финансовые средства, затрачиваемые на хозяйственные мероприятия. Возможно привлечение финансовых средств, полученных в результате организации платных дорог и функционирования придорожной инфраструктуры.

Задача имеет ряд основных особенностей как в оценке транспортных потоков, так и в отражении процессов финансирования и проведения строительных работ.

Расчет транспортных потоков имеет следующие основные особенности.

1. Количество поездок автомобилей между любой парой исходного и начального пункта зависит от затрат сообщения на дугах сети.
2. При этом суммарное количество поездок для каждого вида автомобилей за год (или другой отрезок времени, принятый в качестве длительности одного расчетного периода) ограничивается (с двух сторон) на основе экзогенных отклонений от статистической константы: суммарных затрат времени автомобилей данного вида, потраченного на поездки.
3. Местные потоки (потоки на небольшие расстояния) отнесены к нераспределяемым потокам, то есть таким потокам, наложение которых на дуги сети априорно задано.
4. Водители стремятся выбрать лучший маршрут из всех возможных между каждой парой пунктов.
5. Затраты маршрута складываются из затрат на дугах сети, входящих в маршрут.

При отражении финансирования хозяйственных мероприятий принимаются следующие основные допущения.

1. Объемы инвестиций, потраченных на достижение определенного технического состояния дороги, не зависят от способа разбиения строительных работ на этапы.
2. Выделяемые на хозяйственные мероприятия объемы инвестиций состоят из экзогенной и эндогенной частей. Эндогенная часть зависит от следующего:
 - уровня транспортных затрат;
 - эксплуатационных расходов на содержание дорог;
 - изменения стоимости земель;
 - тарифов за проезд по платным дорогам.

Отражение технической реализации хозяйственных мероприятий имеет следующие особенности при моделировании. Считается, что:

- процесс проведения строительных работ не приводит к временному ухудшению характеристик дорог (пропускной способности, качества покрытия);

- реализация одного хозяйственного мероприятия влияет на изменение технического уровня только одной дороги.

Основной исходной информацией для задачи являются следующие.

1. Начальные (существующие) технические состояния дуг сети.
2. Ограничения на затраты времени работы автомобилей в каждый расчетный период.
3. Вид и параметры функциональных зависимостей количества поездок между парами начальных и конечных пунктов от потребительских затрат передвижения на дугах.
4. Вид и параметры зависимостей времени, скорости и затрат на передвижения на дугах сети от уровня их загрузки автомобилями.
5. Экзогенные выделяемые объемы финансовых средств на реализацию хозяйственных мероприятий.
6. Условия выделения эндогенной части финансовых средств на реализацию хозяйственных мероприятий.
7. Условия изменения технических состояний дорог (дуг) сети в зависимости от реализации хозяйственных мероприятий.
8. Объемы инвестиций, необходимые для реализации каждого вида хозяйственных мероприятий.

Основными искомыми данными являются следующие.

1. Количество поездок из начального пункта в конечный пункт для каждого вида автомобилей и каждого расчетного периода.
2. Распределение автомобилей по возможным маршрутам движения.
3. Новые технические состояния дорог сети, полученные в результате реализации хозяйственных мероприятий.

На основании найденных в ходе решения задачи новых технических состояний дорог вычисляются затраты на строительство / реконструкцию и содержание дорог. Технические состояния дорог сети, количество поездок между начальными и конечными пунктами и выбор водителями маршрутов определяют интенсивность движения автомобилей на каждой дороге сети. Ежегодно выделяемые финансовые средства должны обеспечивать затраты на реализацию хозяйственных мероприятий (то есть на переход из одного технического состояния в году $t-1$ в другое) и затраты на содержание дорог. Неиспользованные выделенные средства в расчетный период t могут быть потрачены в расчетном периоде $t+1$ в том же объеме (без начисления процентов).

В модели используется несколько видов затрат на передвижение (транспортные затраты):

- объективные общественные затраты в экономических ценах – это затраты с точки зрения всего общества;
- объективные потребительские затраты – это затраты потребителей дорожных услуг (водителей, пассажиров, владельцев автомобилей и грузов) в коммерческих ценах или рассчитанные на основе коммерческих цен (например, оценка стоимостных затрат времени на основе заработной платы);
- субъективные потребительские затраты для маршрутов – это субъективная оценка затрат каждого маршрута, которыми руководствуется пользователь при выборе наилучшего маршрута (например, затраты времени, расстояние, финансовые затраты маршрута или комбинация различных факторов, полученная экспертными и/или эконометрическими методами);
- субъективные потребительские затраты для корреспонденций – это субъективная оценка затрат на сообщение между парой начального и конечного пункта, на основе которой вычисляются объемы корреспонденций. Суммарные затраты корреспонденции равны сумме произведений затрат каждого маршрута и количества поездок по маршруту, соответствующих данной корреспонденции. Средние затраты нулевой (с нулевым объемом) корреспонденции принимаются равными средним затратам наилучшего маршрута корреспонденции.

Критерием является максимум общественного дисконтированного эффекта за весь расчетный период, который формируется из:

- эффекта от увеличения количества поездок в сравнении с исходным состоянием транспортной сети, $V(t)$;
- затрат на содержание дорог, $\mathcal{E}(t)$;
- затрат на строительные работы, $I(t)$;
- инвестиций в автомобильный транспорт, $I^{a.m.}(t)$;
- объективных общественных транспортных затрат, $F(t)$;
- увеличения поступлений в экономику финансовых средств иностранных плательщиков, $U(t)$.

Выгоды и затраты рассчитываются в экономических ценах. Соответственно, транспортные затраты включают внешние эффекты (экстерналии): экологические затраты, ущерб от дорожно-транспортных происшествий:

$$\sum_{t=1, \dots, T} \frac{1}{(1+E)^t} [V(t) - \mathcal{E}(t) - I(t) - I^{a.m.}(t) - F(t) + U(t)] \rightarrow \max, \quad (1)$$

где

E – ставка дисконта;

T – количество расчетных периодов;

$$F(t) = \sum_{\lambda} F_{\lambda}(t), t=1, \dots, T, \quad (2)$$

где

$F_{\lambda}(t)$ – транспортные затраты (в экономических ценах) на дороге λ в году t . (Длительность расчетного периода может быть в принципе любой, но в дальнейшем для упрощения описания будем говорить о годе.)

$$F_{\lambda}(t) = 365 \sum_h N_{\lambda h}(t) f_{\lambda h}(t), t=1, \dots, T, \quad (3)$$

где

$N_{\lambda h}(t)$ – среднесуточная интенсивность движения автомобилей вида h на дороге λ в году t ;

$f_{\lambda h}(t)$ – средние транспортные затраты (в экономических ценах) в году t на 1 автомобиль вида h , проезжающего по дороге λ .

$f_{\lambda h}(t)$ включает стоимостную оценку затрат времени водителей и пассажиров $f_{\lambda h}^e(t)$, эксплуатационные расходы автомобильного транспорта $f_{\lambda h}^s(t)$, плату за проезд (для платных дорог), $c_{\lambda h}(t)$, экологические затраты $f_{\lambda h}^{э\kappa}(t)$, расчетный ущерб от дорожно-транспортных происшествий на 1 млн. км автопробега, $f_{\lambda h}^{оmn}(t)$:

$$f_{\lambda h}(t) = f_{\lambda h}^s(t) + f_{\lambda h}^e(t) + c_{\lambda h}(t) + f_{\lambda h}^{э\kappa}(t) + 10^{-6} \frac{f_{\lambda h}^{оmn}(t)}{l_{\lambda}}, t=1, \dots, T. \quad (4)$$

Под уровнем загрузки дороги λ , $u_{\lambda}^3(t)$, понимается отношение количества автомобилей, проехавших через сечение дороги, к пропускной способности сечения. В модели принимается допущение, что пропускная способность отдельной дороги одинакова во всех ее сечениях.

$$u_{\lambda}^3(t) = \sum_{\gamma} x_{\lambda\gamma}(t) \frac{\hat{N}_{\lambda}(t)}{P_{\gamma}}, t=1, \dots, T; \quad (5)$$

$$\sum_{\gamma} x_{\lambda\gamma}(t) = 1, t=1, \dots, T; \quad (6)$$

$$\hat{N}_{\lambda}(t) = \sum_h k_h^{np} N_{\lambda h}(t), t=1, \dots, T, \quad (7)$$

где $x_{\lambda\gamma}(t)$ – булевы переменные, которые определяют, в каком техническом состоянии в году t находится дорога λ ($x_{\lambda\gamma}(t) = 1$, если дорога λ находится в техническом состоянии γ , иначе $x_{\lambda\gamma}(t) = 0$, при этом $x_{\lambda\gamma}(0)$ заданы и являются индикаторами начальных состояний);

$\hat{N}_{\lambda}(t)$ – интенсивность движения автомобилей в сутки, в приведенных к однородному потоку из легковых автомобилей единицах (определяется на основе использования автомобилями пропускной способности дороги);

k_h^{np} – заданный коэффициент приведения потока автомобилей вида h к потоку, состоящему из легковых автомобилей.

Значения коэффициентов приведения могут меняться в зависимости от уровня загрузки, технического состояния дорог, наличия поворотов, подъемов, количества полос, погодных условий и т.п., а также методов их расчета. Так как колебания значений коэффициентов приведения влияют прежде всего на расчеты скорости и времени движения при высоком уровне загрузки, целесообразно использовать те значения, которые соответствуют условиям, близким к исчерпанию пропускной способности дороги. В модели принято допущение, что влияние на значения коэффициентов приведения вышеперечисленных параметров незначительно, может быть проигнорировано в модельных расчетах (учитывая также недостаточную детализацию информации о технических параметрах существующих дорог) и поэтому используются экзогенные значения коэффициентов приведения, одинаковые для всех дорог.

В стоимостной оценке затрат времени учитывается, что в условиях заторов и стесненных условий движения автомобилей оценку стоимости единицы потраченного времени увеличивают в зависимости от уровня обслуживания (уровня загрузки дороги) [26]:

$$f_{\lambda h}^e(t) = s_{\lambda h}^w [t, u_{\lambda}^3(t)] w_{\lambda h}(t), t=1, \dots, T, \forall \lambda, h, \quad (8)$$

$$w_{\lambda h}(t) = \frac{l_{\lambda}}{v_{\lambda h} [t, u_{\lambda}^3(t)]} + \hat{w}_{\lambda} [t, u_{\lambda}^3(t)], t=1, \dots, T, \forall \lambda, h, \quad (9)$$

где $s_{\lambda h}^w [t, u_{\lambda}^3(t)]$ – стоимостная оценка затрат времени водителей и пассажиров автомобиля вида h в году t , которая представлена в модели непрерывной кусочно-линейной зависимостью от уровня загрузки;

$w_{\lambda h}(t)$ – затраты времени автомобиля вида h на проезд по дороге λ в году t ;

$v_{\lambda h} [t, u_{\lambda}^3(t)]$ – скорость движения автомобиля вида h по дороге λ в году t ;

l_{λ} – протяженность дороги λ ;

$\hat{w}_{\lambda} [t, u_{\lambda}^3(t)]$ – время задержки 1-го автомобиля любого вида в году t на дороге λ .

Скорость движения и время задержки в модели оцениваются кусочно-линейными функциями от коэффициента загрузки.

В отечественной практике экономического обоснования проектов дорожного строительства эксплуатационные расходы автомобильного транспорта обычно оцениваются суммой двух укрупненных слагаемых: переменных затрат на 1 км поездки и постоянных затрат на 1 ч поездки автомобиля.

Более точная оценка эксплуатационных затрат должна включать затраты на топливо, затраты на прочие горюче-смазочные материалы, затраты на шины и затраты на техобслуживание и ремонт. Эти затраты, особенно затраты на топливо, зависят от условий движения (средней скорости, количества торможений и разгонов), параметров дороги (повороты, наклоны, дорожное покрытие) и погодных условий.

Модель предусматривает оба варианта учета эксплуатационных затрат автомобилем (или их комбинацию, например, если затраты на ГСМ рассчитываются «точно», а прочие элементы затрат «укрупненно»), что выражено следующим равенством:

$$f_{\lambda h}^3(t) = \sum_{\gamma} x_{\lambda \gamma}(t) \{ s_{\gamma h}^{nep}(t) I_{\lambda} + s_{\gamma h}^{nocm}(t) w_{\lambda h}(t) + \sum_i s_{ih}(t) q_{ih} [u_{\lambda}^3(t)] \}, t=1, \dots, T, \forall \lambda, h, \quad (10)$$

где

$s_{\gamma h}^{nep}(t)$ – экзогенные эксплуатационные расходы на 1 км пробега по дороге с техническим состоянием γ автомобиля вида h ;

$s_{\gamma h}^{nocm}(t)$ – экзогенные эксплуатационные расходы на 1 ч поездки для дороги с техническим состоянием γ автомобиля вида h ;

$q_{ih} [u_{\lambda}^3(t)]$ – экзогенные натуральные затраты вида i на 1 км пробега по дороге с техническим состоянием γ автомобиля вида h , которые кусочно-линейно зависят от уровня загрузки дороги;

$s_{ih}(t)$ – экзогенная стоимость единицы натуральных затрат вида i для автомобиля вида h .

Экологические затраты и ущерб от дорожно-транспортных происшествий рассчитываются в соответствии со специальными методиками.

Предполагается, что изменение времени работы автомобилей требует увеличения используемого парка и соответствующих затрат, кроме автомобилей, находящихся в личной собственности:

$$I_{\lambda h}^{a.m.}(t) = \sum_h \{ [1 - d_h^n] [s_h^{a.m.}(t) + s_h^{o.m.}(t)] * \frac{365 [w_{\lambda h}(t) N_{\lambda h}(t) - w_{\lambda h}(t-1) N_{\lambda h}(t-1)]}{w_h^n} \}, t=1, T, \forall \lambda, h; \quad (11)$$

$$I_{\lambda h}^{a.m.}(t) = \sum_{\lambda, h} I_{\lambda h}^{a.m.}(t), t=1, \dots, T, \quad (12)$$

где

$s_h^{a.m.}(t)$ – экзогенная стоимость (в экономических ценах) приобретения 1-го дополнительного автомобиля вида h ;

$s_h^{o.m.}(t)$ – экзогенные инвестиции (в экономических ценах) в автотранспортные предприятия для обслуживания 1-го дополнительного автомобиля вида h ;

w_h^n – экзогенное количество часов работы 1-го автомобиля вида h в год;

d_h^n – экзогенная доля автомобилей вида h , находящаяся в личной собственности.

$I_{\lambda h}^{a.m.}$ – дополнительные инвестиции в автомобильный транспорт, рассчитанные для дороги λ .

Для $t = 0$ интенсивность движения автомобилей и затраты времени заданы.

Эффект от увеличения количества поездок вычисляется на основе правила половины, согласно которому чистый выигрыш поездок, порождаемых улучшением дорожных условий, составляет некоторую часть от выигрыша поездок в существующих условиях [27]. Если нет возможности точно оценить выгоды дополнительных поездок, их приблизительная оценка составляет половину сокращения затрат для существующих поездок при предположении, что количество поездок в зависимости от сокращения средних затрат растет линейно.

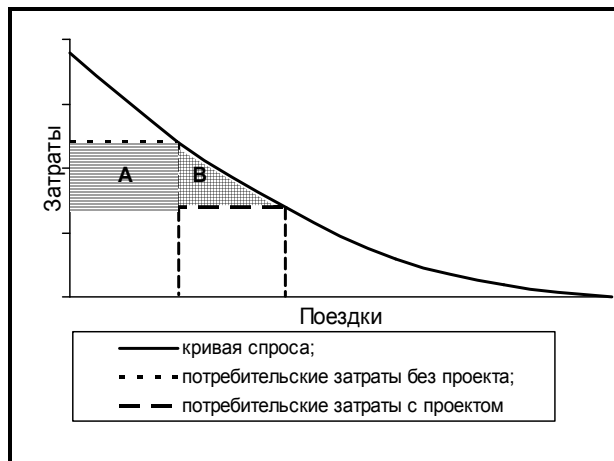


Рис. 1. Оценка потребительских выгод для дополнительных поездок

Кривая спроса на рис. 1 иллюстрирует рост числа поездок в зависимости от снижения потребительских затрат. Прямоугольник **A** представляет собой суммарное сокращение затрат (или выигрыш) существующих поездок. Фигура **B** (на рис. 1 – это треугольник) – выигрыш дополнительных поездок.

$$V(t) = \sum_{l,s,h} \frac{1}{2} 365 [\hat{f}_{lsh}^0(t) - \hat{f}_{lsh}(t)] [P_{lsh}(t) - P_{lsh}^0(t)], t=1, \dots, T, \quad (13)$$

где

$\hat{f}_{lsh}^0(t)$ и $P_{lsh}^0(t)$ – соответственно средние объективные потребительские затраты сообщения и количество поездок в сутки между пунктами l и s автомобилем вида h для сети дорог в эталонном состоянии (например, при условии, что ни одно хозяйственное мероприятие не реализовано);

$\hat{f}_{lsh}(t)$ и $P_{lsh}(t)$ – соответственно средние потребительские затраты сообщения и количество поездок между пунктами l и s автомобилем вида h для сети дорог с техническими состояниями, соответствующими текущему решению задачи. Средние затраты корреспонденции определяются средневзвешенно по всем используемым маршрутам. Для нулевой корреспонденции средние затраты принимаются равными средним затратам наилучшего маршрута.

Объективные потребительские затраты включают стоимостную оценку затрат времени водителей и пассажиров, эксплуатационные расходы автомобильного транспорта, плату за проезд и затраты на увеличение используемого времени парка автомобилей. Все элементы, входящие в эти потребительские затраты, рассчитываются исходя из коммерческих цен, так как на их основе потребители оценивают привлекательность по-

ездки. С учетом этой поправки расчет стоимостной оценки затрат времени для потребительских затрат аналогичен формуле (8), эксплуатационных затрат автомобилей – формуле (10). Потребительские затраты на увеличение используемого времени парка автомобилей на одну дополнительную поездку в сутки $\hat{I}_{sh}^{a.m.}(t)$ равны:

$$\hat{I}_{sh}^{a.m.}(t) = \sum_{j \in J_s} p_{jh}(t) \sum_{\lambda \in \Lambda_j} [(1-d_h^n)(\hat{s}_h^{a.m.}(t) + \hat{s}_h^{o.m.}(t))^* \cdot \frac{w_{\lambda h}(t)}{w_h^n}], t=1, T, \forall I, s, h, \quad (14)$$

где

$\hat{s}_h^{a.m.}(t)$ – экзогенная стоимость (в коммерческих ценах) приобретения 1-го дополнительного автомобиля вида h ;

$\hat{s}_h^{o.m.}(t)$ – экзогенные инвестиции (в коммерческих ценах) в автотранспортные предприятия для обслуживания 1-го дополнительного автомобиля вида h ;

$p_{jh}(t)$ – отношение количества автомобилей вида h , выбравших маршрут j , к количеству поездок по корреспонденции в среднегодовые сутки года t (для исходной, нулевой корреспонденции и наилучшего маршрута j корреспонденции Is $p_{jh}(t) = 1$);

J_s – множество используемых маршрутов, соединяющих пункты I и s ;

Λ_j – множество дорог, входящих в маршрут j .

Расходы по содержанию дороги в коммерческих ценах, $\mathcal{E}^\Phi(t)$, зависят от технического состояния дороги, уровня и структуры транспортных потоков:

$$\mathcal{E}^\Phi(t) = \sum_{\lambda} x_{\lambda\gamma}(t) \mathcal{E}_{\lambda\gamma}[t, u_{\lambda}^3(t)], t=1, \dots, T, \quad (15)$$

где $\mathcal{E}_{\lambda\gamma}[t, u_{\lambda}^3(t)]$ – кусочно-линейная функция, зависящая от уровня загрузки дороги.

В модели принимается допущение, что отношение экономических цен к коммерческим ценам для расходов по содержанию дорог постоянно и не зависит от расчетного периода, дороги и технических состояний:

$$\mathcal{E}(t) = k^3 \mathcal{E}^\Phi(t), t=1, \dots, T, \quad (16)$$

где k^3 – экзогенный коэффициент перевода коммерческих цен в экономические для расходов по содержанию дорог.

Длительность сроков строительных работ и способ разбиения осваиваемых инвестиций по годам для каждого мероприятия не являются устойчивыми показателями, которые можно прогнозировать. Поэтому фактор замораживания средств в строительстве в модели учитывается укрупненно, в целом по сети.

Ввод в году $t+\tau$ объектов на сумму $K(t+\tau)$ требует освоения соответствующих инвестиций в более ранний период:

$$I^\Phi(t) = \sum_{\tau=1, \tau^{max}} d_\tau K(t+\tau), t=1, \dots, T, \quad (17)$$

где

$I^\Phi(t)$ – освоены инвестиции в году t в коммерческих ценах;

τ^{max} – максимальный лаг;

d_τ – экзогенные лаговые коэффициенты,

$$\sum_{\tau=1, \tau^{max}} d_\tau = 1, d_\tau > 0;$$

$K(t)$ – стоимость введенных в эксплуатацию в году t дорог в коммерческих ценах.

$$I(t) = k^u I^\Phi(t), t=1, \dots, T, \quad (18)$$

где k^u – заданный коэффициент перевода коммерческих цен в экономические для инвестиций в строительство и реконструкцию дорог; предполагается, что его значение не зависит от расчетного периода, дороги и вида хозяйственного мероприятия.

$$K(t) = \sum_{\lambda} K_{\lambda}(t), t=1, \dots, T, \quad (19)$$

где $K_{\lambda}(t)$ – затраты на строительные работы в году t на дороге λ .

$$K_{\lambda}(t) = \sum_{\gamma} \bar{K}_{\lambda\gamma}(x_{\lambda\gamma}(t) - x_{\lambda\gamma}(t-1)) + \sum_{\tilde{\gamma}} \alpha_{\tilde{\gamma}} x_{\lambda\gamma}(t) x_{\lambda\tilde{\gamma}}(t-1), t=1, \dots, T, \forall \lambda, \quad (20)$$

где $\bar{K}_{\lambda\gamma}$ – экзогенные затраты на строительные работы, обеспечивающие переход из исходного состояния дороги λ в техническое состояние γ . Параметры $\alpha_{\tilde{\gamma}}$ равны 0, если технически возможен переход от $\tilde{\gamma}$ к γ . В этом случае затраты на переход из состояния γ в состояние $\tilde{\gamma}$ равны $\bar{K}_{\lambda\tilde{\gamma}} - \bar{K}_{\lambda\gamma}$. Если нельзя перейти от $\tilde{\gamma}$ к γ , то $\alpha_{\tilde{\gamma}}$ – большое число, и решение, содержащее данный переход, не попадет в оптимальное решение, так как иначе будет нарушено условие критерия (1)³.

Если в нижеследующем неравенстве (21) и вытекающих из него соотношениях не учитывать временную ценность денег, то условие обеспеченности хозяйственных мероприятий по содержанию дорог финансовыми средствами примет вид:

$$\sum_{t=1, t} [I^\Phi(t) + \mathcal{E}^\Phi(t)] \leq \sum_{t=1, t} [I^{экз}(t) + I^{энд}(t)], \quad \forall t=1, \dots, T, \quad (21)$$

где $I^{экз}(t)$ и $I^{энд}(t)$ – выделяемые финансовые средства в год t , соответственно экзогенная и эндогенная часть.

Эндогенная часть выделяемых финансовых средств формируется за счет увеличения налоговых отчислений и коммерческих кредитов:

$$I^{энд}(t) = \sum_{\lambda} [I_{\lambda}^6(t) + I_{\lambda}^k(t) + I_{\lambda}^u(t)], t=1, \dots, T, \quad (22)$$

где $I_{\lambda}^6(t)$ – изменение бюджетных поступлений, формируемых из транспортных затрат и обслуживания придорожной инфраструктуры дороги λ ;

$I_{\lambda}^k(t)$ и $I_{\lambda}^u(t)$ – коммерческие соответственно внутренних и иностранных кредиты на хозяйственные мероприятия дороги λ .

Сальдо бюджетных поступлений может складываться из:

- изменений налоговых отчислений от фонда оплаты труда водителей;
- налоговых отчислений, входящих в стоимость продуктов и услуг, используемых при эксплуатации и приобретении автомобилей;

³ В программной реализации пользователю предоставляется возможность заполнить матрицу переходов из одних технических состояний дорог в другие. Если на пересечении наименований технических состояний не проставлен шифр мероприятия, то соответствующий переход недопустим.

- затрат на компенсацию экологических затрат, не включенных в стоимость строительных работ;
- затрат на восполнение ущерба от ДТП:

$$I_{\lambda}^{\epsilon}(t) = 365 \sum_h [N_{\lambda h} \sum_{\gamma} x_{\lambda \gamma}(t) \{ b^{nep} s_m^{nep}(t) I_{\lambda} + b^{nocm} s_m^{nocm}(t) w_{\lambda h}(t) + I_{\lambda} \sum_i b_i^{\phi} s_{ih}(t) q_{i\gamma} [u_{\lambda}^3(t)] \} + b^{\epsilon} z_h w_{\lambda h}(t) - b^{\epsilon k} f_{\lambda h}^{\epsilon k}(t) - b^{\delta mn} 10^{-6} \frac{f_{\lambda h}^{\delta mn}(t)}{I_{\lambda}}] + \sum_h b^{6.u.} I_{\lambda h}^{\delta m}(t), t=1, \dots, T, \forall \lambda, \quad (23)$$

где

z_h – экзогенная зарплата 1 ч водителей и прочих работающих для автомобиля вида h ;

b^{nep} , b^{nocm} , b_i^{ϕ} , b^{ϵ} , $b^{\epsilon k}$; $b^{\delta mn}$, b^3 , $b^{6.u.}$ – коэффициенты, каждый из которых является произведением трех экзогенных параметров:

- коэффициента перевода соответствующих экономических цен в коммерческие;
- ставки налоговых отчислений или бюджетных выплат от соответствующего переменного;
- доли от налоговых отчислений, которая может быть потрачена на финансирование развития дорог.

При этом:

b^{nep} , b^{nocm} , b_i^{ϕ} , b^{ϵ} – отчисления от соответствующих элементов транспортных затрат;

$b^{\epsilon k}$ и $b^{\delta mn}$ – доля возмещения соответственно экологического ущерба и ущерба от ДТП, выплачиваемая за счет потенциальных бюджетных инвестиций в развитие дорог;

$b^{6.u.}$ – отчисления от стоимости дополнительных инвестиций в автомобильный транспорт.

Требования к коммерческой эффективности от развития сети представлены в модели ограничением на значение модифицированного отношения затрат и выгод:

- в числителе которого – сумма чистой прибыли от использования придорожной инфраструктуры, $P_{\lambda}^3(t)$, и чистой прибыли от взимания платы за проезд по дорогам, $P_{\lambda}^n(t)$;
- в знаменателе – коммерческий кредит, выделяемый на развитие дороги. В модели учтены два основных вида коммерческих кредитов – иностранный и внутренний.

$$\sum_t \frac{d_{\lambda}^{\epsilon} [P_{\lambda}^3(t) + P_{\lambda}^n(t)]}{(1 + d^{\phi.\epsilon})^t} \geq \sum_t \frac{I_{\lambda}^k(t)}{(1 + d^{\phi.\epsilon})^t}, t=1, \dots, T, \quad (24)$$

$$\frac{d_{\lambda}^u [P_{\lambda}^3(t) + P_{\lambda}^n(t)]}{(1 + d^{\phi.u.})^t} \geq \sum_t \frac{I_{\lambda}^u(t)}{(1 + d^{\phi.u.})^t}, t=1, \dots, T, \quad (25)$$

где $d^{\phi.\epsilon}$ и $d^{\phi.u.}$ – заданная коммерческая норма дисконта для соответственно внутренних и иностранных кредитов. Коэффициенты d_{λ}^{ϵ} и d_{λ}^u являются эндогенными и определяют долю коммерческой прибыли, получаемой от дороги λ , идущую на привлечение соответственно внутренних и иностранных кредитов.

Чистый приток иностранного капитала оценивается суммой иностранных инвестиций в развитие дорог и платы за проезд, взимаемой с иностранных граждан, за вычетом прибыли иностранных компаний, которая оценивается выражением $\sum_{\lambda} d_{\lambda}^u [P_{\lambda}^3(t) + P_{\lambda}^n(t)]$:

$$U(t) = \sum_{\lambda} \{ I_{\lambda}^u(t) - d_{\lambda}^u [P_{\lambda}^3(t) + P_{\lambda}^n(t)] \} + 365 d^{unn} \sum_{\lambda, h} c_{\lambda h} N_{\lambda h}(t), t=1, \dots, T, \quad (26)$$

где d^{unn} – доля иностранных граждан, осуществляющая проезд по дорогам сети (экзогенный параметр).

$$P_{\lambda}^3(t) = 365 I_{\lambda} \sum_h N_{\lambda h}(t) \sum_{\gamma} k_{h\gamma}^3 x_{\lambda \gamma}(t), t=1, \dots, T, \forall \lambda, \quad (27)$$

где $k_{h\gamma}^3$ – чистая финансовая прибыль придорожной инфраструктуры на 1 автомобиле-км вида h при техническом состоянии γ (экзогенный параметр).

$$P_{\lambda}^n(t) = 365 k^n \sum_h c_{\lambda h}(t) N_{\lambda h}(t), t=1, \dots, T, \forall \lambda, \quad (28)$$

где k^n – экзогенно заданная доля чистой финансовой прибыли от выручки за платный проезд. Плата за проезд может больше 0 только для подмножества дорог Λ^n :

$$c_{\lambda h}(t) \geq 0, \lambda \in \Lambda^n, t=1, \dots, T, \forall h; \\ c_{\lambda h}(t) = 0, \lambda \notin \Lambda^n, t=1, \dots, T, \forall h. \quad (29)$$

Предполагается, что каждой платной дороге соответствует альтернативная параллельная дорога (дуга сети), по которой проезд автомобилей осуществляется без взимания платы.

Сбор платы за проезд и, соответственно, прибыль от организации платного проезда зависят от эндогенных переменных интенсивности движения автомобилей и взимаемой платы за проезд. Предполагается, что организации, взимающие плату за проезд, стремятся к максимизации своей прибыли, и, исходя из этого, самостоятельно устанавливают плату. Поэтому тарифы за проезд на платных дорогах вычисляются в модели на основе решения субоптимизационной задачи:

$$\sum_h c_{\lambda h}(t) N_{\lambda h}(t) \rightarrow \max_c, \forall \lambda \in \Lambda^n, t=1, \dots, T. \quad (30)$$

При этом интенсивность движения определяется выбором водителей маршрутов движения в зависимости от затрат сообщения, в том числе тарифов за проезд по платным дорогам:

$$N_{\lambda h}(t) = \sum_{j \in J_{\lambda}} P_{jh}(t), t=1, \dots, T, \forall \lambda; \quad (31)$$

$$\sum_{j \in J_{ls}} P_{jh}(t) = A_{ish}(t), t=1, \dots, T, \forall l, s, h, \quad (32)$$

где

$P_{jh}(t)$ – количество автомобилей вида h , следующих маршрутом j в среднегодовые сутки года t ;

J_{λ} – множество маршрутов, проходящих через дорогу λ ;

$A_{ish}(t)$ – количество поездок автомобилей вида h из начального пункта l в конечный s в году t ;

J_{ls} – множество используемых маршрутов, соединяющих пункты l и s .

Распределение транспортных потоков по маршрутам устанавливается в зависимости от выбранного подхода к оценке выбора маршрутов водителями: имитационного или оптимизационного.

Оптимизационный подход предполагает, что для каждой корреспонденции предельные субъективные потребительские затраты выбранных водителями маршрутов равны и не превышают предельных затрат маршрутов, которые не выбрал ни один водитель, что выражается равенством:

$$\sum_{\lambda} N_{\lambda h} z'_{\lambda h}(t) = \sum_{l, s} Z'_{ish}(t) A_{ish}(t), \forall t=1, \dots, T, h, \quad (33)$$

где

$z'_{\lambda h}(t)$ – предельные субъективные потребительские затраты в году t автомобилями вида h , проезжающих по дороге λ ;

$Z'_{ish}(t)$ – наименьшие предельные субъективные потребительские затраты для автомобилей вида h , следующих из l в s в году t .

При имитационном подходе находится квазиравновесие транспортных потоков. Средние субъективные потребительские затраты выбираемых водителями маршрутов могут превышать средние потребительские затраты кратчайшего маршрута не более, чем на небольшую заданную величину ε :

$$\sum_{\lambda} N_{\lambda h} z_{\lambda h}(t) - \sum_{l,s} Z_{ish}^{min}(t) A_{ish}(t) \leq \varepsilon \sum_{l,s} A_{ish}(t), \quad (34)$$

$$t=1, \dots, T, \forall h,$$

где $Z_{ish}^{min}(t)$ – наименьшие средние субъективные потребительские затраты для автомобилей вида h , следующих из l в s в году t .

Количество поездок автомобилей определяется на основе функциональной зависимости типа гравитационной:

$$A_{ish}(t) = k_h(t) \frac{A_{ih}(t) A_{sh}(t)}{[Z_{ish}(t)]^\beta}, t=1, \dots, T, \forall l, s, h, \quad (35)$$

где β – степень гравитационной зависимости;

$Z_{ish}(t)$ – средние потребительские затраты поездки, используемые для расчета корреспонденций;

A_{ih}, A_{sh} – экзогенные оценки значимости пунктов l и s .

Эндогенные коэффициенты $k_h(t)$ введены в условие (35), чтобы полученное в результате решения суммарное время пробега автомобилей вида h находилось в пределах, заданных статистическими агрегатами $B_h^{mp,h}(t)$ и $B_h^{mp,e}(t)$:

$$B_h^{mp,h}(t) \leq \sum_{\lambda} w_{\lambda h}(t) N_{\lambda h}(t) \leq B_h^{mp,e}(t), \quad (36)$$

$$t=1, \dots, T, \forall h.$$

«Прямое» решение задачи (1-36) по-видимому, возможно только при небольшой размерности (задача многокритериальная, имеет нелинейные условия и целочисленные переменные; кроме того, зависимость «скорость – интенсивность движения автомобилей» имеет несколько точек перегиба). Чтобы упростить процедуру решения, исходная задача разбивается на несколько подзадач, т.е. используется обычный в таких случаях декомпозиционный подход.

3. МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ (С ЭЛЕМЕНТАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ) МНОГОЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЧАСТИЧНО-ЦЕЛОЧИСЛЕННЫХ СЕТЕВЫХ ЗАДАЧ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Декомпозиционный подход к задаче синтеза сложных сетевых структур заключается в том, что процедура выбора оптимального варианта развития сети разбивается на два алгоритмических блока.

A. Определение транспортных потоков на сети при заданных технических состояниях ее элементов.

B. Определение – при выбранных в блоке **A** транспортных потоках – оптимального набора мероприя-

тий по развитию сети при ограничениях на условия финансирования.

Взаимодействие блоков **A** и **B** образует циклическую процедуру.

При решении задач в блоке **A** технические состояния дорог заданы, и определяются матрица корреспонденций, маршруты их следования и, соответственно, потоки на дугах сети.

Определение транспортных потоков в блоке **A** (при заданных технических состояниях элементов сети) осуществляется по результатам выбора кратчайших (в соответствии с принимаемыми критериями) маршрутов следования закрепленных (зафиксированных на определенном этапе итерации) корреспонденций с использованием разработанного авторами проекта ранее метода пошагового распределения потоков по сети любой топологии, в том числе имеющей замкнутые контуры [1, 2, 9].

Новизной методов выбора маршрутов является возможность решения субоптимизационной задачи определения тарифов за проезд. При этом принимается допущение, что каждой платной дороге соответствует параллельная «бесплатная» дорога. Выбор водителями, по какой дороге ехать – платной или бесплатной, не меняет длину маршрута, но изменяет затраты времени, эксплуатационные затраты автомобиля, плату за проезд, дополнительные инвестиции в автомобильный транспорт.

Каждая итерация процедуры выбора маршрутов выполняется в два шага. На первом шаге выполняется стандартная процедура поиска кратчайших маршрутов и распределения потоков по ним, причем как платные дороги, так и соответствующие им бесплатные участвуют в процедуре выбора маршрутов «равноправно», как самостоятельные звенья. Допускается возможность использования как оптимизационного, так и имитационного подходов. При оптимизационном подходе поиск маршрутов выполняется исходя из критерия минимума затрат на передвижение по дугам при закрепленных объемах корреспонденций. Для имитационного подхода ищется квазиравновесие, при котором средние затраты используемых маршрутов приблизительно равны.

На втором шаге изменяются тарифы за проезд, и с этой целью анализируются только пары платных и бесплатных дорог. Выполняется поиск сочетаний цены и интенсивности движения автомобилей:

- во-первых, удовлетворяют заданным правилам определения маршрутов (например, равенству предельных потребительских затрат);
- во-вторых, максимизируют выручку за проезд. При этом на втором шаге суммарная интенсивность движения на платной и бесплатной дорогах не меняется.

На выходе из блока **A** рассчитываются суммарные транспортные и инвестиционные затраты, выгоды от увеличения количества поездок и на их основе – дисконтированный общественный эффект. Если дисконтированный общественный эффект, рассчитанный для допустимого решения на выходе из блока **A**, не увеличился в сравнении с предыдущим допустимым решением, работа алгоритма завершается, при этом в качестве итогового решения принимается последнее допустимое решение.

Задача отыскания наиболее эффективных технических состояний элементов сети (блок **B**) решается при заданных транспортных потоках. Она, в свою очередь, разбивается на две подзадачи:

- 1) определение набора наилучших мероприятий для каждого подпериода (статического сечения);
- 2) определение последовательности наилучших мероприятий в динамике.

Вводится требование, что для существующих технических состояний дороги тариф за проезд должен быть равен нулю. При определении новых технических состояний каждая пара платной и бесплатной дорог рассматривается в качестве условной объединенной дороги. Соответственно, любое сочетание двух технических состояний рассматривается в качестве единого состояния условной объединенной дороги. Определение тарифов за проезд для каждого единого технического состояния аналогично второму шагу процедуры выбора маршрутов блока **A**.

В статической постановке задачи рассчитывается статический критерий: максимизируются общественные выгоды от развития сети за подпериод за вычетом стоимости использования капитала, вложенного в развитие сети. В сравнении с предыдущими работами модель для статической постановки модифицирована для учета эндогенной части от объема инвестиций, выделяемых на развитие сети, в том числе в результате организации платных дорог.

В модель внедрены математические условия, оценивающие эндогенные объемы выделяемых инвестиций: стоимость выделяемых инвестиций, определенная по коммерческой норме дисконта, должна быть не меньше полученных частным инвестором чистых выгод, посчитанных в коммерческих ценах. В соответствии с постановкой задачи решение, формируемое в блоке **B**, всегда удовлетворяет верхним ограничениям на выделяемые объемы инвестиций. Так как часть инвестиций определяется эндогенно и зависит от затрат на дугах сети, в том числе тарифов на проезд, в результате последующего «нового» распределения потоков в блоке **A** ограничения по условиям финансирования могут быть нарушены. Поэтому при переходе к блоку **B** условия выделения эндогенных инвестиций должны корректироваться. Один из вариантов такой корректировки проанализирован на расчетном примере (см. далее, в разделе 5).

Эвристическая процедура выбора наилучших мероприятий для статических сечений состоит из двух частей и требует задания двух критериев: сначала для каждой дороги выбирается наилучшее хозяйственное мероприятие, а затем выбранные мероприятия по всей сети ранжируются, начиная с наилучшего. Выбор и ранжировка мероприятий могут выполняться в соответствии с двумя критериями: либо отношением статического эффекта к инвестициям в хозяйственное мероприятие (аналог индекса доходности), либо статическим эффектом в абсолютном выражении.

Алгоритм решения статических задач имеет несколько вариантов реализации, поскольку в разработанной вычислительной схеме виды критериев как выбора мероприятий на дорогах, так и их ранжирования по сети, а также виды статических сечений могут меняться.

Могут применяться два вида сечений: независимые и зависимые. В случае зависимых статических сечений выбор хозяйственных мероприятий для года t ищется с учетом его совместности (непротиворечивости) с решением, полученным для года $t - 1$. В случае независимых сечений решения, полученные для предыдущего года, не влияют на решения для года t .

Чтобы выбрать наилучший вариант для некоторой дороги, просматриваются все возможные хозяйствен-

ные мероприятия на данной дороге и выбирается мероприятие по одному из двух критериев. Завершив просмотр всех дорог сети, программа ранжирует выбранные мероприятия по величине критерия.

Выбранные варианты, начиная с проекта первого по рангу, «накладываются» на сеть до тех пор, пока соблюдаются ограничения по инвестициям или не все предварительно отобранные проекты реализованы. Если последовательный просмотр дуг сети находит мероприятие, реализация которого приведет к нарушению ограничений на инвестиции, данное мероприятие отбрасывается, и программа анализирует следующее по убыванию мероприятие. Когда все статические сечения просмотрены, решение переходит к следующему этапу.

Решение статических задач может оказаться динамически противоречивым для некоторых дорог сети. Чтобы устранить динамические противоречия для подмножества «противоречивых» дорог, при заданных транспортных потоках определяется оптимальная непротиворечивая последовательность реализации мероприятий, при этом модифицируются ограничения на доступные финансовые средства: из выделяемых инвестиций вычитается сумма инвестиций, потраченных на развитие дорог, для которых решение статических задач оказалось согласованным в динамике.

Эвристическая процедура уточнения решения задачи с учетом динамической непротиворечивости состоит из четырех этапов.

1. Проверка динамической непротиворечивости решений, полученных в результате решения статических задач.
2. Выбор оптимальных решений, динамически непротиворечивых, по развитию каждой дороги методом динамического программирования.
3. Ранжирование реконструируемых или строящихся дорог по убыванию сокращения суммарных чистых приведенных затрат.
4. Отбор мероприятий с учетом ограничений на инвестиции. Второй, третий и четвертый этапы образуют в случае необходимости циклическую процедуру.

Прежде чем переходить к формальному описанию указанных процедур, остановимся на некоторых особенностях современных теоретических и прикладных подходов, используемых при решении подобных задач в мировой практике.

Несмотря на общепризнанное положение, что построение оптимальных транспортных сетей является чрезвычайно сложной вычислительной процедурой, практическое решение таких задач продолжает оставаться весьма важной проблемой, так как позволяет экономить значительные расходы на строительство новых транспортных коммуникаций. Известный уже порядка 40 лет парадокс Брайеса [28], согласно которому добавление новой дуги в сети может привести к увеличению суммарных транспортных издержек, действительно может наблюдаться на практике, когда ввод в эксплуатацию новой дороги очевидно ухудшает условия движения в смысле удорожания совокупных издержек пользователей [21-22].

Анализ работ последнего десятилетия по оптимизации сложных сетевых структур показывает, что актуальность проблемы особенно очевидна для стран с нестабильной или развивающейся экономикой. Если в большинстве развитых стран уже имеется достаточно хорошая сеть дорог, то для многих стран, в том числе и для России, необходимо существенное улучшение сетей, соответствующее предполагаемому бурному

экономическому росту, что требует значительных инвестиций и, следовательно, адекватного планирования расходов [20].

Обычно рассматривается два типа критериев развития сети: системные и пользовательские. Системные критерии являются мерой эффективности функционирования и развития всей сети, в то время как пользовательские критерии отражают предпочтения водителей в выборе целей поездок и пунктов назначения и отправления, видов используемого транспорта, маршрутов поездок.

В качестве системного эффекта развития сети могут использоваться следующие критерии.

1. Минимизация общественных затрат за весь рассматриваемый период (см., например, [24]).
2. Максимизация совокупного спроса на поездки, представленного как сумма поездок по корреспонденциям (см., например, [23]).
3. Критерии транспортной сетевой эффективности (например, максимизация взвешенной доступности пунктов сети, максимизация средней скорости движения, как в [1, 2]).
4. Критерии транспортной надежности (например, максимизация числа дорог с заданным резервом пропускной способности, максимизация взвешенного резерва пропускной способности по всей сети, максимизация резервов пропускной способности подходов к большим городам, используемые в [19, 20]).
5. Критерии транспортной справедливости (например, максимизация выигрыша критериев сетевой эффективности для пунктов с наименьшими выигрышами, минимизация стандартного отклонения в выигрышах пунктов, представленные в [19, 20]).

Простейший пользовательский критерий – минимизация времени поездки, выраженного в стоимостной форме, или издержек следования по маршруту. В действительности, в современных транспортных моделях используются многоуровневые правила формирования транспортных потоков, включая анализ стратегических решений (переезд на новое место жительства, выбор места работы и учебы), тактических, связанных с повседневной деятельностью (формирование бюджета времени, затрачиваемого на передвижения) и выбор непосредственно транспортных решений, связанных со способом перемещения и т.п.

Одна из главных трудностей решения задач оптимизации развития сети – согласование системной эффективности и поведения пользователей. Влияние управленческих решений ограничено в том смысле, что можно поменять конфигурацию сети, но нельзя предписать пользователям «правильное» поведение, оптимальное с точки зрения системного эффекта.

Даже если системный эффект является суммой пользовательских эффектов, это не гарантирует совпадения оптимальных решений для обоих типов критериев, так как пользователь, выбирая ту ли иную поездку, не принимает во внимание изменение затрат других пользователей. Совпадение системного и пользовательского эффектов возможно только для ограниченного числа постановок (например, если минимизируются общественные затраты, а функции общественных и пользовательских затрат совпадают и являются строго вогнутыми). Кроме того, традиционные задачи распределения транспортных потоков между пунктами назначения и отправления, по видам транспорта, а иногда и по маршрутам, как правило, носят вероятностный характер и не сводятся к определению минимума пользовательских затрат.

Таким образом, исходная проблема естественно сводится к двухуровневому математическому программированию. На верхнем уровне решается задача оптимизации системного сетевого эффекта. Задачей, решаемой на нижнем уровне, является задача распределения транспортных потоков в соответствии с определенными пользовательскими правилами.

Разработка методов решения такой двухуровневой задачи идет по двум направлениям:

- сведение двухуровневой задачи к единой оптимизационной однокритериальной задаче и разработка алгоритмов решения единой задачи;
- разработка двухуровневых алгоритмов.

В случае однокритериальной постановки критерии выбора маршрутов пользователями записываются в виде условий, например, на основе принципа Вардропы [29]: затраты используемых маршрутов равны между собой и не хуже затрат неиспользуемых маршрутов. Модифицированная таким образом постановка сводится к следующей: максимизировать системный эффект при ограничениях на выделяемые инвестиции для развития сети и ограничениях, отражающих правила определения транспортных потоков на сети. Так как в реальной ситуации количество поездок между пунктами зависит от затрат, а затраты на дугах являются функцией от потока (по крайней мере, 3-й степени нелинейности), «прямая» запись исходной проблемы приводит к труднорешаемой задаче (особенно для сетей большой размерности), хотя предлагаются различные алгоритмы для упрощенных, с точки зрения отражения пользовательских правил, постановок (см., например, [25]).

Поэтому более широкое применение в мировой практике находят двухуровневые алгоритмы. Их преимущество, в частности, в том, что легко можно использовать традиционные транспортные модели, например, гравитационного типа [19].

Как и предложено в данной работе, исходная проблема разбивается на две подзадачи. Первая подзадача заключается в том, чтобы определить транспортные потоки в соответствии с заданными правилами и при заданных технических состояниях дорог. Отсутствие дороги отражается как дорога с очень маленькой пропускной способностью, такой что присвоение незначительного потока приводит к резкому увеличению затрат [24]. Вторая подзадача заключается в определении варианта развития дорог сети, наилучшего с точки зрения системного эффекта, при бюджетных ограничениях и заданных потоках на дорогах.

При этом методы решения первой подзадачи совпадают с методами решения, используемыми в транспортных моделях, с выделением традиционных вычислительных шагов, например:

- определение количества исходящих и входящих поездок (формирование шахматных таблиц корреспонденций);
- распределение потоков по сети, исходя из выявленных объемов корреспонденций;
- определение вида используемого транспорта;
- определение кратчайших маршрутов следования корреспонденций.

Для решения второй подзадачи – выбора наилучшего варианта развития сети – используются методы:

- отбора хозяйственных мероприятий на основе статических показателей, обычно отношения системного эффекта от реализации мероприятия к бюджетным затратам на реализацию мероприятия (см., например, [19, 20, 24]);
- случайного поиска (см., например, [19, 20]);
- ветвей и границ (см., например, [24]).

Взаимодействие процессов решения двух подзадач образует циклическую процедуру, на каждой итерации которой происходит пересчет как транспортных потоков (1-я подзадача), так и уточнение набора хозяйственных мероприятий (2-я подзадача).

Важно подчеркнуть отличие предлагаемой в данной работе модели от существующих в мире разработок, которое состоит, прежде всего, в том, что объемы выделяемых инвестиций включают не только экзогенную, но и эндогенную часть. Эндогенная часть формируется из взимаемых налогов и привлекаемых коммерческих инвестиций, в том числе на строительство платных дорог. Плата за проезд формируется, исходя из интересов частного инвестора (максимизации выручки), что учитывается как в первой, так и во второй подзадаче. В качестве системного эффекта используется максимизация приведенного общественного эффекта, включающего, в том числе, и выгоды от дополнительных поездок, возникающие в результате улучшения транспортной инфраструктуры. Транспортные потоки определяются на основе модели типа гравитационной. Для выбора наилучших хозяйственных мероприятий используются различные вычислительные схемы с применением нескольких видов алгоритмов: статических, динамического и случайного поиска. Кроме того, разработан специальный алгоритм, позволяющий решать задачи с эндогенными бюджетными ограничениями.

Перейдем теперь непосредственно к формальному описанию предлагаемых алгоритмов и процедур решения поставленной задачи.

Исходная задача (1-36) выбора оптимального развития дорожной сети разбивается на два алгоритмических блока.

A. Определение транспортных потоков на дорогах сети при заданных технических состояниях.

B. Определение оптимального набора мероприятий по развитию сети при выбранных транспортных потоках.

Блок **B**, в свою очередь, состоит из последовательного решения двух подзадач:

B1. Определение набора наилучших мероприятий для каждого подпериода (статического сечения).

B2. Определение последовательности наилучших мероприятий в динамике.

Определение транспортных потоков на дорогах сети (решение задачи блока A)

При решении данной подзадачи технические состояния дорог заданы (значения $x_{\lambda\gamma}(t)$ известны). Необходимо решить оптимизационную задачу (30-36) с критерием (30).

В зависимости от используемого подхода (оптимизационный или имитационный) при распределении автомобилей по маршрутам учитывается одно из условий – (33) или (34).

Как отмечалось выше, при разбиении исходной задачи принимается допущение, что «каждой платной дороге соответствует параллельная «бесплатная» дорога. Выбор водителями, по какой дороге ехать – платной или бесплатной, – не меняет расстояние маршрута, но изменяет затраты времени, эксплуатационные затраты автомобилей, плату за проезд, дополнительные инвестиции в автомобильный транспорт). При этом средние (или предельные – при оптимизационном подходе) затраты передвижения по платной и бесплатной дороге автомобилями должны быть приблизительно равны (или точно равны) при условии, если обе дороги используются,

(иначе не будут соблюдаться условия (33) или (34) хотя бы для одной пары используемых маршрутов, каждый из которых включает платную или бесплатную дорогу).

3.1. Определение оптимального набора мероприятий по развитию сети при заданных транспортных потоках (решение задачи блока B)

Задача состоит в отыскании технических состояний дорог сети, обеспечивающих минимум общественных приведенных затрат при заданных транспортных потоках на дорогах сети. Эта задача, в свою очередь, разбивается на две подзадачи.

Определение набора наилучших мероприятий для каждого подпериода (статического сечения) (подзадача B1)

Расчетный период разбивается на статические сечения \hat{t} , и для каждого из них решается задача:

$$V(\hat{t}) - \Xi(\hat{t}) - I(\hat{t})E - I^{a.m.}(\hat{t}) - F(\hat{t}) + U(\hat{t}) \rightarrow \max, \quad (37)$$

где $I(\hat{t})E$ – стоимость привлекаемого капитала в общественных ценах;

$$I(\hat{t}) = k^u K(\hat{t}) \sum_{\tau=1, \tau^{max}} \frac{d_{\tau}}{(1+E)^{\tau-\tau^{max}-1}}, \quad (38)$$

$$I_{\lambda h}^{a.m.}(\hat{t}) = \sum_h \{ [1 - d_h^n] [s_h^{a.m.}(t) + s_h^{o.m.}(t)] * * 365 \frac{[w_{\lambda h}(\hat{t})N_{\lambda h}(\hat{t}) - w_{\lambda h}(\hat{t}-1)N_{\lambda h}(\hat{t}-1)]}{w_h^n} \}, \forall \lambda, h. \quad (39)$$

При этом, если статические сечения независимые, в качестве технических состояний дорог в предшествующем $(t-1)$ подпериоде рассматриваются начальные технические состояния при $t = 0$.

Остальные составляющие функционала рассчитываются по условиям, приведенным выше.

$$K(\hat{t}) + \sum_{t=1, \tau} [\Xi^{\phi}(t)] \leq \sum_{t=1, \tau} [I^{экз}(t) + I^{эндо}(t)], \quad (40)$$

где $\Xi^{\phi}(t)$ вычисляется по формуле (15).

Стоимость привлекаемых коммерческих кредитов должна быть не больше получаемых коммерческих выгод:

$$d_{\lambda}^e [P_{\lambda}^s(\hat{t}) + P_{\lambda}^n(\hat{t})] - d^{\phi.e} I_{\lambda}^k(\hat{t}) \geq 0, \forall \lambda; \quad (41)$$

$$d_{\lambda}^u [P_{\lambda}^s(t) + P_{\lambda}^n(t)] - d^{\phi.u} I_{\lambda}^u(t) \geq 0, \forall \lambda. \quad (42)$$

Подзадача **B1** включает условия (2-10), (12-16), (19), (20), (22), (23), (26-30), (37-42).

Определение набора наилучших мероприятий в динамике (подзадача B2)

Решение подзадачи **B1** может оказаться динамически противоречивым для некоторых дорог сети (например, если в качестве лучшего технического состояния за период $t + 1$ выбрана четырехполосная дорога, а за период t – шестиполосная магистраль). Чтобы устранить динамические противоречия, для подмножества «противоречивых» дорог при заданных транспортных потоках определяется оптимальная непротиворечивая последовательность реализации мероприятий.

Условия задачи **B2** совпадают с условиями (1-29), но при этом значения некоторых переменных закрепляют-

ся, а выделяемые инвестиции уменьшается на величину уже освоенных инвестиций, значения которых получены для динамической непротиворечивых решений с помощью задачи **B1**. Таким образом, использование условий (1-29) для задачи **B2** имеет следующие особенности.

1. Значения интенсивности движения автомобилей на дугах сети $N_{\lambda\gamma}(t)$ экзогенны.
2. Соответственно, выгоды от увеличения количества поездов равны нулю.
3. Индикаторы технических состояний дорог, $x_{\lambda\gamma}(t)$, для которых решение задачи **B1** оказалось динамически непротиворечивым, являются экзогенными.
4. Условие (21) модифицируется:

$$K(\hat{t}) + \sum_{t=1, \hat{t}} [\mathcal{E}^{\phi}(t)] \leq \sum_{t=1, \hat{t}} [I^{\text{экз}}(t) + I^{\text{энд}}(t)] - I^s(\hat{t}),$$

$$\forall \hat{t} = 1, \dots, T, \quad (43)$$

где $I^s(\hat{t})$ – освоенные инвестиции к году \hat{t} (нарастающим итогом) в коммерческих ценах для непротиворечивых последовательностей мероприятий (согласно решения подзадачи **B1**).

3.2. Расчетные алгоритмы и вычислительные схемы

Описание общей схемы

Взаимодействие блоков **A** и **B** образует циклическую процедуру (рис. 2), итерации которой будем называть внешними итерациями.

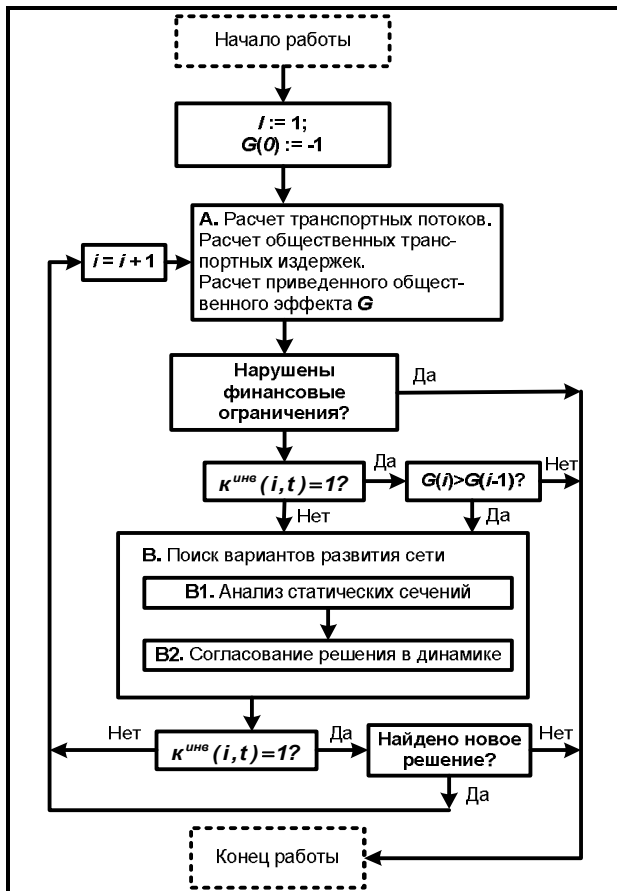


Рис. 2. Общая схема работы расчетного алгоритма (внешние итерации)

На первой внешней итерации общественный эффект от развития сети принимается равным 0, так как ни одно хозяйственное мероприятие не реализуется. На выходе из блока **A** рассчитываются суммарные транспортные и инвестиционные затраты, выгоды от увеличения количества поездов и на их основе – дисконтированный общественный эффект и выделяемые эндогенные инвестиции. Объемы выделяемых эндогенных инвестиций, полученные на блоке **B**, уточняются на следующей итерации на блоке **A**, из-за чего могут быть нарушены ограничения на выделяемые объемы инвестиций. Чтобы снизить риск выхода за ограничения, на каждой внешней итерации разрешается использовать только долю эндогенного объема инвестиций, которая постепенно с каждой новой внешней итерации увеличивается до 100%.

Например, если на первой внешней итерации выделены эндогенные инвестиции в объеме 10 единиц, то разрешается использовать на развитие сети только 1 единица (10%), на второй внешней итерации 20% (например, 4 единицы из 20 выделенных) и т.д. Обозначив $\hat{i}^{\text{энд}}(i, t)$ часть используемых эндогенных инвестиций на внешней итерации i (здесь и далее i – индекс внешних итераций), запишем:

$$\hat{i}^{\text{энд}}(i, t) = k^{\text{унв}}(i, t) I^{\text{энд}}(i, t), \quad (44)$$

где $k^{\text{унв}}(i, t)$ – заданные коэффициенты. Коэффициенты $k^{\text{унв}}(i, t)$ не могут быть больше 1.

Работа расчетной программы завершается в трех случаях:

- если дисконтированный общественный эффект, рассчитанный для допустимого решения на выходе из блока **A**, не увеличился в сравнении с предыдущим допустимым решением при условии, что $k^{\text{унв}}(i, t) = 1$;
- если на выходе из блока **A** были нарушены ограничения на объемы выделяемых инвестиций;
- если на блоке **B** найдено решение, совпадающее с решением на предыдущей итерации при условии, что $k^{\text{унв}}(i, t) = 1$.

В качестве итогового решения принимается наилучшее допустимое решение.

3.3. Алгоритмы расчета интенсивности движения автомобилей на дорогах сети (блок A)

Алгоритм расчета транспортных потоков на дорогах сети разбивается на два этапа.

- На первом этапе находится допустимое решение с помощью последовательного наложения на сеть потоков корреспонденций по частям на основе априорной экзогенной оценки транспортных потоков на дугах (например, полученных для предыдущего подпериода или на предыдущей внешней итерации).
- На втором этапе найденное решение уточняется итерационной процедурой перераспределения потоков. Каждая итерация перераспределения потоков состоит из двух частей:
 - 1) уточняющие расчеты маршрутов при закрепленных корреспонденциях;
 - 2) перерасчет матрицы корреспонденций с последовательным наложением ее на сеть.

Второй этап является не обязательным.

Расчет проводится последовательно для каждого года расчетного периода, при этом результаты расчета года t не зависят от результатов года $t - 1$. В нижеследующих записях формул индекс t опущен.

Поиск допустимого решения

На первом этапе находится допустимое решение с помощью последовательного наложения на сеть потоков корреспонденций по частям на основе априорной экзогенной оценки транспортных потоков на дугах (например, полученных для предыдущего подпериода или на предыдущей большой итерации).

Эта процедура проходит экзогенно заданное количество итераций k^{nn} . Схема итерации показана на рис. 3.

В зависимости от заданных параметров вычисляются значения на дугах сети (расстояние, затраты времени, пользовательские или общественные затраты; предельные или средние затраты), для поиска кратчайших маршрутов. В качестве приближенной оценки предельных затрат на дугах сети используется отношение прироста затрат к небольшой величине прироста интенсивности движения.

Пересчет пользовательских затрат выполняется перед каждой последовательностью наложений «пункт отправления – все корреспондирующие пункты назначения» для всех видов автомобилей. В сравнении с пересчетом издержек перед наложением каждой корреспонденции это позволяет повысить время выполнения программы в ущерб точности решения задачи блока. Но, учитывая неопределенность прогноза объемов корреспонденций, неточности оценок функций «скорость – интенсивность движения» и приближенности оценок характеристик новых технических состояний, субъективности выбора водителями маршрутов, такое округление расчетов целесообразно в практических целях.

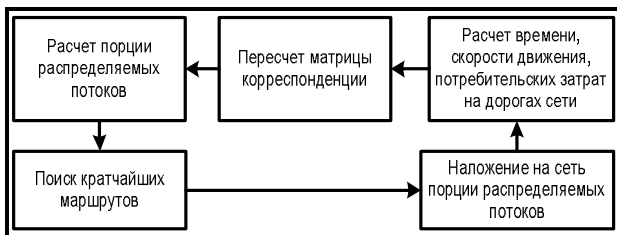


Рис. 3. Схема алгоритма поиска начального решения распределения транспортных потоков

На каждой итерации \hat{i} по наилучшему маршруту каждой корреспонденции распределяется количество поездок автомобилей $N_{ish}^+(\hat{i})$, которое является частью объемов корреспонденции начального пункта I и конечного пункта s автомобилей вида h .

$$N_{ish}^+(\hat{i}) = \max[k_h(\hat{i})A_{ish}(\hat{i}) - N_{ish}^{pcn}(\hat{i}-1); 0] / (k^{nn} - \hat{i} + 1), \forall s, h. \tag{45}$$

где

$A_{ish}(\hat{i})$ – объемы корреспонденции, рассчитанные на основе текущих значений потребительских издержек кратчайших маршрутов по формуле (35) без учета значений k_h . $N_{ish}^{pcn}(\hat{i}-1)$ – уже распределенные объемы корреспонденции на предыдущих итерациях;

$(k^{nn} - \hat{i} + 1)$ – оставшееся количество итераций, включая текущую;

$k_h(\hat{i})$ – коэффициент, регулирующий итерационный процесс так, чтобы не были нарушены ограничения на использование парка автомобилей (36).

$$k_h(\hat{i}) = 1 \text{ при } \frac{B_h^{mp}(\hat{i}-1)}{B_h^{mp..h}} \leq \frac{\hat{i}-1}{k^{nn}} \leq \frac{B_h^{mp}(\hat{i}-1)}{B_h^{mp..e}};$$

$$k_h(\hat{i}) = \frac{B_h^{mp}(\hat{i}-1)}{B_h^{mp..e}} \frac{k^{nn}}{\hat{i}-1} \text{ при } \frac{\hat{i}-1}{k^{nn}} \geq \frac{B_h^{mp}(\hat{i}-1)}{B_h^{mp..e}};$$

$$k_h(\hat{i}) = \frac{B_h^{mp}(\hat{i}-1)}{B_h^{mp..h}} \frac{k^{nn}}{\hat{i}-1} \text{ при } \frac{\hat{i}-1}{k^{nn}} \leq \frac{B_h^{mp}(\hat{i}-1)}{B_h^{mp..h}}, \tag{46}$$

где $B_h^{mp}(\hat{i}-1)$ – использование парка автомобилей после итерации $\hat{i}-1$.

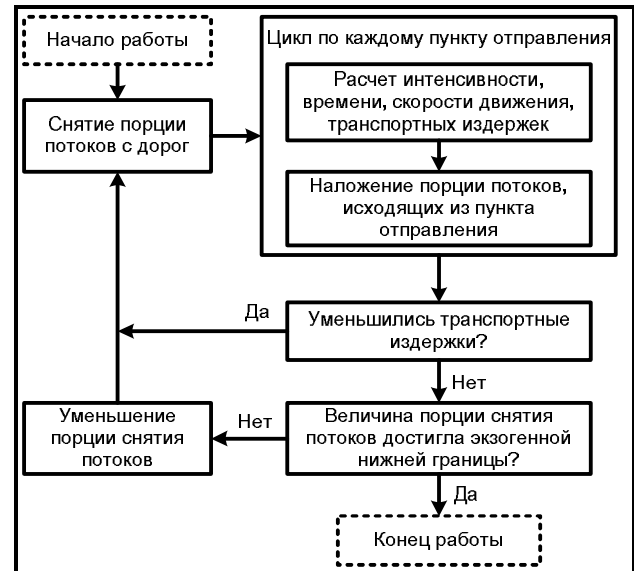


Рис. 4. Схема работы алгоритма перераспределения маршрутов

Уточнение допустимого решения (II этап блока А)

Процедура уточнения допустимого решения состоит из 2 частей:

- перераспределения маршрутов;
- наложения потоков на сеть.

Каждая часть процедуры имеет свой итерационный алгоритм (итерации которого будем называть малыми). Кроме того, две части расчетной процедуры также связаны между собой итерационным процессом (итерации которого будем называть большими итерациями). 1-я часть процедуры состоит в последовательном снятии части транспортных потоков с сети, а затем наложении по вновь найденным кратчайшим маршрутам (рис. 4), при этом матрица корреспонденций не меняется. Объемы корреспонденций $A_{ish}(\tilde{i})$ (\tilde{i} – номер большой итерации) передаются из 2-й части процедуры перераспределения потоков при $\tilde{i} > 1$ или из этапа I поиска допустимого решения при $\tilde{i} = 1$.

Малая итерация начинается с уменьшения потоков автомобилей для каждой дуги сети на величину $N_{\lambda h}^-(y)$ (y – номер малой итерации):

$$N_{\lambda h}^-(y, t) = u(y) \cdot N_{\lambda h}(y-1), \forall \lambda, h, \tag{47}$$

где $u(y)$ – коэффициент от 0 до 1 (ближе к 0);

$N_{\lambda h}(y-1)$ – интенсивность движения автомобилей для дуги λ , полученная на предыдущей итерации или в ре-

зультате поиска начального решения (при $y = 1$). После снятия части транспортных потоков пересчитываются транспортные издержки и критерии выбора маршрутов.

На вновь найденные кратчайшие маршруты распределяется часть транспортных потоков $N_{ish}^+(y)$:

$$N_{ish}^+(y) = u(y)A_{ish}, \forall i, s, h, \quad (48)$$

при этом пересчет затрат выполняется перед каждой последовательностью наложений «пункт отправления – все корреспондирующие пункты назначения» для всех видов автомобилей.

После каждой итерации y вычисляется значение суммарных по сети транспортных субъективных потребительских затрат, используемых при выборе маршрутов, $L(y)$ за анализируемый год.

Коэффициент u в ходе реализации итерационной процедуры пробегает значения от верхней до нижней границы, заданных экзогенно, при этом в случае «неудачной» итерации, т.е. итерации в результате которой не произошло уменьшения суммарных транспортных издержек L , коэффициент u уменьшается в заданное число раз:

$$u(y+1) = \max\{u_a; \frac{u(y)}{u_b}\}, \text{ если } L(y) \geq L(y-1); \quad (49)$$

$$u(y+1) = u(y), \text{ если } L(y) < L(y), \quad (50)$$

где u_a – минимальный шаг перераспределения потоков; u_b – темп замедления шага в случае неудачной итерации.

На первой итерации коэффициенту u присваивается начальное экзогенное значение. Если $L(y) \geq kL(y-1)$ и $u(y) = u_a$, процедура перераспределения транспортных потоков при заданных объемах корреспонденций завершена.

По завершении 1-й части большой итерации \tilde{i} рассчитываются «должные» объемы корреспонденции $A'_{ish}(\tilde{i})$, то есть объемы, соответствующие полученным потребительским затратам (35) и ограничениям (36). Для этого необходимо в формулу (35) подставить k_h , рассчитанные по следующим правилам:

$$k_h(\tilde{i}) = 1 \text{ при } B_h^{mp..h}(\tilde{i}) \leq B_h^{mp}(\tilde{i}) \leq B_h^{mp..e}(\tilde{i});$$

$$k_h(\tilde{i}) = \frac{B_h^{mp..h}(\tilde{i})}{B_h^{mp}(\tilde{i})} \text{ при } B_h^{mp}(\tilde{i}) \leq B_h^{mp..h}(\tilde{i});$$

$$k_h(\tilde{i}) = \frac{B_h^{mp}(\tilde{i})}{B_h^{mp..e}(\tilde{i})} \text{ при } B_h^{mp}(\tilde{i}) \geq B_h^{mp..e}(\tilde{i}). \quad (51)$$

2-я часть большой итерации состоит в наложении вновь найденных объемов корреспонденции, которые не меняются в процессе наложения на сеть. Процедура включает оценку новых объемов корреспонденции (см. далее), обнуление всех потоков на дугах сети и собственно процедуру наложения потоков, которая также является итерационной процедурой и состоит из \tilde{k}_{nn} итераций.

На каждой малой итерации \tilde{y} по наилучшему маршруту каждой корреспонденции распределяется количество поездок автомобилей, $N_{ish}^+(\tilde{y})$:

$$N_{ish}^+(\tilde{y}) = A_{ish}(\tilde{i}) / \tilde{k}^{nn}, \forall s, h. \quad (52)$$

Схема наложения потоков приводится на рис. 5.

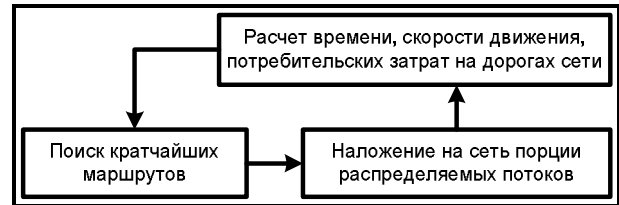


Рис. 5. Схема алгоритма наложения потоков при уточнении допустимого решения

Пересчет корреспонденций выполняется после завершения 1-й части большой итерации.

Сначала вычисляется сумма расхождений по модулю:

$$\Delta(\tilde{i}) = \sum_{i,s,h} |A_{ish}(\tilde{i}) - A'_{ish}(\tilde{i})|, \quad (53)$$

при этом начальное значение отклонения $\Delta(0)$ – большое число.

Новые объемы корреспонденций $A_{ish}(\tilde{i}+1)$ определяются по формуле:

$$A_{ish}(\tilde{i}+1) = A'_{ish}(\tilde{i})\tilde{u}(\tilde{i}) + A_{ish}(\tilde{i})[1 - \tilde{u}(\tilde{i})], \quad (54)$$

где $\tilde{u}(1)$ – заданный начальный параметр.

Если отклонение увеличивается, $\Delta(\tilde{i}) > \Delta(\tilde{i}-1)$, параметр $\tilde{u}(\tilde{i})$ постепенно уменьшается, пока не достигнет заданного минимального значения \tilde{u}_a .

Если $\tilde{u}(\tilde{i}) = \tilde{u}_a$ и $\Delta(\tilde{i}) > \Delta(\tilde{i}-1)$, II этап блока А завершен. Схема работы алгоритмов блока А приводится на рис. 6.

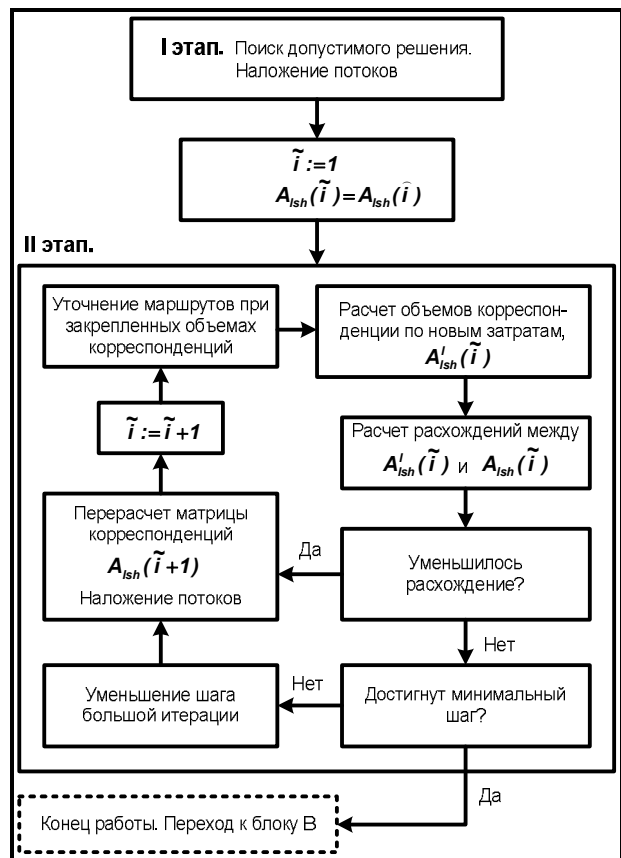


Рис. 6. Укрупненная схема расчетов блока А

Особенности расчета интенсивности движения на платных дорогах

Согласно принятым допущениям, каждой платной дороге должна соответствовать параллельная бесплатная. При процедурах поиска кратчайших маршрутов, наложения и перераспределения потоков каждая дорога из такой пары рассматривается как отдельная дуга. Корректировка тарифов на проезд и интенсивности движения автомобилей с учетом условия (30) выполняется при расчете потребительских затрат.

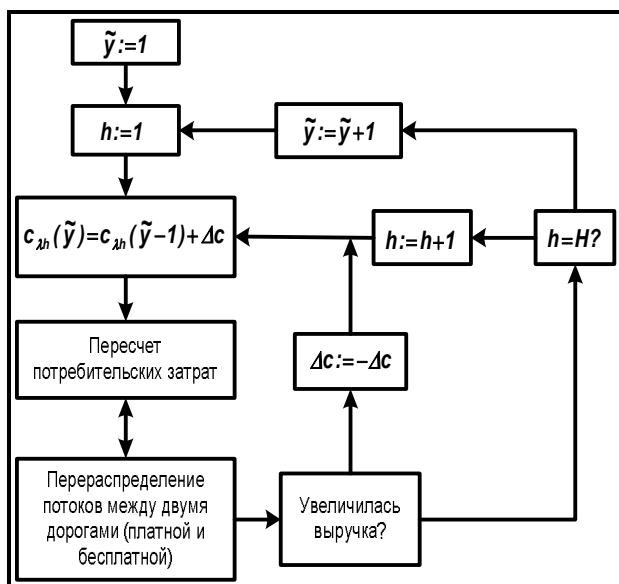


Рис. 7. Алгоритм определения тарифов за проезд

При этом сумма интенсивностей движения на паре дорог не меняется:

$$N_{\lambda h}(\tilde{y}) + N_{\lambda h}(\tilde{y}) = N_{\lambda h}(0) + N_{\lambda h}(0), \forall h, \quad (55)$$

где

$\hat{\lambda}$ – платная дорога;

λ – бесплатная дорога;

\tilde{y} – индекс итерации поиска оптимальных тарифов за проезд;

$N_{\lambda h}(0)$ и $N_{\lambda h}(0)$ – интенсивность движения, полученная после наложения на сеть потоков, но до выполнения расчета потребительских затрат.

Поиск оптимальных тарифов за проезд выполняется итерационно. На каждой итерации изменяется тариф только для одного вида транспорта:

$$c_{\lambda h}(\tilde{y}) = \max[c_{\lambda h}(\tilde{y}-1) \pm \Delta c; 0], \quad (56)$$

где Δc – допустимая точность (например, 1 руб.).

Начальное значение $c_{\lambda h}(0)$ передается из предыдущей процедуры определения оптимальных тарифов, выполненной на блоке А или на блоке В (см. далее). На 1-й внешней итерации блока А все тарифы равны нулю.

После каждой итерации выполняется перерасчет потребительских затрат. При этом с заданной погрешностью $\tilde{\varepsilon}$ должны выполняться условия:

$$z'_{\lambda h} - \tilde{\varepsilon} \leq z'_{\lambda h} \leq z'_{\lambda h} + \tilde{\varepsilon},$$

или

$$z'_{\lambda h} - \tilde{\varepsilon} \leq z_{\lambda h} \leq z_{\lambda h} + \tilde{\varepsilon}. \quad (57)$$

Равенство (57) достигается порционным перераспределением интенсивности движения с дуги, для которой субъективные потребительские затраты выше, на дугу, для которой эти затраты меньше.

Если в результате итерации увеличилась суммарная выручка за проезд на платной дороге $\hat{\lambda}$, анализируется следующий по порядку нумерации вид автомобилей. Иначе возвращается предыдущее значение тарифа и интенсивностей движения, а для новой итерации в условии (56) меняется знак, после которой независимо от ее результатов, анализируется другой вид автомобилей. Процесс завершается, если не найдено большее значение суммарной выручки (30) в результате просмотра всех видов автомобилей. Схема алгоритма приводится на рис. 7.

Определение набора наилучших мероприятий для статических сечений (подзадача В1)

Эвристическая процедура выбора наилучших мероприятий для статических сечений состоит из двух частей и требует задания двух критериев: сначала для каждой дороги выбирается наилучшее хозяйственное мероприятие по критерию 1, а затем выбранные мероприятия по всей сети ранжируются по критерию 2, начиная с наилучшего. И критерий 1, и критерий 2 могут быть двух видов: либо отношением статического эффекта к инвестициям в хозяйственное мероприятие (аналог индекса доходности):

$$E_{\lambda\gamma}^{ot}(\hat{t}) = \frac{F_{\lambda\gamma_0} - F_{\lambda\gamma} + \mathcal{E}_{\lambda\gamma_0} - \mathcal{E}_{\lambda\gamma} + I_{\lambda\gamma_0}^{a.m.} - I_{\lambda\gamma}^{a.m.} - U_{\lambda\gamma_0} + U_{\lambda\gamma} + I_{\lambda\gamma} E}{K_{\lambda\gamma} - I_{\lambda\gamma}^{энд} + I_{\lambda\gamma_0}^{энд}}, \quad (58)$$

либо статическим эффектом сокращения издержек:

$$E_{\lambda\gamma}^{ab}(\hat{t}) = F_{\lambda\gamma_0} - F_{\lambda\gamma} + \mathcal{E}_{\lambda\gamma_0} - \mathcal{E}_{\lambda\gamma} + I_{\lambda\gamma_0}^{a.m.} - I_{\lambda\gamma}^{a.m.} - U_{\lambda\gamma_0} + U_{\lambda\gamma} + I_{\lambda\gamma} E, \quad (59)$$

где

$F_{\lambda\gamma}$ и $F_{\lambda\gamma_0}$ – суммарные транспортные затраты в общественных ценах дороги λ в период t при заданной интенсивности движения автомобилей и техническом состоянии соответственно;

γ (искомое техническое состояние дороги) и γ_0 – (исходное техническое состояние);

$\mathcal{E}_{\lambda\gamma}$ и $\mathcal{E}_{\lambda\gamma_0}$ – эксплуатационные расходы дороги λ в период t при заданной интенсивности движения автомобилей и техническом состоянии соответственно γ и γ_0 ;

$I_{\lambda\gamma}^{a.m.}$ и $I_{\lambda\gamma_0}^{a.m.}$ – дополнительные инвестиции в автотранспорт;

$I_{\lambda\gamma}^{энд}$ и $I_{\lambda\gamma_0}^{энд}$ – эндогенные объемы инвестиций:

$$I_{\lambda\gamma} = k^u K_{\lambda\gamma} \sum_{\tau=t}^{\tau_{max}-1} \frac{d_{\tau}}{(1+E)^{\tau-t}}. \quad (60)$$

Так как в разработанной вычислительной схеме (рис. 8) виды критериев как выбора мероприятий на дорогах, так и их ранжирования по сети, а также виды статических сечений могут меняться, алгоритм имеет несколько вариантов реализации.

Могут применяться два вида сечений: независимые и зависимые. В случае зависимых статических сечений выбор хозяйственных мероприятий для года t ищется с учетом его совместимости (непротиворечивости) с

решением, полученным для года $t-1$. В случае независимых сечений решения, полученные для предыдущего года, не влияют на решения для года t .

Чтобы выбрать наилучший вариант для некоторой дороги λ программа просматривает все возможные ХМ на данной дороге и выбирает мероприятие по одному из двух критериев (58) или (59). Завершив просмотр всех дорог сети, программа ранжирует выбранные мероприятия по величине критерия (58) или (59).

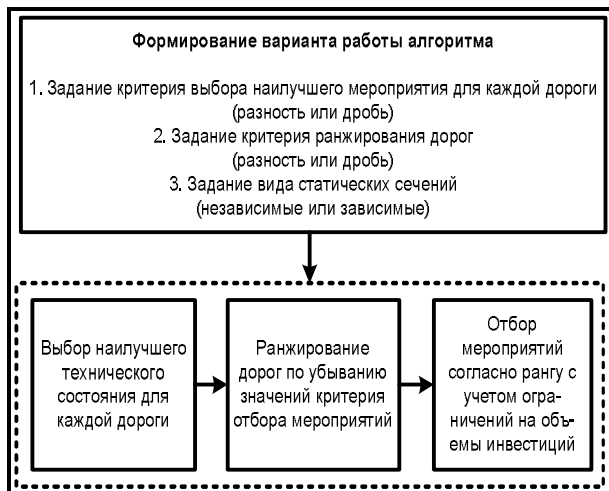


Рис. 8. Алгоритм поиска наилучших хозяйственных мероприятий для статических сечений

Выбранные варианты, начиная с проекта первого по рангу, «накладываются» на сеть до тех пор, пока соблюдаются финансовые ограничения (21) или не все предварительно отобранные проекты реализованы. Если последовательный просмотр дуг сети находит мероприятие, реализация которого приведет к нарушению ограничений на инвестиции, данное мероприятие отбрасывается и программа анализирует следующее по убыванию мероприятие.

Когда все статические сечения рассмотрены и хотя бы одно изменение в технических состояниях дорог в сравнении с предыдущей большой итерацией или исходными состояниями сети выбрано, программа переходит к этапу В2.

3.4. Динамический поиск наилучших мероприятий

Эвристическая процедура уточнения решения задачи с учетом динамической непротиворечивости состоит из четырех этапов (рис. 9).

1. Проверка динамической непротиворечивости решений, полученных в результате решения статических задач,
2. Выбор оптимальных решений, динамически непротиворечивых, по развитию каждой дороги,
3. Ранжирование реконструируемых или строящихся дорог по убыванию сокращения суммарных чистых приведенных затрат,
4. Отбор мероприятий с учетом ограничений на инвестиции. Второй, третий и четвертый этапы образуют циклическую процедуру, которая повторяется для каждого периода t .

Первый этап

На первом этапе проверяется динамическая непротиворечивость решения подзадач В1. Для дорог с непротиворечивым развитием технических состояний вычисляется общественный эффект. Дорогам с рассогласо-

ванным развитием «возвращается» первоначальное техническое состояние.

Второй этап

На втором этапе реализуется процедура динамического программирования для решения задачи (1-20), (24-29) с учетом изложенных выше модификаций. Ограничения на инвестиции не учитываются.

Шаг 1. Для каждого технического состояния дороги λ рассчитывается дисконтированные общественные затраты без учета инвестиций в развитие дорог и дополнительных инвестиций в автомобильный транспорт, $D_{\lambda\gamma}^*(T)$:

$$D_{\lambda\gamma}^*(T) = (U_{\lambda\gamma_0}(T) - U_{\lambda\gamma}(T) + \mathcal{E}_{\lambda\gamma}(T) - \mathcal{E}_{\lambda\gamma_0}(T) + F_{\lambda\gamma}(T) - F_{\lambda\gamma_0}(T)) \frac{1}{(1+E)^T} \quad (61)$$

Индексу t присваивается значение $T-1$.

Шаг 2. Для каждой допустимой (с точки зрения динамической согласованности) пары технического состояния в году t , γ , и технического состояния в году $t+1$, γ_{t+1} , вычисляются значения общественных приведенных затрат за период с t по T :

$$D_{\lambda\gamma_{t+1}}(t) = (U_{\lambda\gamma_0}(t) - U_{\lambda\gamma}(t) + \mathcal{E}_{\lambda\gamma}(t) - \mathcal{E}_{\lambda\gamma_0}(t) + F_{\lambda\gamma}(t) - F_{\lambda\gamma_0}(t)) \frac{1}{(1+E)^t} + \frac{1}{(1+E_n)^{t+1}} * (I_{\lambda\gamma_{t+1}} - I_{\lambda\gamma} + I_{\lambda\gamma_{t+1}}^{a.m.}(t+1)) + D_{\lambda\gamma_{t+1}}^*(t+1) \quad (62)$$

и выбирается минимальное из них:

$$D_{\lambda\gamma}^*(t) = \min_{\gamma_{t+1}} D_{\lambda\gamma_{t+1}} \quad (63)$$

Шаг 3. Если $t > 1$, t присваивается значение $t-1$ и осуществляется переход на шаг 2. Иначе выполняется шаг 4.

Шаг 4. Вычисляются значения общественных приведенных затрат для каждого технического состояния за весь расчетный период:

$$D_{\lambda\gamma}(0) = \frac{1}{1+E} (I_{\lambda\gamma} + I_{\lambda\gamma}^{a.m.}) + D_{\lambda\gamma}^*(1) \quad (63)$$

и определяется минимальное из них:

$$D_{\lambda\gamma_0}^*(0) = \min_{\gamma} D_{\lambda\gamma}(0) \quad (63)$$

Оптимальная последовательность технических состояний включает те состояния, при которых достигаются минимумы $D_{\lambda\gamma}^*(t)$ и $D_{\lambda\gamma_0}^*(0)$.

Третий этап

Третий этап заключается в ранжировании дорог по убыванию значений $-D_{\lambda\gamma_0}^*(t)$ последовательно для $t = 0, \dots, T-1$ (каждому t соответствует своя ранжировка дорог) и отборе мероприятий согласно проведенному ранжированию при соблюдении ограничений на инвестиции (21).

Алгоритм третьего этапа заключается в следующем.

Шаг 1. $K(t) := 0, \forall t$. Индексу t присваивается значение 0.

Шаг 2. Индексы дорог перенумеровываются в соответствии с порядком по убыванию значений $-D_{\lambda\gamma_0}^*(t)$. Индексу λ присваивается значение 1.

Шаг 3. Для каждого года \hat{t} , $\hat{t} = t, \dots, T$, проверяется соблюдение условий:

$$K(\hat{t}) + K_{\lambda}(\hat{t}) + \sum_{t=\hat{t}, t}^{\infty} \Delta^{\theta}(t) \leq \sum_{t=\hat{t}, t}^{\infty} [I^{\text{экс}}(t) + I^{\text{энд}}(t)] - I^s(\hat{t}), \forall \hat{t}, \quad (64)$$

где $K_{\lambda}(\hat{t})$ – инвестиции в году \hat{t} (нарастающим итогом) в коммерческих ценах, необходимые для реализации последовательности технических состояний, при которых достигается максимум $-D_{\lambda\gamma}^*(t)$. Если одно из условий (64) не выполняется, алгоритм переходит на шаг 5.

Шаг 4. Переменным $K(\hat{t})$ присваиваются значения $K(\hat{t}) + K_{\lambda}(\hat{t}), \forall \hat{t}$.

Шаг 5. Индексу λ присваивается значение $\lambda + 1$. Если не все дороги просмотрены, выполняется переход на шаг 3.

Шаг 6. Индексу t присваивается значение $t + 1$. Если $t = T$, алгоритм заканчивает свою работу. Иначе переход на шаг 2.

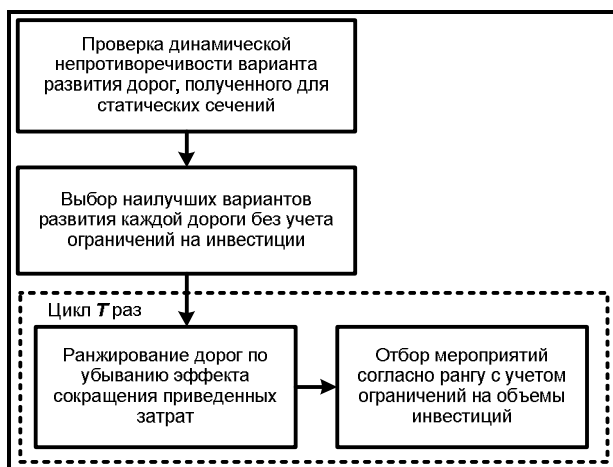


Рис. 9. Алгоритм поиска наилучших хозяйственных мероприятий в динамике

Процедуры ранжирования дорог и отбора мероприятий образуют циклическую процедуру и выполняются для $t = 0, \dots, T - 1$. Это обеспечивает, в первую очередь, отбор мероприятий по сети, наилучших для всего расчетного периода. При обнаружении конфликта с ограничениями, алгоритм переходит к поиску мероприятий по сети, наилучших для временного отрезка [2]. Индексу t присваивается значение $t + 1$, снова выполняются ранжирование и отбор мероприятий, пока соблюдаются ограничения на инвестиции. При их нарушении цикл повторяется, пока не будет просмотрен временной отрезок, состоящий из подпериода T .

Если в результате решения подзадачи **B** выбрано хотя бы одно новое техническое состояние, программа снова переходит к блоку **A** (см. рис. 2). Иначе программа заканчивает работу. На новой большой итерации программа осуществляет поиск лучшего решения в сравнении с найденным на предыдущей итерации.

Особенности выбора хозяйственных мероприятий на платных дорогах

Расчет затрат для пары платной и бесплатной дорог выполняется в соответствии с изложенным выше алгоритмом. Алгоритм выполняется для каждой пары технических состояний $\tilde{\gamma}$ и γ , где $\tilde{\gamma}$ – техническое состоя-

ние платной дороги $\tilde{\lambda}$, γ – техническое состояние бесплатной дороги λ .

На блоке **B** каждая пара платной и бесплатной дорог $\tilde{\lambda}$ и λ объединяется в одну условную дорогу $\hat{\lambda}$, а каждая пара технических состояний $\tilde{\gamma}$ и γ рассматривается в качестве условного технического состояния $\hat{\gamma}$ условной дороги $\hat{\lambda}$:

$$I_{\lambda\gamma} = I_{\lambda\gamma} + I_{\tilde{\lambda}\tilde{\gamma}}; \quad (65)$$

$$\bar{K}_{\lambda\gamma} = \bar{K}_{\lambda\gamma} + \bar{K}_{\tilde{\lambda}\tilde{\gamma}}; \quad (66)$$

$$E_{\lambda\gamma}^{ab} = E_{\lambda\gamma}^{ab} + E_{\tilde{\lambda}\tilde{\gamma}}^{ab}; \quad (67)$$

$$I_{\lambda\gamma}^{\text{энд}} = I_{\lambda\gamma}^{\text{энд}} + I_{\tilde{\lambda}\tilde{\gamma}}^{\text{энд}}; \quad (68)$$

$$I_{\lambda\gamma_0}^{\text{энд}} = I_{\lambda\gamma_0}^{\text{энд}} + I_{\tilde{\lambda}\tilde{\gamma}_0}^{\text{энд}}; \quad (69)$$

$$E_{\lambda\gamma}^{\text{от}} = \frac{E_{\lambda\gamma}^{ab}}{\bar{K}_{\lambda\gamma} - I_{\lambda\gamma}^{\text{энд}} + I_{\lambda\gamma_0}^{\text{энд}}}. \quad (70)$$

Для выполнения процедуры отбора мероприятий с учетом ограничений на инвестиции каждая пара платной и бесплатной дорог $\tilde{\lambda}$ и λ объединяется в одну условную дорогу $\hat{\lambda}$.

4. ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ, ВКЛЮЧАЕМЫХ В МОДИФИЦИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ЭФФЕКТИВНЫХ ВАРИАНТОВ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ

Представим подходы к формированию оценок параметров, включаемых в предлагаемые модифицированные алгоритмы синтеза эффективных вариантов развития транспортных сетей, которые разработаны в части:

- характеристик спроса в виде шахматной таблицы корреспонденций;
- оценок внетранспортных эффектов через анализ межотраслевых взаимодействий;
- затратных характеристик в виде нелинейных зависимостей издержек от загрузки дуг одно- или многопродуктовыми потоками на разных иерархических уровнях магистральной сети).

4.1. Подходы к моделированию характеристик спроса

Предлагаемые методы формирования спроса в виде шахматных таблиц корреспонденций, включаемые в блок **A** процедуры выбора оптимального варианта развития сети, заключаются в следующем.

Расчет матрицы корреспонденций, непосредственно включаемый в процедуру распределения (самоорганизации) потоков по сети с заданными техническими состояниями ее элементов, может выполняться с использованием нескольких типов зависимостей, прежде всего по моделям типа гравитационной или экспоненциальной. Объем каждой корреспонденции считается прямо пропорциональным произведению показателей привлекательности начального и конечного пунктов и обратно пропорциональным показателю трудности сообщения. Кроме того, используются статистические агрегаты для балансировки полученных результатов с

наблюдаемыми данными, а именно суммарные затраты времени используемых транспортных средств [30].

В предыдущих работах по оптимизации сетевых транспортных структур отыскание наиболее эффективных вариантов сетевого развития выполнялось при условии заданной матрицы корреспонденций, что является существенным упрощением моделирования поведения потребителей транспортных услуг. В данной постановке «стихийным», определяемым на уровне потребителей, является не только поиск наилучших маршрутов (альтернатив – в общесетевой постановке), но и формирование связей между пунктами сети (целей).

Расчет матрицы корреспонденций выполняется с помощью двух последовательных итерационных процедур: первоначальной оценки матрицы корреспонденций и уточнения матрицы корреспонденций.

Каждая итерация процедуры первоначальной оценки матрицы корреспонденций представляет собой метод наложения потоков с последующим пересчетом затрат передвижения на дугах, соответственно, затрат передвижения по маршрутам и пересчетом матрицы корреспонденций после наложения каждой порции потоков, исходящих из одного пункта отправления во все пункты назначения. Новая порция накладываемых на сеть потоков для каждой корреспонденции определяется как разность между новыми расчетными объемами корреспонденции и уже наложенными на сеть потоками из объемов данной корреспонденции и затем корректируется с учетом оставшихся неиспользованными ресурсами транспортной работы (для автодорожных сетей – в машино-часах).

После завершения процедуры первоначальной оценки транспортных потоков (в блоке **A**) возможно выполнение уточняющих расчетов транспортных потоков, которые включают:

- а) расчеты корреспонденций,
- б) уточняющие расчеты маршрутов при закрепленных корреспонденциях.

Управление итерационной процедурой происходит таким образом, чтобы постепенно сужать границы оценок объемов корреспонденций, пока не будет достигнута требуемая точность или не произойдет расхождение процесса. В последнем случае уточняются параметры итерационного алгоритма – меняется шаг корректировки, вводится демпфирование и т.д.

4.2. Моделирование оценок внутранспортных эффектов

В качестве одного из возможных вариантов расчета внутранспортных эффектов (применительно к автомобильным перевозкам) предложен новый подход к оценке экономической эффективности глобальной для страны в целом программы развития сети автомобильных дорог. Суть этого подхода заключается в использовании модели динамического межотраслевого баланса для определения влияния достигаемого совершенствования сети автомобильных дорог на динамику ВВП страны [31, 32]. Указанное влияние учитывается через зависимость удельных затрат автомобильного транспорта от технико-эксплуатационных параметров сети, а также через внутранспортные эффекты, порождаемые увеличением скорости движения автомобилей, повышением надежности круглогодичного сообщения по местной сети дорог.

В основу предлагаемого подхода приняты следующие положения. Уменьшение удельных (на единицу

объема перевозочной работы) затрат автомобильного транспорта создает потенциальную возможность снижения его перевозочных тарифов. Грузовые тарифы влияют на стоимость приобретения товаров, используемых в производстве товаров и услуг, а также в конечном потреблении. Снижение грузовых автотранспортных тарифов ведет к снижению себестоимости производства товаров и услуг, что, при прочих равных условиях, позволяет либо непосредственно увеличить добавленную стоимость, создаваемую в отраслях, а следовательно, и ВВП страны в целом, либо способствует снижению цен производителей, что приводит к увеличению спроса на произведенные товары и услуги, а через это – опять-таки к росту ВВП, исчисленного в сопоставимых ценах. Снижение транспортной наценки на произведенные товары ведет к дополнительному (сверх снижения цен производителей) снижению цен приобретения товаров (цен покупателей), что еще более увеличивает спрос на них и величину ВВП страны.

Не меньшее, а возможно, и большее значение, чем снижение грузовых транспортных тарифов, может иметь повышение скорости доставки грузов и их сохранности в процессе транспортировки. Технично-эксплуатационное состояние автомобильных дорог оказывает непосредственное и весьма существенное влияние на оба эти параметра перевозочного процесса.

Повышение скорости движения грузовых автомобилей позволяет каждому покупателю расширить зону, в которой расположены доступные ему поставщики, что усиливает конкуренцию между последними. В российских условиях, где доля торгово-посреднической наценки чрезвычайно завышена, усиление конкуренции приведет, в первую очередь, к снижению этой наценки, а следовательно, и к снижению цен покупателей без существенного снижения цен производителей. Тем самым условия хозяйствования покупателей будут улучшены без ухудшения условий хозяйствования производителей. В первую очередь это относится к продукции, имеющей высокую степень готовности – к продукции машиностроения и металлообработки, легкой и пищевой промышленности.

Эффект от развития и улучшения сети территориальных дорог включает, кроме повышения скорости движения автомобилей, резкое снижение (вплоть до практической ликвидации) потерь продукции сельскохозяйственного производства, вызываемых как несвоевременным вывозом ее с полевых и первичных производственных складов, так и ее распылением, рассыпанием и потерей потребительских качеств во время ее перевозок по неблагоустроенным дорогам. Улучшение качества территориальных дорог приведет также к снижению потерь минеральных и химических удобрений, используемых в сельском хозяйстве России.

Изложенные соображения определяют в совокупности влияние развития и улучшения сети автомобильных дорог на показатели удельных затрат продуктов, используемых в производстве, в расчете на единицу объема выпуска продукции. Снижение удельных материальных затрат на производство продукции приводит к увеличению добавленной стоимости, которое, в свою очередь, является источником прироста инвестиций в отраслях народного хозяйства и валового накопления основного капитала по стране в целом.

Кроме рассмотренных выше изменений удельных затрат, которые можно рассматривать как первичные, имеют место вторичные изменения, индуцированные

приростом валового накопления основного капитала. Его влияние на складывающуюся в последующих периодах времени удельную материалоемкость порождается тем, что этот прирост воплощается во вводе новых производственных мощностей, которые для производства продукции требуют, как правило, меньших удельных материальных затрат, чем существующие «старые» производственные мощности.

Основные элементы модели межотраслевого баланса – матрица коэффициентов прямых затрат и компоненты вектора конечного использования продукции – формируются с учетом их зависимости от затрат дорожного хозяйства, качества автомобильных дорог, влияния на производительность и эффективность работы автомобильного транспорта, а также влияния тарифов автомобильного транспорта, скорости транспортировки грузов и пассажиров, сохранности перевозимых грузов на условия хозяйственной деятельности отраслей народного хозяйства.

В межотраслевом балансе сокращение потерь продукции (сельскохозяйственной и удобрений) при ее перевозке отражается в виде снижения исчисленного в натуральном выражении объема приобретения используемой в производстве продукции, необходимой для выпуска производимой продукции в некотором фиксированном объеме. В терминах межотраслевого баланса это означает снижение коэффициентов прямых затрат сельскохозяйственной продукции в расчете на единицу объема выпуска отраслей, использующих эту продукцию в своем производстве, и снижение коэффициентов прямых затрат удобрений на единицу выпуска объема сельскохозяйственной продукции. Кроме того, снижение потерь минеральных и химических удобрений приводит в современных российских условиях при тех же затратах на приобретение удобрений к увеличению количества реально вносимых в почву удобрений, а это влечет за собой повышение урожайности сельскохозяйственных культур. В межотраслевом балансе повышение урожайности отражается в виде дополнительного к указанному выше снижению удельных затрат всех видов товаров и услуг, используемых в производстве сельскохозяйственной продукции.

4.3. Моделирование затратных характеристик на разных уровнях иерархии транспортной сети

При оптимизации развития нелинейных транспортных сетей используются модели и методы, позволяющие рассчитывать стоимостные характеристики различной степени агрегации, соответствующие разным иерархическим уровням (элементу сети, маршруту следования корреспонденции, магистральной сети в целом).

Анализ показывает, что модели определения затрат на перевозки должны иметь вид функциональных зависимостей прежде всего от загрузки отдельных элементов. Следующим по важности фактором при моделировании затрат на перевозки – в задачах оптимизации развития сети и ее элементов – является для каждого отдельного объекта уровень его технического состояния или степень исчерпания пропускной способности. Большинство других факторов, отражающих технико-эксплуатационные особенности деятельности конкретного объекта и влияющих на издержки, могут быть включены в затратные модели в виде параметров.

В целях повышения адекватности моделей предпочтительнее использовать зависимости нелинейного типа. Это связано не только с самим способом моделирования, но и с так называемыми естественными нелинейностями роста затрат. Имеет место резко нелинейный характер роста реальных издержек при приближении величины загрузки элемента сети к уровню пропускной способности и при ее фактическом исчерпании; в частности, для автодорожных сетей нелинейность затрат возникает при дополнительных разгонах и торможениях автомобилей в плотном потоке, в связи с увеличением времени поездок при резком возрастании интенсивности автомобилепотока и т.п. [3, 9].

В процессе решения динамической задачи развития сети, когда оптимизация технологии перевозок грузов и пассажиров осуществляется при заданных функциях издержек на элементах сети, следует предусматривать моделирование агрегированной, общесетевой функции издержек и тестирование ее на субаддитивность для анализа естественно-монопольных свойств сетевых объектов [5; 33-34]. Свойство субаддитивности агрегированной, общесетевой функции издержек содержание означает, что для естественной монополии существует дополнительный синергический эффект между ее компонентами, который измеряется в виде экономии издержек, достигаемой в ситуации, когда на отраслевом сегменте рынка работает одна фирма, а не несколько.

Исходя из представления о магистральной транспортной сети как целостной производственной системе, обладающей свойством естественной монополии (т.е. отраслевой структуре, расщепление которой экономически нецелесообразно), предусматривается дополнительный этап алгоритма поиска эффективных вариантов развития магистральной транспортной сети, который содержит специальные процедуры идентификации.

Эти процедуры идентификации базируются на тестировании агрегированной по сети функции издержек, проверке выполнения свойства ее субаддитивности, лежащего в основе определения естественной монополии (по крайней мере, в нормативном аспекте). Необходимость подобного тестирования обусловлена использованием нелинейных зависимостей от загрузок элементов сети на низших иерархических уровнях (звеньях сети – отдельных дорогах или их совокупностях простейшей топологии – в виде маршрутов следования корреспонденций). Введение нелинейностей соответствует более адекватному моделированию процессов распределения или самоорганизации потоков, но в то же время может вызывать нарушения свойства субаддитивности функции издержек на верхнем уровне иерархии (сети в целом) при определенных объемах спроса на перевозки. Причиной подобных нарушений могут служить рассогласования параметров условно-переменных и условно-постоянных составляющих затрат в нелинейных зависимостях функций издержек на элементах сети, используемых (на первом этапе алгоритма) при поиске кратчайших маршрутов и оптимизации распределения потоков. Исследования естественно-монопольной природы экономических систем показывают, что для выполнения свойства субаддитивности функции издержек должна существовать определенная взаимосвязь между параметрами, указывающими степень нелинейности условно-переменных издержек, зависящих от выполняемого объема перевозок, и параметрами, характеризующими соответствующие величины условно-постоянных затрат.

Представление такой взаимосвязи удастся продемонстрировать в явном виде, допускающем количественную оценку, при моделировании загрузки элементов сети одним, обобщенным видом транспортируемого «груза» и использовании нелинейной зависимости квадратичного типа (построены и опубликованы примеры, показывающие, что область субаддитивности функции издержек, во-первых, полностью определяется указанными параметрами и, во-вторых, оказывается существенно шире области, в которой имеет место снижение удельных, средних издержек на перевозки и, следовательно, экономия от масштаба).

Для проверки свойства субаддитивности агрегированной, общесетевой функции издержек целесообразно указанный выше двухэтапный алгоритм синтеза сети дополнить третьим этапом, на котором осуществляются тесты следующих типов:

- прямой тест на подтверждение факта наличия естественной монополии;
- прямой тест на отрицание естественной монополии;
- косвенный тест на подтверждение естественной монополии.

Прямой тест на подтверждение факта наличия естественной монополии предполагает применение процедуры пошаговой проверки выполнения свойства субаддитивности, исходя из его непосредственного определения, на специальном образом построенной вычислительной сетке в рамках анализируемой допустимой области. Прямой тест на отрицание естественной монополии предполагает проверку необходимого условия субаддитивности – наличия экономии от структуры – с использованием соответствующего технологического детерминанта. Косвенный тест на подтверждение естественной монополии предусматривает проверку выполнения свойства субаддитивности опосредованно – через ту или иную систему необходимых и достаточных условий с использованием уже не одного, а целой системы технологических детерминант, таких маргинальных характеристик:

- экономия от масштаба (полная, связанная с производством всего набора выпускаемых фирмой продуктов и услуг, и специфическая, связанная с производством лишь некоторых из них);
- природные затраты (лучевые средние и предельные), детерминанты роста экономии от масштаба (полной и специфической);
- характеристики экономии от структуры.

Данный подход, ориентированный на учет свойств естественных монополий при оптимизации развития нелинейных транспортных сетей, позволяет не только уточнять постановки традиционных сетевых задач в контексте синтеза различных подходов, но и расширять – за счет привлечения моделей и методов современной отраслевой экономики – спектр используемого для оценки эффективности инструментария.

Целесообразность трехэтапной процедуры связана с тем, что намечаемая модернизация сетевой технологии и возможный рост условно-постоянных затрат при освоении инвестиций в развитие сети (а, следовательно, и в определенной мере увеличение «sunk costs») способны изменять характер нелинейности агрегированной функции издержек, область ее субаддитивности. Для обоснования масштабов и эффективных (с позиций интересов общества) направлений развития целостной сети подобный экономический мониторинг предполагается осуществлять в итеративном режиме с последующей возможной корректировкой параметров однотипных функций издержек на элементах сети.

В общем случае для построения агрегированной общесетевой функции издержек, согласно теории и практике отраслевого анализа естественных монополий, следует использовать эконометрический подход. При этом одной из существенных трудностей является выбор функциональной формы – характера нелинейности в функциональных зависимостях издержек от объемов выполняемой транспортной работы и цен на ресурсы, обуславливаемого не только содержательными, но и формальными требованиями, чтобы обеспечить априорную непредсказуемость выполнения свойства субаддитивности, т.е. значений соответствующих параметров.

В качестве приближения к подобной (неоклассической) агрегированной общесетевой функции минимальных издержек предлагается использовать сепарабельную по звеньям сети, агрегированную функцию издержек, которая представляет собой сумму функций субоптимальных издержек, нелинейно зависящих от загрузок отдельных элементов сети (при фиксированных ценах на ресурсы). Показано, что агрегированная подобным образом общесетевая функция издержек (аддитивная по звеньям сети) не обязательно должна сохранять свойство субаддитивности (по объемам транспортной работы) в процессе распределения потоков по сети, даже если все функции издержек по ее элементам обладают значительной областью субаддитивности.

Действительно, предположим, что для сети с фиксированным техническим состоянием ее элементов суммарная по сети функция издержек, аддитивная по звеньям, представляется в виде суммы однотипных функций издержек для каждого звена сети, субаддитивных по объемам его загрузки:

$$F(Q) = \sum_{i=1}^n f_i(q_i),$$

где

$F(Q)$ – агрегированная функция издержек на перевозки по сети в целом;

Q – суммарный объем работы по сети (например, грузооборот или приведенный грузооборот), отвечающий объему спроса на перевозки;

$f_i(q_i)$ – функция издержек на перевозки на i -м звене сети;

q_i – объем работы на i -м звене сети при транспортировке обобщенного вида груза, т.ч. $\sum_i q_i = Q$.

Обычно в сетевых задачах для записи ограничений транспортного типа на выполнение определенного объема перевозок используют так называемую матрицу инцидентий, отражающую взаимосвязи между узлами сети, существующие или проектируемые звенья и т.п., т.е. топологию сети. В данном случае в качестве объема спроса принят показатель транспортной работы (типа грузооборота, что предполагает известными длины маршрутов следования корреспонденций, например, в результате итеративных процедур оптимизации распределения или самоорганизации потоков), и запись упрощена для иллюстрации свойства субаддитивности издержек.

Область субаддитивности однопродуктовой функции издержек для каждого отдельного звена определяется соответствующими ее параметрами, прежде всего, величиной условно-постоянных затрат, а также характером и степенью нелинейности. Так, нетрудно показать, что для функций издержек типа:

$$f_i(q_i) = a_i + b_i \cdot q_i^2,$$

где i – номер звена сети, область субаддитивности определяется неравенством $q_i < \sqrt{\frac{2 \cdot a_i}{b_i}}$ (и это при том,

что средние издержки снижаются в существенно меньшей области – при $q_i < \sqrt{\frac{a_i}{b_i}}$, т.е. экономия от

структуры, идентичная субаддитивности для однопродуктового случая, проявляется там, где экономия от масштаба уже исчерпывается и не имеет места). Если загрузка каждого звена сети такова, что свойством субаддитивности обладают все функции издержек по элементам сети, то:

$$\begin{aligned} F(Q) &= \sum_i f_i(q_i) = \sum_i f_i\left(\frac{q_i}{k}\right) < \sum_i \sum_k f_i\left(\frac{q_i}{k}\right) = \\ &= \sum_k \sum_i f_i\left(\frac{q_i}{k}\right) = \sum_k F\left(\frac{Q}{k}\right) = \sum_k F\left(\frac{Q}{k}\right), \end{aligned}$$

что означает следующее неравенство для произвольного k :

$$F\left(k \cdot \frac{Q}{k}\right) = F\left(\frac{Q}{k}\right) < \sum_k F\left(\frac{Q}{k}\right),$$

т.е. и агрегированная общесетевая функция издержек F также субаддитивна по Q .

Более интересной представляется ситуация, когда субаддитивность агрегированной функции по сети может быть сохранена при нарушении свойства субаддитивности функций издержек на некоторой части звеньев сети. В самом деле, если загрузки по всем звеньям сети q_i , которые являются результатом оптимизации распределения потоков, таковы, что для звеньев с номерами n из множества N функции издержек на звеньях сети $f_n(q_n)$ остаются субаддитивными, а для оставшейся части звеньев сети – с номерами m из множества M – функции издержек $f_m(q_m)$ свойство субаддитивности утрачивают и становятся аддитивными или даже супераддитивными, может иметь место следующее соотношение:

$$\begin{aligned} F(Q) &= \sum_i f_i(q_i) = \sum_n f_n(q_n) + \sum_m f_m(q_m) = \\ &= \sum_n \left(\sum_k f_n\left(\frac{q_n}{k}\right) - \beta_n\right) + \sum_m \left(\sum_k f_m\left(\frac{q_m}{k}\right) + \alpha_m\right) = \\ &= \sum_k \sum_i f_i\left(\frac{q_i}{k}\right) + (\alpha - \beta) = \sum_k F\left(\frac{Q}{k}\right) + (\alpha - \beta), \end{aligned}$$

где $\alpha_m > 0$, $\beta_n > 0$, $\sum_m \alpha_m = \alpha$, $\sum_n \beta_n = \beta$.

Соответственно, при произвольном k :

$$F(Q) = F\left(\sum_k \frac{Q}{k}\right) \begin{cases} < \sum_k F\left(\frac{Q}{k}\right) & \text{если } \alpha < \beta; \\ > \sum_k F\left(\frac{Q}{k}\right) & \text{если } \alpha > \beta. \end{cases}$$

Другими словами, агрегированная общесетевая функция издержек может оставаться субаддитивной или, напротив, становиться супераддитивной в зависимости от соотношения интегральных по сети характеристик α, β .

Таким образом, при заданных параметрах функций издержек на элементах сети используемые процедуры оптимизации распределения потоков могут приводить к

нарушениям локальной субаддитивности как объектных функций издержек, так и агрегированной общесетевой функции издержек. Для рассмотренной конструкции агрегирования на уровне сети в целом переход от субаддитивной к локально супераддитивной функции зависит и от степени субаддитивности общесетевой функции издержек, и от количества элементов сети, на которых возникает нарушение этого свойства. Соответственно, необходимо решение задачи тестирования агрегированной общесетевой функции издержек на субаддитивность, а в случае установления факта ее отсутствия – решение задачи согласования моделей затратных характеристик разных уровней иерархии.

Предлагаемые процедуры согласования моделей сетевых затратных характеристик (в виде нелинейных функциональных зависимостей издержек от загрузки элементов одно- или многопродуктовыми потоками) на разных иерархических уровнях магистральной сети (на отдельных элементах сети, маршрутах следования корреспонденций, сети в целом) заключаются в следующем.

Если на третьем – дополнительном – этапе алгоритма поиска эффективных вариантов развития магистральной транспортной сети (в ситуации, когда априорная пообъектная идентификация не предусматривается) проверка агрегированной общесетевой функции издержек на субаддитивность (локальную) дает положительный результат (подтверждает ее наличие), то это означает, что при данном объеме спроса, распределении потоков и развитии сети статус естественной монополии сохранен.

Если, напротив, в данной точке – локально – субаддитивность не имеет места, то анализу подлежат возможные причины этого нарушения, прежде всего такие:

- общая перегруженность сети, когда значительная часть звеньев сети близка к исчерпанию пропускной способности;
- перегруженность сети по отдельным наиболее протяженным направлениям;
- неравномерность в распределении потоков по сети, обусловленная характером топологии существующей сети (слабой разветвленностью сети, недостаточным количеством параллельных маршрутов и замкнутых контуров).

При этом, если допустима корректировка параметров заданных функций издержек на элементах сети, то для согласования моделей разных иерархических уровней, как показывают приведенные соотношения, указанные причины можно интерпретировать следующим образом:

- установлены избыточные значения параметров нелинейной части объектных функций издержек (при уменьшении изначально принятых значений параметров этой группы область субаддитивности может быть расширена);
- приняты недостаточно высокие значения условно-постоянных затрат, соответствующих существующим или проектируемым уровням развития элементов сети (при увеличении параметров освоенных или предполагаемых объемов инвестиций область субаддитивности также может быть расширена);
- необходимо при моделировании предусматривать появление альтернативных параллельных контуров (например, проектирование новых параллельных звеньев сети в виде платных дорог).

Если считать, что учет этих факторов целесообразен на втором этапе работы декомпозиционного алгоритма, когда выполняется оптимизация технических состояний элементов сети (в зависимости от схем финансирования и способов согласования статических сечений в динамике), то этап проверки локальной субаддитивности следует предусматривать в качестве дополнения уже к первому этапу алгоритма. При этом необходимо фиксировать

звенья, на которых формируются загрузки, выводящие за область субаддитивности объектной функции издержек, и, соответственно, корректировать указанные группы параметров (или рассматривать такие элементы сети как претенденты на строительство параллельного звена). Можно принять и другое допущение о том, что частично перегрузки на некоторых звеньях, приводящие к нарушению субаддитивности, будут уменьшены за счет инвестиций, выделяемых для повышения технического уровня ряда элементов на втором этапе декомпозиционного алгоритма. Тогда проверка субаддитивности агрегированной общесетевой функции издержек следует делать только на следующем, третьем этапе алгоритма, располагая при этом информацией о перечне оставшихся звеньев с нарушениями областей субаддитивности.

Проанализирована ситуация, при которой после нескольких итераций с подобными корректировками нарушение субаддитивности на сетевом уровне сохраняется (или функции издержек на звеньях минимальны, т.ч. их параметры более не подлежат корректировке). В этом случае задачами третьего этапа процедуры оптимизации развития сети становятся либо модификация агрегированной общесетевой функции издержек, либо формирование содержательной трактовки отсутствия свойства ее субаддитивности и, следовательно, исчезновения естественной монополии. Целесообразность расщепления сети может быть интерпретирована как необходимость подключения сетей других (конкурирующих) видов транспорта, по крайней мере, на определенных сегментах рынка услуг. Нарушение субаддитивности может также указывать на необходимость усиления разветвленности сети с созданием дублирующих в определенном смысле элементов сети, либо свидетельствовать о необходимости расширения постановки задачи развития сети с включением вариантов изменения ее исходной топологии и т.п.

Для задачи синтеза сети, в которой моделируемые зависимости издержек являются функциями не только загрузок звеньев, но и их технических состояний, априорная проверка субаддитивности издержек на элементах сети представляется нецелесообразной. На первом этапе работы алгоритма выход за границы области субаддитивности может быть связан с необходимым повышением загрузки отдельных звеньев сети, обоснованно высоким уровнем исчерпания пропускной способности элемента сети при фиксированном его техническом состоянии (когда не существует альтернативного, более дешевого маршрута). Соответственно, установление для каждого элемента сети границ области субаддитивности функции издержек объектного уровня иерархии представляется излишним и избыточно жестким, которое может отсекал эффективные маршруты следования корреспонденций.

В ходе работы второго этапа декомпозиционного алгоритма оптимизации развития сети осуществляется выбор наиболее эффективного технического состояния элемента сети (с учетом общих для сети условий и ограничений финансирования инвестиций), что может приводить к изменению характера нелинейности и соотношений параметров условно-переменных и условно-постоянных составляющих затрат при моделировании изменяющейся технологии. Анализ показывает, что получаемый при подобном способе моделирования изменений в технологии перевозок общий вид функции издержек на уровне элементов сети приводит

к не гладким (не дифференцируемым) зависимостям. Могут образовываться точки изломов, где существуют только производные слева и справа, и непосредственная проверка субаддитивности может потребовать дополнительных процедур сглаживания, формирования выпуклых (вогнутых) оболочек, их комбинации на определенных временных периодах и т.п.

Основной проблемой при решении задачи идентификации естественной монополии является моделирование агрегированной общесетевой функции издержек, формирование технологических детерминант (или их аналогов) для оценки деятельности естественно-монопольных отраслевых структур с учетом факторов нестационарности.

Для информационного обеспечения эконометрического подхода к построению агрегированной общесетевой функции издержек возможно использование как имеющихся данных отраслевой статистики (которые могут не соответствовать характеру и структуре модели и не ориентированы на оптимизацию), так и специально моделируемых. При моделировании исходной для построения агрегированной функции издержек информации, отвечающей оптимальной технологии перевозок, предложено также использовать разработанные ранее декомпозиционные компьютерные алгоритмы решения нелинейных сетевых транспортных задач. Получаемые в результате вариантных расчетов итоговые затратные характеристики оптимизируемой сетевой технологии, которые соответствуют различным фиксированным объемам спроса на перевозки, объемам тонно-километровой работы по кратчайшим маршрутам, а также варьируемым значениям уровней цен на используемые ресурсы, могут быть использованы для построения агрегированной общесетевой функции минимальных издержек. Подобный способ формирования исходной информации по издержкам, теоретически соответствующим оптимальной технологии перевозок, может обеспечивать моделирование лишь достаточно хорошего приближения к общесетевой функции минимальных издержек, т.е. также, по сути, моделирование квазифункций издержек. Это связано как со способами моделирования задачи развития сети, допускающими введение дискретных переменных, так и с использованием различных эвристических приемов, включаемых в алгоритмы оптимизации. Так, дискретность развития элементов сети, соответствующая этапности наращивания ее мощностей на практике, делает ограничения по расходованию инвестиций заведомо «мягкими», т.е. выполнимыми в виде неравенств, хотя, возможно, и не строгих. Не жесткость ограничений бюджетного типа может иметь место и из-за монополии сетевых инфраструктурных объектов и возможности приобретения ресурсов не по рыночным, а по каким-либо иным, льготным или договорным ценам. Предусматриваемый при моделировании развития сети определенный (в идеале – оптимальный) резерв пропускных способностей на элементах сети будет заведомо приводить к рассогласованию теоретически максимального объема услуг по транспортировке, который потенциально способна осуществлять развиваемая сеть с объемом ресурсов, затрачиваемых на освоение потоков и развитие сети. Применение различных эвристических приемов, обычно используемых при решении многоэкстремальных частично-целочисленных задач большой размерности, которые приходится включать и в алгоритмы распределения или самоорганизации потоков, а также и в алго-

ритмы выбора наиболее эффективных технических состояний элементов сети при различных условиях финансирования ее развития и различных способах согласования статических сечений в динамике, не позволяют гарантировать отыскание строго оптимального варианта. Тем не менее, имеющийся опыт по моделированию и решению сетевых задач такого класса позволяет рассчитывать на получение достаточно хороших приближений, которые могут служить альтернативой формирования агрегированной функции издержек с использованием граничного подхода.

5. КОМПЬЮТЕРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАЗВИТИЯ СЕТИ: ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СЕТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Представим основные результаты, связанные с компьютерным обеспечением задач развития магистральной сети, в уточненной постановке, разработкой экспериментального программного комплекса и проверкой его работоспособности на автодорожной сети при обобщенных значениях параметров и различных схемах финансирования ее развития.

Разрабатываемое программное обеспечение, прежде всего, должно удовлетворять трем основным требованиям:

- доступность и удобство работы пользователя с входными и выходными данными;
- возможность работы с большими массивами данных;
- универсальность, допускающую многовариантность используемых расчетных методов и вычислительных схем;
- соответственно, учитывая множество альтернативных методов расчета транспортных затрат, вариантов моделей распределения транспортных потоков, разрабатываемое программное обеспечение должно быть открытым для пользователей с точки зрения формирования различных модификаций постановок задач и использования различных видов функциональных зависимостей.

Разрабатываемый программный комплекс состоит из двух частей: диалоговой системы для ввода и вывода данных и основной расчетной программы. В диалоговой системе формируется структура задачи (имена и размерность данных), создаются и заполняются таблицы исходных данных, выполняется вывод данных для дальнейшей обработки расчетными процедурами. Результаты решения задачи выводятся в текстовые файлы, которые просматриваются в табличных формах диалоговой системы.

Расчетная программа состоит из следующих основных частей:

- считывание и обработка входных данных;
- расчет транспортных затрат;
- поиск кратчайших маршрутов;
- расчет корреспонденций и наложение потоков на сеть, расчет общественного эффекта;
- поиск и отбор наилучших мероприятий для дорог сети;
- изменение характеристик дорог;
- расчет итоговых показателей и вывод данных.⁴

Расчетная программа работает с динамическими массивами данных, что позволяет оперативно менять размерность задачи без корректировки программ. Размер-

ность массивов указывается в файле параметров, который считывается в первую очередь. Количество входных и выходных файлов также может меняться, учитывая, в частности, то, что пользователь может задавать разное количество видов эксплуатационных затрат, каждому из которых соответствует свой файл.

Обработка входных данных включает формирование рабочих массивов, построения кусочно-линейных функций для зависимостей, которые заданы таблицами своих значений, специальные процедуры сортировки узлов, дорог, технических состояний и мероприятий, позволяющие ускорить просмотр массивов во время работы программы. После считывания и обработки входных данных выполняется непосредственно расчетная процедура. После завершения расчетов программа выводит результаты в текстовые файлы MS-DOS и заканчивает свою работу. Просмотр результатов расчетов осуществляется через диалоговую систему.

Встроенная в программный комплекс диалоговая система позволяет пользователю редактировать и просматривать данные в наиболее популярном табличном редакторе – Excel для Windows. Таблицы для просмотра и редактирования данных формируются в автоматическом режиме. Часть таблиц может быть структурирована пользователем, для чего разработан специальный макроязык, предоставляющий значительную свободу в формировании пользовательских таблиц-отчетов. Пользователю предоставляется возможность использования сценариев постановок задач и расчетов в рамках одного проекта.

Предусмотрена система обмена между таблицами диалоговой системы и непосредственно расчетными программами. Благодаря вспомогательным программам в таблицах Excel хранятся только те данные, которые вызывает пользователь из базы данных. Такая система дает возможность использовать встроенный инструмент Excel для базы данных любой размерности с высоким быстродействием.

5.1. Краткое описание тестирования экспериментального программного комплекса

Проверка и анализ работы вариантов реализации разработанных алгоритмов проводились на примере сети небольшой размерности (14 дуг, 9 узлов) без учета эндогенных объемов инвестиций и при условии заданной матрицы корреспонденций.

Проведено сравнение результатов распределения транспортных потоков по различным критериям выбора маршрутов (кратчайшее расстояние, наименьшие затраты времени, наименьшие общественные издержки) в зависимости от используемого подхода (оптимизационный и имитационный). Показано, что наилучший результат распределения транспортных потоков с точки зрения суммарного общественного эффекта дает оптимизационный подход при использовании в качестве критерия выбора маршрута общественных издержек. При этом увеличение эффекта составило:

- 4,7% – для перегруженной транспортной сети;
- 2,7% – для сети среднего уровня загрузки;
- 1,7% – для сети низкой загрузки.

Были проанализированы различные варианты вычислительных схем, используемых при выборе наилучших хозяйственных мероприятий развития сети. Алгоритм имеет 10 основных модификаций. Варианты вычислительных схем отличаются друг от друга по

⁴ Развернутое описание ряда основных блоков расчетной программы приведено в работе [5].

следующим характеристикам: использование метода статических сечений и/или динамического программирования. Статические сечения, в свою очередь, могут быть независимые и зависимые. Для статических сечений вид критерия выбора наилучшего хозяйственного мероприятия на дороге и на сети и критерия ранжирования дорог по всей сети меняются в зависимости от вычислительной схемы.

Для примера постановки задачи с ограничениями на выделяемые объемы инвестиций наибольший приведенный общественный эффект позволяет получить вычислительная схема, согласно которой сначала анализируются независимые статические сечения, причем при выборе лучших мероприятий на каждой дороге используется критерий статического эффекта сокращения издержек, а при ранжировании дорог по всей сети применяется критерий статического индекса доходности, после чего для противоречивых последовательностей технических состояний осуществляется дополнительный поиск решения методом динамического программирования.

На основе анализа процедуры решения выявлены недостатки применявшихся базовых вычислительных схем и построены их различные модификации.

5.2. Развернутое описание тестирования экспериментального программного комплекса

Работа основных блоков разрабатываемого программного комплекса была протестирована на расчетном примере. Реализация расчетного примера имеет следующие особенности:

- потоки автомобилей по корреспонденциям заданы;
- объемы выделяемых финансовых средств на развитие сети заданы.

Для расчетного примера была взята сеть небольшой размерности, представленная на рис. 10. Узлы сети пронумерованы по порядку (рис. 10). Каждой дороге соответствует дуга графа. Граф ненаправленный. Над дугами графа (или слева – для дуг, отображенных вертикальными линиями) проставлены расстояния между соседними узлами. В дальнейшем изложении каждая дорога обозначается шифрами узлов, которые она связывает (например, 1-2).

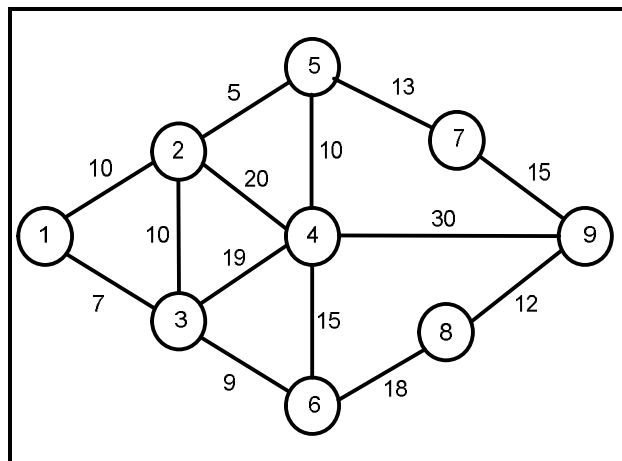


Рис. 10. Сеть автомобильных дорог для расчетного примера

В табл. 1 приводятся возможные технические состояния дорог (табл. 1).

Таблица 1

ШИФРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ

Шифры	Наименование и тип покрытия	Пропускная способность, прив. авт. в час
1	Ia	12 000
2	Iб	7 200
3	II	2 200
4	III кап.	2 000
5	III облепч.	2 000
6	IV кап.	1 500
7	IV облепч.	1 500
8	IV переходн.	1 200
9	V облепч.	800
10	V переходн.	200
11	естественное	200

На рис. 11 приводятся технические состояния дорог для исходной сети.

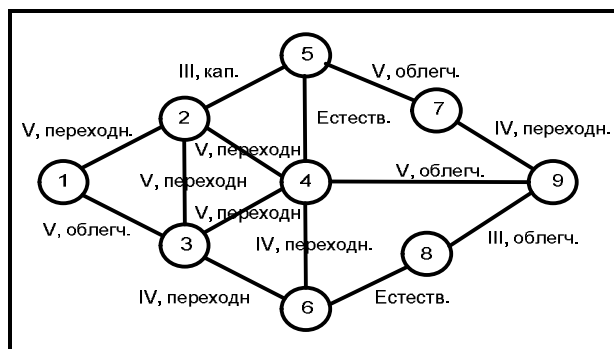


Рис. 11. Исходные технические состояния автомобильных дорог сети (категория, тип покрытия) для расчетного примера

5.3. Анализ решения задачи распределения транспортных потоков (задача А) при различных способах определения кратчайших маршрутов и уровнях нагрузки на сеть

Расчет интенсивности движения на дорогах сети начинается с расчета нераспределенных потоков на дороге за год. Нераспределенные потоки в первый год расчетного периода, $t = 1$, заданы, а в период от $t = 2, \dots, T$ определяются умножением интенсивности движения в предыдущий год на заданный годовой темп роста.

Затем программа начинает выполнять циклическую процедуру наложения распределяемых потоков. На каждой итерации этой процедуры на сеть накладывается некоторая порция потоков, которая рассчитывается как экзогенно заданная доля от потоков корреспонденции. Например, если из начального пункта А в конечный пункт В проследует 500 автомобилей, а заданное количество итераций наложения распределяемых потоков равно 5, то на каждой итерации для данной корреспонденции берется 100 автомобилей.

Пересчет издержек, согласно которым выбираются маршруты, выполняется перед каждой последовательностью наложений «пункт отправления – все корреспондирующие пункты назначения». Критериями выбора маршрутов на каждой итерации могут быть:

- расстояние пути;
- средние или предельные затраты времени пути;
- средние или предельные пользовательские издержки.

Таблица 2

ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ИЗДЕРЖЕК ПРИ НАЛОЖЕНИИ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ И ИТоговые ОБЩЕСТВЕННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ ИЗДЕРЖКИ ДЛЯ УРОВНЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ Г-Д

В результате наложения потоков получено первоначальное решение распределения транспортных потоков, которые следует уточнить процедурой перераспределения потоков. Для этого сначала с каждой дороги снимается некоторая часть распределяемых потоков. Затем пересчитываются транспортные издержки, определяются кратчайшие маршруты, по которым снятая часть потоков заново накладывается на сеть.

Перераспределение потоков вычисляется по следующим правилам. Если в результате итерации снятия и затем наложения потоков на сеть суммарные пользовательские издержки снижаются, следующая итерация вычисляется с тем же шагом снятия потоков. Наоборот, если это значение увеличивается, величина шага снижается до тех пор, пока не достигнет заданного минимального шага.

Чтобы проанализировать влияние на суммарные общественные транспортные потоки способов распределения транспортных потоков, проведены расчеты интенсивности движения автомобилей на экспериментальной сети для разных уровней распределяемых потоков автомобилей при отсутствии нераспределяемых потоков.

Условия движения автомобилей на дорогах могут быть развиты на 5 уровней загрузки (обслуживания или удобства) [30]. Уровень А характеризуется отношением интенсивности движения автомобилей в приведенных единицах к пропускной способности менее 0,2. Для уровня Б это отношение составляет от 0,2 до 0,45. При уровне В коэффициент загрузки колеблется в пределах от 0,45 до 0,7. Уровень Г характеризуется состоянием потока, близкого к заторам – 0,7-1,0. Уровнем Д характеризуются условия, при которых участок движения не справляется с транспортными потоками, и очередь из необслуженных автомобилей в заторах нарастает.

Уровни обслуживания обычно характеризуют условия движения на отдельном участке движения. Для характеристики загруженности всей сети мы использовали показатели уровня загрузки, средние для дорог сети.

В табл. 2 показаны изменения суммарных по сети пользовательских издержек по мере выполнения операций наложения (поиска допустимого решения) и перераспределения потоков (улучшения допустимого решения) и полученные итоговые суммарные общественные транспортные издержки в зависимости от способов определения кратчайших маршрутов. Поиск допустимого решения проводился за 4 шага. После поиска допустимого решения выполнялась процедура перераспределения потоков с максимальным шагом 0,25 и минимальным шагом 0,01. Для каждого способа выполнялось 5 вычислительных экспериментов при небольших изменениях объемов корреспонденций. В табл. 2 показаны средние показатели по результатам 5 экспериментов.

Худшие результаты с точки зрения суммарных общественных издержек получены при распределении потоков по кратчайшим расстояниям – превышение над остальными вариантами составляет более чем в 3 раза (см. табл. 2). Наименьшие общественные издержки получены при распределении транспортных потоков по маршрутам с наименьшими общественными предельными издержками (вариант 5), при этом понадобилось в среднем за 5 вычислительных экспериментов 49,6 шагов, что по скорости вычислений является вторым результатом для вариантов 2-5. Суммарные общественные издержки для вариантов 2-4 (см. табл. 2) примерно одинаковы.

Показатели	Способы определения кратчайших маршрутов				
	Средние издержки			Предельные издержки	
	1. Расстояние	2. Издержки времени	3. Общественные издержки	4. Издержки времени	5. Общественные издержки
Суммарные пользовательские издержки, %, после наложения потоков	-	100	100	100	100
То же, после уточнения потоков с шагом 0,25	-	104,53	102,68	97,47	106,71
число шагов	-	1,4	1	2,8	1,4
То же, после уточнения потоков с шагом 0,13	-	91,99	92,27	88,54	90,16
число шагов	-	6,6	5,6	7,4	8,2
То же, после уточнения потоков с шагом 0,06	-	87,59	87,19	86,79	85,14
число шагов	-	10,8	11	6,8	12,6
То же, после уточнения потоков с шагом 0,03	-	86,16	85,39	86,28	83,82
число шагов	-	16,2	8,8	5,8	10,4
То же, после уточнения потоков с шагом 0,02	-	85,67	84,49	86,04	83,38
число шагов	-	15,2	18,4	8	9,4
То же, после уточнения потоков с шагом 0,01	-	85,49	84,17	85,88	83,20
число шагов	-	15	12,4	9,2	7,6
Итого, шагов перераспределения потоков	-	65,2	57,2	40	49,6
Итоговые суммарные обществ. трансп. издержки 2006-2010 гг., млрд. руб.	195,38	65,30	65,40	65,53	62,77

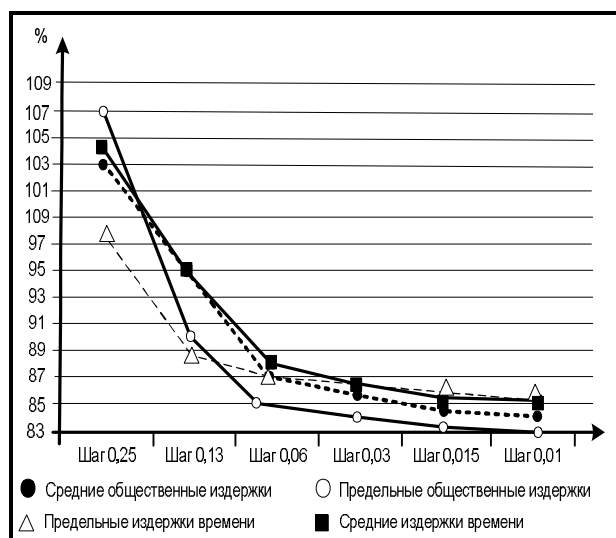


Рис. 12. Суммарные пользовательские издержки после перераспределения потоков на сеть уровня загрузки Г-Д

На рис. 12 показано снижение суммарных пользовательских издержек в ходе выполнения процедуры перераспределения потоков в сравнении с допустимым решением, полученным за 4 итерации наложения потоков, принятым за 100%. Основная доля снижения издержек приходится на перераспределение потоков с шагом 0,13, а именно: 7,5-11,5% в сравнении с пользовательскими издержками после 4-х итерационного наложения потоков. Снижение издержек для шагов менее 0,03 незначительно (0,5-1,0%). Шаг 0,25 оказывается неэффективным или малоэффективным: в случае поиска кратчайших маршрутов по предельным издержкам времени сокращение составляет 2,5%, в остальных случаях происходит увеличение издержек до 6-7%.

Таблица 3

ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ИЗДЕРЖЕК ПРИ НАЛОЖЕНИИ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ И ИТОГОВЫЕ ОБЩЕСТВЕННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ ИЗДЕРЖКИ ДЛЯ УРОВНЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ В-Г

Показатели	Способы определения кратчайших маршрутов				
	Средние издержки			Предельные издержки	
	1. Расстояние	2. Издержки времени	3. Общественные издержки	4. Издержки времени	5. Общественные издержки
Суммарные пользовательские издержки, %, после наложения потоков	-	100	100	100	100
То же, после уточнения потоков с шагом 0,25	-	90,26	91,47	105,10	99,17
число шагов	-	2,1	3	2,2	1,6
То же, после уточнения потоков с шагом 0,13	-	74,31	77,67	85,57	84,73
число шагов	-	4,0	3	5	4,6
То же, после уточнения потоков с шагом 0,06	-	69,25	69,61	84,52	81,91
число шагов	-	6,8	4,4	3,4	4,2
То же, после уточнения потоков с шагом 0,03	-	67,13	67,08	83,40	80,39
число шагов	-	6,6	5,8	5,2	4
То же, после уточнения потоков с шагом 0,02	-	66,03	66,21	82,90	79,86
число шагов	-	8,4	8,2	4,6	5,2
То же, после уточнения потоков с шагом 0,01	-	65,57	65,83	82,80	79,77
число шагов	-	12,2	10	3,4	6
Итого, шагов перераспределения потоков	-	40	34,4	23,8	25,6
Итоговые суммарные обществ. трансп. издержки 2006-2010 гг., млрд. руб.	71,00	13,25	13,26	12,86	12,52

В табл. 3. и на рис. 13 приводятся аналогичные результаты для сети той же топологии, но с уровнем обслуживания В-Г. И в этом случае распределение потоков по кратчайшим расстояниям дает значительно худшие общественные транспортные издержки в сравнении с остальными вариантами (табл. 3) – примерно в 7 раз, хотя разность между общественными суммарными издержками при распределении потоков по кратчайшим расстояниям и издержками, полученными по вариантам 2-5, естественно сокращается в

сравнении с аналогичными результатами для сети уровня загрузки Г-Д (ср. табл. 2 и табл. 3).

Наименьшие общественные издержки снова получены при распределении транспортных потоков по маршрутам с наименьшими общественными предельными издержками (вариант 5). Интересно отметить, что если проранжировать варианты 2-5 по возрастанию числа шагов перераспределения потоков, ранжировка результатов табл. 3 совпадает с ранжировкой результатов табл. 2. Суммарные общественные издержки для вариантов распределения потоков по маршрутам с кратчайшими средними общественными издержками и средними издержками времени практически совпали.

Если для сети уровня загрузки Г-Д закономерности изменения суммарных пользовательских затрат примерно одинаковы для всех способов поиска маршрутов, кроме, естественно, поиска по кратчайшим расстояниям (см. рис. 12), то на сети уровня загрузки В-Г явно различаются два типа кривых (см. рис. 13):

- один – при поиске маршрутов по средним издержкам;
- второй – по предельным издержкам.

Для случая предельных издержек имеем неэффективное или малоэффективное использование относительно больших шагов (0,25) и существенный эффект снижения пользовательских издержек при средних шагах (0,125), а затем резкое снижение скорости уменьшения издержек при малых шагах (0,01 – 0,03). Для случая средних издержек кривая (рис. 10) ближе к прямой, что говорит о более равномерном снижении пользовательских издержек, хотя при малых шагах изменения относительно небольшие (около 4%).

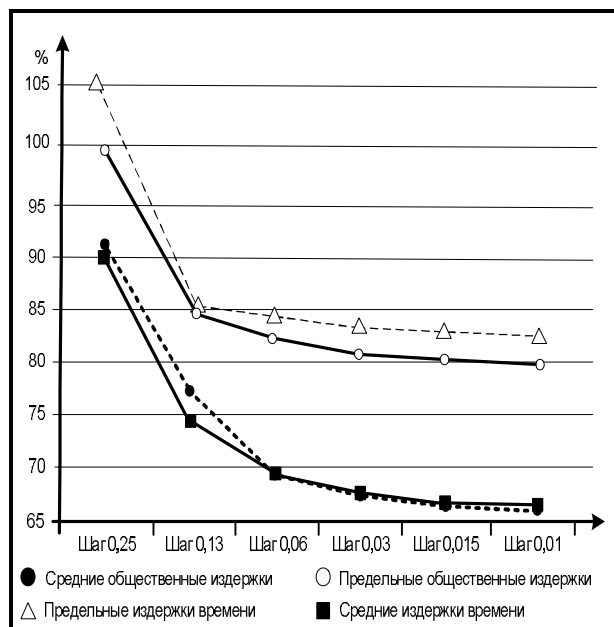


Рис. 13. Суммарные пользовательские издержки после перераспределения потоков на сети уровня загрузки В-Г

В табл. 4 показаны результаты расчетов транспортных потоков для сети дорог с уровнем обслуживания Б-В. Как видно из рис. 14, закономерности сокращения пользовательских издержек в ходе перераспределения потоков совпадают в случае поиска кратчайших маршрутов по общественным издержкам, предельным или средним.

Таблица 4

ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ИЗДЕРЖЕК ПРИ НАЛОЖЕНИИ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ И ИТОГОВЫЕ ОБЩЕСТВЕННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ ИЗДЕРЖКИ ДЛЯ УРОВНЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ Б-В

Показатели	Способы определения кратчайших маршрутов				
	Средние издержки			Предельные издержки	
	1. Расстояние	2. Издержки времени	3. Обществ. издержки	4. Издержки времени	5. Обществ. издержки
Суммарные пользовательские издержки, %, после наложения потоков	-	100	100	100	100
То же, после уточнения потоков с шагом 0,25	-	93,13	99,06	99,86	98,26
число шагов	-	2,6	20,6	1,6	22,8
То же, после уточнения потоков с шагом 0,13	-	67,84	97,48	83,47	97,24
число шагов	-	26	36	3,6	16
То же, после уточнения потоков с шагом 0,06	-	64,91	96,96	78,05	96,78
число шагов	-	67,8	7,6	5,2	1,8
То же, после уточнения потоков с шагом 0,03	-	64,27	96,72	76,50	96,37
число шагов	-	8,6	48,6	7,4	2,6
То же, после уточнения потоков с шагом 0,02	-	63,88	96,63	75,82	96,19
число шагов	-	11,8	4,2	8,8	2,8
То же, после уточнения потоков с шагом 0,01	-	63,71	96,59	75,57	96,13
число шагов	-	10	3,8	7	2,4
Итого, шагов перераспределения потоков	-	126,8	120,8	33,6	48,4
Итоговые суммарные обществ. трансп. издержки 2006-2010 гг., млрд. руб.	18,78	6,05	5,98	5,94	5,84

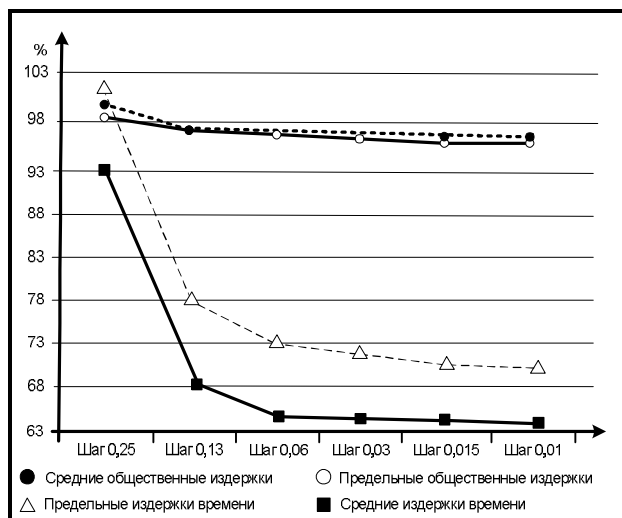


Рис. 14. Суммарные пользовательские издержки после перераспределения потоков на сети уровня загрузки Б-В

На рис. 15 приводится сравнение результатов (суммарных общественных издержек) распределения транспортных потоков при различных способах выбора маршрута водителями для разных уровней загрузки сети автомобильных дорог. Наименьшие общественные издержки достигаются в случае поиска кратчайших маршрутов по предельным общественным издержкам.



Рис. 15. Суммарные общественные издержки при разных уровнях загрузки дорог сети

В ходе поиска оптимальных последовательностей технических состояний программа выполняет несколько внешних итераций (см. схему рис. 2), на каждой из которых анализируется сеть с разным уровнем обслуживания. С одной стороны, желательно, чтобы процедуры поиска распределения транспортных потоков занимали как можно меньше времени вычислений, а с другой стороны, получаемые решения при разных уровнях загрузки сети должны соответствовать каким-нибудь единым правилам (например, разность между практически полученными суммарными пользовательскими издержками и минимальные суммарные пользовательские издержки, полученная при разных уровнях загрузки сети, не должна превышать небольшую величину). Проведенные экспериментальные расчеты показали, что ни для одного из способов определения кратчайших маршрутов (кроме кратчайших расстояний) нельзя найти такого рода компромисс: закономерности сокращения пользовательских издержек при разных уровнях загрузки сети дорог существенно отличаются.

5.4. Анализ работы вычислительных схем выбора хозяйственных мероприятий по развитию дорог

В подразделе рассматривается работа программа полностью, как это показано на схеме рис. 2. В расчетах транспортных потоков (блок А схемы, рис. 2) поиск кратчайших маршрутов выполняется по предельным общественным издержкам. Допустимое решение определяется за 4 итерации. Уточнение решения перераспределением транспортных потоков начинается с

шага 0,25 и заканчивается шагом 0,01. Анализируются изменения технических состояний дорог сети и эффективность этих изменений при различных вычислительных схемах выбора последовательностей хозяйственных мероприятий по развитию дорог.

5.5. Общее описание вычислительных схем

Варианты вычислительных схем, как указывалось ранее, отличаются друг от друга по следующим характеристикам: использование метода статических сечений и/или динамического программирования; при этом рассматриваются независимые и зависимые статические сечения, а вид критерия выбора наилучшего хозяйственного мероприятия на дороге и на сети, и критерия ранжирования дорог по всей сети меняются в зависимости от варианта вычислительной схемы.

Поэтому с учетом вариативности методов решения и применяемых критериев можно выделить несколько вариантов вычислительных схем (табл. 5).

Таблица 5

ВАРИАНТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СХЕМ

№ схемы	Статические сечения	Виды критериев		Динамическое программирование
		Критерий выбора мероприятий	Критерий ранжирования дорог	
1	Независимые сечения	Разность	Отношение	Нет
2	Независимые сечения	Отношение	Отношение	Нет
3	Независимые сечения	Разность	Разность	Нет
4	Зависимые сечения	Разность	Отношение	Нет
5	Зависимые сечения	Отношение	Отношение	Нет
6	Зависимые сечения	Разность	Разность	Нет
7	Независимые сечения	Разность	Отношение	Да
8	Независимые сечения	Отношение	Отношение	Да
9	Независимые сечения	Разность	Разность	Да
10	Нет	-	-	Да

Для каждой вычислительной схемы при поиске и выборе мероприятий может применяться норма дисконта, не совпадающая с основной нормой дисконта, используемой в оценке эффекта сокращения суммарных приведенных общественных затрат. В дальнейшем изложении норму дисконта, применяемую при поиске и выборе мероприятий, будем называть штрафом за использование инвестиций.

Основные исходные данные для проведения экспериментальных расчетов представлены в приложении.

Задача без ограничений на инвестиции

Постановка задачи без ограничений на инвестиции позволяет определить оптимальный объем требуемых финансовых вложений в развитие сети автодорог (табл. 6).

Таблица 6

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ БЕЗ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ИНВЕСТИЦИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СХЕМ

№ схемы		Штраф за использование инвестиций, %									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	NB	174,86	175,15	175,39	175,78	175,65	175,36	175,19	174,95	175,03	174,88
	NPV	128,32	128,83	129,09	129,36	129,28	129,15	129,01	128,88	128,94	128,83
	I	4,03	3,16	2,55	2,05	2,05	1,84	1,84	1,75	1,68	1,58
2	NB	159,97	160,12	160,12	160,12	160,09	160,00	159,79	159,75	159,75	159,75
	NPV	118,14	118,26	118,26	118,26	118,24	118,18	118,06	118,04	118,04	118,04
	I	1,96	1,91	1,91	1,91	1,91	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80

№ схемы		Штраф за использование инвестиций, %									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
4	NB	174,86	174,73	175,39	175,78	175,65	175,13	174,96	174,95	175,03	174,88
	NPV	128,32	128,52	129,09	129,36	129,28	128,93	128,82	128,88	128,94	128,83
	I	4,03	3,54	2,55	2,05	2,05	2,03	2,03	1,75	1,68	1,58
5	NB	159,97	160,12	160,12	160,12	160,09	160,00	159,79	159,75	159,75	159,75
	NPV	118,14	118,26	118,26	118,26	118,23	118,18	118,06	118,04	118,04	118,04
	I	1,96	1,91	1,91	1,91	1,91	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
7	NB	174,86	174,83	175,39	175,78	175,70	175,43	175,22	175,02	175,03	174,96
	NPV	128,32	128,63	129,09	129,36	129,34	129,18	129,05	128,93	128,94	128,88
	I	4,03	3,34	2,55	2,05	1,89	1,84	1,84	1,66	1,68	1,50
8	NB	159,97	160,12	160,12	160,12	160,00	160,00	159,79	159,75	159,75	159,75
	NPV	118,14	118,26	118,26	118,26	118,18	118,18	118,06	118,04	118,04	118,04
	I	1,96	1,91	1,91	1,91	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
10	NB	175,78	175,76	175,63	175,55	175,55	175,45	175,38	175,19	175,19	175,19
	NPV	129,36	129,37	129,27	129,24	129,24	129,20	129,16	129,06	129,06	129,06
	I	2,05	1,89	1,94	1,78	1,78	1,66	1,72	1,50	1,50	1,50

В табл. 6 приведены показатели за весь расчетный период от 1 до T:

- чистый доход от реализации хозяйственных мероприятий (net benefits, NB);
- чистый дисконтированный доход (net present value, NPV) при ставке дисконта 10% и суммарные объемы освоенных инвестиций в сеть (investment, I), млрд. руб. в ценах 2003 г.

Так как выбранная постановка задачи – без ограничений на инвестиции, на решение не влияют методы ранжирования дорог. Для данной постановки вариант (схема 10) вычислительных схем сводятся к схеме 7. Совпадают решения задач по вычислительным схемам (1, 3); (4,6); (7,9).

Лучшие результаты (максимум NPV – 129,37 млрд. руб.) по каждой вычислительной схеме выделены в табл. 6 жирным курсивом. Для данного примера лучший результат дает вычислительная схема 10 (рис. 16), для которой используется метод динамического программирования без предварительного анализа статических сечений, при этом оптимальный суммарный объем дополнительно выделяемых инвестиций за весь расчетный период, согласно табл. 6, составляет 1,9 млрд. руб. Очень близкий результат (129,36 млрд. руб.), но при инвестициях 2,05 млрд. руб., получены вычислительными схемами 1, 4 и 7. На рис. 17 приводится зависимость эффекта от значений штрафа за использование инвестиций.

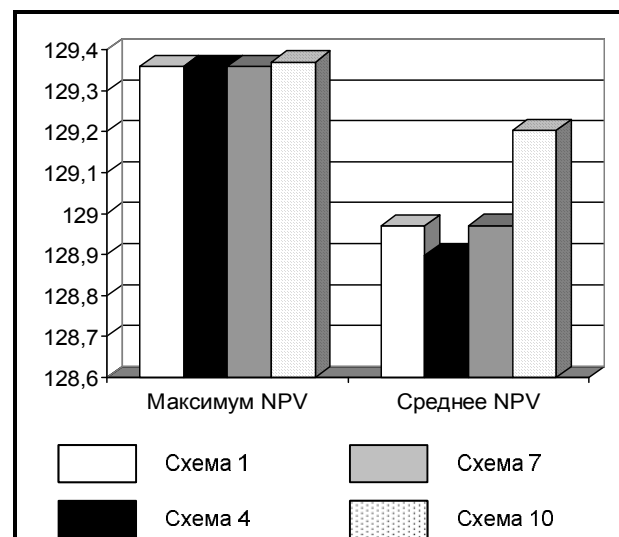


Рис. 16. Максимальные и средние значения NPV для вычислительных схем

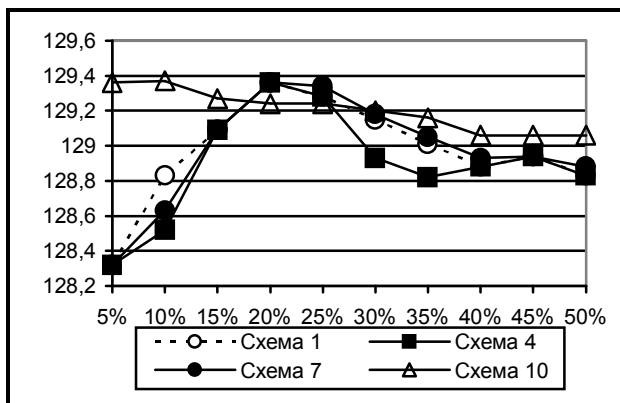


Рис. 17. Изменение NPV в зависимости от используемых в расчетах значений штрафа за использование инвестиций

Задача с ограничениями на объем инвестиций

Согласно этой постановке ежегодно выделяется 0,5 млрд. руб., а всего за весь расчетный период 2.5 млрд. руб. Хотя суммарный объем финансирования превосходит суммарные потребности в финансировании (см. табл. 6), из-за ограничений на инвестиции в начале расчетного периода результаты решений ухудшаются (табл. 7).

Разброс полученных результатов больше в сравнении с полученными решениями задачи без ограничений на объем инвестиций. Максимальное значение NPV (120,94 млрд. руб.) (табл. 7) позволяет получить вычислительная схема 7 (рис. 18), согласно которой сначала анализируются независимые статические сечения, причем при выборе лучших мероприятий на каждой дороге используется критерий статического эффекта сокращения издержек (см. условие (58)), а при ранжировании дорог по всей сети применяется критерий статического индекса доходности (см. условие (59)), после чего для противоречивых последовательностей технических состояний осуществляется дополнительный поиск решения методом динамического программирования. Лучшее решение получено при достаточно большом (0,45) значении штрафа за использование инвестиций (рис. 16). Получено достаточно много результатов, близких к наилучшему (например, см. схемы 1, 5, 7). На рис. 19 приводится зависимость эффекта от штрафа за использование инвестиций для задачи с ограничениями на выделяемые инвестиции.

Таблица 7

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА ОБЪЕМ ИНВЕСТИЦИЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СХЕМ

№ вар.	Штраф за использование инвестиций, %										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
1	NB	140,96	156,84	163,63	163,98	164,39	163,84	163,77	163,86	163,94	163,94
	NPV	101,26	113,73	119,33	119,55	119,92	119,49	119,45	119,51	119,56	119,56
	I	2,48	2,40	2,46	2,43	2,43	2,43	2,47	2,38	2,38	2,38
2	NB	155,48	158,09	158,09	158,09	158,31	155,58	155,58	155,84	155,60	155,60
	NPV	114,41	116,04	116,04	116,04	116,18	114,48	114,48	114,65	114,50	114,50
	I	1,93	1,90	1,90	1,90	1,66	1,77	1,77	1,53	1,53	1,53
3	NB	142,97	157,16	156,99	157,34	157,78	156,60	159,48	159,67	156,71	156,71
	NPV	103,28	113,69	113,92	114,13	114,53	113,65	115,56	115,72	113,72	113,72
	I	2,41	2,36	2,43	2,08	2,08	1,97	1,93	1,84	1,84	1,84

№ вар.	Штраф за использование инвестиций, %										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
4	NB	139,53	158,81	158,67	157,37	157,78	157,48	157,40	157,40	157,36	157,36
	NPV	98,37	115,08	115,96	115,14	115,52	115,30	115,25	115,25	115,22	115,22
	I	2,41	2,36	2,43	2,08	2,08	1,97	1,93	1,84	1,84	1,84
5	NB	163,20	163,26	163,26	163,26	163,05	163,04	163,04	162,98	163,18	163,18
	NPV	119,77	119,81	119,81	119,81	119,68	119,67	119,67	119,64	119,78	119,78
	I	1,94	1,90	1,90	1,90	1,90	1,78	1,78	1,78	1,54	1,54
6	NB	142,51	155,55	158,07	156,76	156,06	156,45	156,36	156,36	156,32	156,32
	NPV	100,75	112,51	115,49	114,68	114,13	114,43	114,38	114,38	114,36	114,36
	I	2,41	2,36	2,43	2,08	2,08	1,97	1,93	1,84	1,84	1,84
7	NB	139,36	155,40	163,24	164,99	163,89	161,82	161,78	163,93	165,95	165,78
	NPV	98,56	112,85	119,10	120,27	119,47	117,80	117,78	119,46	120,94	120,78
	I	1,78	2,36	2,50	2,14	2,39	2,26	2,30	2,06	1,69	1,71
8	NB	161,33	161,42	161,42	161,42	162,56	162,44	161,46	161,46	161,46	161,46
	NPV	117,47	117,53	117,53	117,53	118,34	118,29	117,67	117,67	117,67	117,67
	I	2,06	2,01	2,01	2,01	2,01	1,66	1,49	1,49	1,49	1,49
9	NB	145,31	146,55	162,30	154,39	149,49	151,03	151,67	151,73	151,75	149,89
	NPV	104,65	106,18	117,91	111,36	107,02	108,59	109,19	109,22	109,24	107,25
	I	2,09	2,09	2,20	2,35	2,31	2,32	2,46	2,29	2,12	1,99
10	NB	154,77	156,01	156,01	156,01	156,01	156,01	157,43	157,82	150,46	154,55
	NPV	113,04	114,06	114,06	114,06	114,06	114,06	115,26	115,59	109,55	113,01
	I	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84

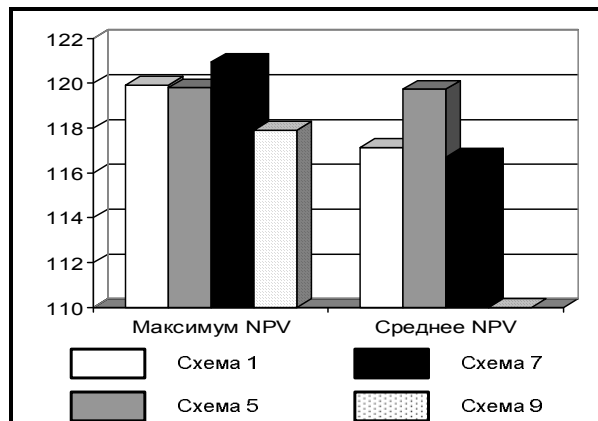


Рис. 18. Максимальные и средние значения эффекта приведенного сокращения затрат (NPV) по вычислительным схемам задачи с ограничениями на объем инвестиций

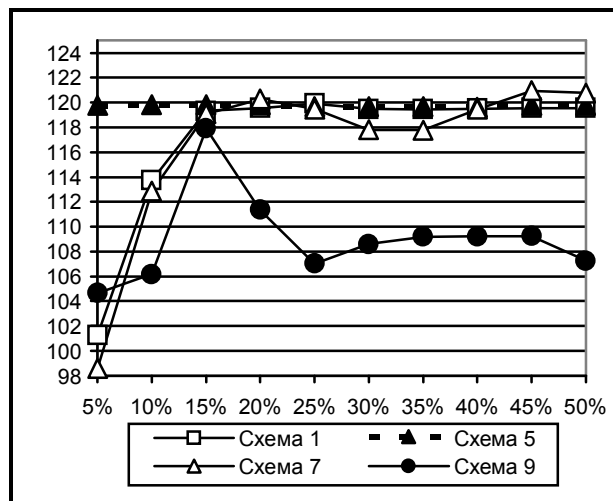


Рис 19. Изменение NPV в зависимости от используемых в расчетах значений штрафа за использование инвестиций

Анализ процедуры решения

В подразделе подробно проанализирован вариант решения задачи с ограничениями на инвестиции по вычислительной схеме 7 при значении штрафной функции 20%. Исходные технические состояния дорог сети приведены на рис. 7 (см. выше) и табл. 8.

В результате расчета транспортных потоков получены интенсивности движения автомобилей и общественные издержки на дорогах для условий «ничего не строится» на 1-й внешней итерации (табл. 8). После расчета транспортных потоков выполняется анализ статических независимых сечений. Для этого вычисляется значение критерия 1, который, согласно вычислительной схеме 7, является эффектом сокращения издержек (условие 59).

Таблица 8

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ ДОРОГ
И УСЛОВИЯ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ОТСУТСТВИИ
ХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В 2010 г.
(РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТРАНСПОРТНЫХ
ПОТОКОВ НА 1-Й БОЛЬШОЙ
ИТЕРАЦИИ)**

Связь между узлами сети	Технические состояния дорог	Интенсивность движения, прив. авт.	Суммарные общественные издержки, млрд. руб.	Затраты времени 1-го легкового автомобиля, ч.
1-2	V, переходн.	8 395	1,16	1,41
1-3	V, облегч.	13 783	1,71	1,53
2-3	V, переходн.	11 530	3,05	4,05
2-5	III, кап.	2 6791	0,48	0,25
2-4	V, переходн.	8 781	1,97	1,91
3-4	IV, переходн.	15 884	0,71	0,43
3-6	IV, переходн.	14 007	0,22	0,13
4-5	естеств.	4 123	1,36	3,00
4-6	IV, переходн.	15 281	0,50	0,30
5-7	V, облегч.	24 365	12,75	7,22
6-8	естеств.	6 127	5,24	7,41
4-9	V, облегч.	25 005	17,19	7,97
7-9	IV, переходн.	20 396	3,40	1,58
8-9	III, облегч.	16 671	0,26	0,15
Итого	-	21 1139	50	-

На каждой дороге может быть осуществлено 20 типов хозяйственных мероприятий по изменению технических состояний, а также предусмотрена возможность отказа от каких-либо строительных работ. Например, для дороги, связывающей пункты 2 и 3 к доступны 9 хозяйственных мероприятий, позволяющие перейти к новому техническому состоянию. Наилучшим из них является хозяйственное мероприятие по достижению IV категории дороги с облегченным покрытием (табл. 9).

Таблица 9

**ЗНАЧЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО
КРИТЕРИЯ СОКРАЩЕНИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ
ЗАТРАТ В РЕЗУЛЬТАТЕ ХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ДОРОГЕ МЕЖДУ
ПУНКТАМИ 2-3**

Млрд. руб.

Ia	Iб	II	III кап.	III облеж.	IV кап.	IV облеж.	IV перех.	V облеж.
1,5297	1,6504	1,7563	1,8028	1,8102	1,8099	1,8308	1,8173	1,7822

Лучшие мероприятия дорог по каждому статическому сечению ранжируются исходя из статического критерия индекса доходности (табл. 10, см. условие (58)).

Таблица 10

ЗНАЧЕНИЯ КРИТЕРИЯ РАНЖИРОВАНИЯ ДОРОГ

Связь узлов сети	Значения критерия ранжирования дорог					Ранг дорог сети				
	2006	2007	2008	2009	2010	2006	2007	2008	2009	2010
1-2	3,53	4,78	5,6	6,71	7,83	7	7	7	7	7
1-3	5,72	7,94	9,44	11,82	14,66	5	5	5	5	5
2-3	11,97	12,73	14,21	15,43	19,06	3	3	3	4	3
2-5	0,38	0,89	1,34	1,59	2,02	10	10	10	10	10
2-4	1,8	3,67	3,67	4,12	5,49	9	8	9	9	9
3-4	0,11	0,11	0,44	0,46	0,67	11	12	11	11	11
3-6	0,08	0,04	0,07	0,08	0,08	13	13	13	13	13
4-5	5,6	6,65	6,39	8,68	13,11	6	6	6	6	6
4-6	0,1	0,16	0,39	0,33	0,59	12	11	12	12	12
5-7	22,88	26,7	28,95	30,76	33,61	1	1	1	1	1
6-8	15,76	17,21	20,98	24,52	28,45	2	2	2	2	2
4-9	11,13	12,21	14,03	16,51	18,86	4	4	4	3	4
7-9	1,82	2,16	4,65	6,26	6,88	8	9	8	8	8
8-9	0	0	0	0	0	14	14	14	14	14

Затем, в соответствии с рангом дороги, отбираются мероприятия по развитию сети, при этом те из них, реализация которых приведет к нарушению ограничений на инвестиции, отбрасываются. Процедура «наложения» мероприятий на сеть дорог проиллюстрирована табл. 11.

Таблица 11

**НЕОБХОДИМЫЕ ОБЪЕМЫ ИНВЕСТИЦИЙ, ДЛЯ
РЕАЛИЗАЦИИ ХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ**

Млн. руб.

Ранг дороги	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
1	301	301	301	301	301
2	147	147	147	147	147
3	126	126	126	696	126
4	696	696	696	126	696
5	88	88	88	88	88
6	82	82	82	82	82
7	108	108	108	108	108
8	348	251	348	348	348
9	251	348	251	251	251
10	118	118	118	118	118
11	239	163	239	239	239
12	163	239	163	163	163
13	113	113	113	113	113
14	0	0	0	0	0
Итого освоен. инвест., нараст. итогом	449	971	1 440	1 896	2 428
Огранич. на инвест. нараст. итогом	500	1 000	1 500	2 000	2 500
Неосвоенные инвестиции	51	29	60	104	72

Реализация мероприятий приводит к изменению технических состояний дорог (табл. 12). Однако для двух дорог, соединяющих узлы 1-2 и 2-5 последовательности технических состояний оказываются противоречивыми. Эти противоречивые цепочки выделены в табл. 12 жирным шрифтом. Для них непротиворечивое решение было найдено с помощью процедуры динамического программирования. Сначала были определены оптимальные последовательности технических состояний этих дорог для всего расчетного периода с 2006 по 2010 гг. Чтобы определить, какие последовательности технических состояний должны быть реализованы в первую очередь, необходимо проранжировать дороги по убыванию эффекта сокращения суммарных общественных приведенных затрат за весь расчетный период (табл. 13).

Таблица 12

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ ДОРОГ СЕТИ,
ВЫБРАННЫЕ ПРИ АНАЛИЗЕ
СТАТИЧЕСКИХ СЕЧЕНИЙ**

Связь узлов сети	Исходные состояния	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
1-2	V переходн.	V переходн.	IV облгч.	V переходн.	IV облгч.	IV облгч.
1-3	V, облгч.	V облгч.	IV облгч.	IV облгч.	IV облгч.	IV облгч.
2-3	V, переходн.	V переходн.	IV облгч.	IV облгч.	IV облгч.	IV облгч.
2-5	III кап.	III кап.	IB	III кап.	III кап.	IB
2-4	V, переходн.	V переходн.	V переходн.	V переходн.	V переходн.	IV облгч.
3-4	IV, переход.	IV переход.	IV переход.	IV переход.	IV переход.	IV переход.
3-6	IV, переход.	IV переход.	IV переход.	IV переход.	IV переход.	IV переход.
4-5	естеств.	естественное	V облгч.	V облгч.	V облгч.	V облгч.
4-6	IV, переход.	IV переход.	IV переход.	IV переход.	IV переход.	IV облгч.
5-7	V, облгч.	III облгч.	III облгч.	III облгч.	III облгч.	III облгч.
6-8	естеств.	V облгч.	V облгч.	V облгч.	V облгч.	V облгч.
4-9	V, облгч.	V облгч.	V облгч.	III облгч.	III облгч.	III облгч.
7-9	IV, переход.	IV переход.	IV переход.	IV переход.	III облгч.	III облгч.
8-9	III, облгч.	III облгч.	III облгч.	III облгч.	III облгч.	III облгч.

Таблица 13

**ОПТИМАЛЬНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ДОРОГ В 2006-2010 гг.
(ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА), РАНГ И
ЗНАЧЕНИЯ ЭФФЕКТА**

Млрд. руб.

Связь узлов сети	Ранг	Эффект	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
1-2	1	2,04	V облгч.	V облгч.	V облгч.	V облгч.	V облгч.
2-5	2	0,43	IB	IB	IB	IB	IB

После ранжирования дорог программа проверяет возможность реализации найденных последовательностей мероприятий с точки зрения соответствия финансовым ограничениям. Для реализации любой из последовательностей технических состояний, приведенных в табл. 13, недостаточно финансовых средств в 2006 г. и 2008-2010 гг., которые здесь не приводятся. Рассмотрим период 2009-2010 гг. (табл. 14, табл. 15).

В табл. 15 приводятся инвестиции, необходимые для реализации хозяйственных мероприятий, позволяющих достичь оптимальных последовательностей за период 2009-2010 гг. на дорогах, соединяющих узлы 1 и 2, 2 и 5, причем технические состояния в период 2006-2008 гг. не изменяются, то есть соответствуют исходным (см. табл. 12). Как видно из табл. 15, резерва неиспользованных инвестиций достаточно для реализации хозяйственных мероприятий на обеих дорогах, требующих суммарно 187 млн. руб.

Таблица 14

**ОПТИМАЛЬНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ДОРОГ В 2009-2010 гг.
(ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА), РАНГ И
ЗНАЧЕНИЯ ЭФФЕКТА**

Млрд. руб.

Связь узлов сети	Ранг	Эффект	2009 г.	2010 г.
1-2	1	0,80	V облгч.	V облгч.
2-5	2	0,18	IB	IB

Таблица 15

**ОБЪЕМЫ ИНВЕСТИЦИЙ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ
РЕАЛИЗАЦИИ ХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ,
НАРАСТАЮЩИМ ИТОГОМ В 2009-2010 гг.**

Млн. руб.

Ранг дороги и связь узлов сети	2009 г.	2010 г.
1. 1-2	69	69
2. 2-5	118	118
I. Освоено средств для непротивореч. решений, млн. руб.	1788	2201
II. Ограничения на инвестиции нараст. итогом, млн. руб.	2 000	2 500
Резерв инвестиций (строка II минус строка I)	212	299

После завершения 1-й большой итерации программа переходит снова к блоку А (см. рис. 2), распределяя транспортные потоки по сети с новыми техническими состояниями дорог. После завершения блока А на 2-ой большой итерации получено новое распределение транспортных потоков и рассчитан соответствующий эффект сокращения суммарных дисконтированных общественных затрат (NPV) (табл. 16).

Таблица 16

**ОСНОВНЫЕ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ,
ПОСЛЕ ВЫПОЛНЕНИЯ БЛОКА А НА 2-Й
БОЛЬШОЙ ИТЕРАЦИИ**

Млрд. руб.

Годы	Освоенные инвестиции	Резерв инвестиций	Чистые выгоды (NB), нараст. итогом	Приведенные чистые выгоды (NPV), нараст. итогом
2006	0,449	0,051	17,890	16,263
2007	0,296	0,256	27,934	23,086
2008	0,696	0,060	33,692	25,313
2009	0,535	0,025	39,048	26,670
2010	0,414	0,111	45,321	28,141
Итого	2,389	0,111	163,885	119,474

Таблица 17

**НЕПРОТИВОРЕЧИВЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ
СОСТОЯНИЯ ДОРОГ СЕТИ, ВЫБРАННЫЕ ПРИ
АНАЛИЗЕ СТАТИЧЕСКИХ СЕЧЕНИЙ НА
2-й БОЛЬШОЙ ИТЕРАЦИИ**

Связь узлов сети	Исходные состояния	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
1-2	V переходн.	V переходн.	V переходн.	V облгч.	IV облгч.	IV облгч.
1-3	V, облгч.	V облгч.	IV облгч.	IV облгч.	IV облгч.	IV облгч.
2-4	V, переходн.	V переходн.	V переходн.	V переходн.	V переходн.	V облгч.
3-4	IV, переход.	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.
4-5	естеств.	V облгч.	IV облгч.	IV облгч.	IV облгч.	IV облгч.

Связь узлов сети	Исходные состояния	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
4-6	IV, переход.	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.
6-8	ест-теств.	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.
4-9	V, обл-легч.	V обл-легч.	V обл-легч.	V обл-легч.	III обл-легч.	III обл-легч.
8-9	III, обл-легч.	III обл-легч.	III обл-легч.	III обл-легч.	III обл-легч.	III обл-легч.

После того как вновь определены транспортные потоки, снова ищутся хозяйственные мероприятия уже для новых значений интенсивности движения автомобилей на дорогах сети. В табл. 17 приводятся найденные непротиворечивые решения на этапе анализа статических сечений. Для дорог, связывающих пары узлов 2-3, 2-5, 3-6, 5-7, 7-9, найденные решения противоречивы и поэтому для устранения этих противоречий дополнительно проведена процедура динамического программирования.

Таблица 18

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ДОРОГ В 2006-2010 гг. (ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА), РАНГ И ЗНАЧЕНИЯ ЭФФЕКТА, (2-я БОЛЬШАЯ ИТЕРАЦИЯ)

Млрд. руб.

Связь узлов сети	Ранг	Эффект	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
2-3	2	22,63	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.
2-5	4	1,16	ІБ	ІБ	ІБ	ІБ	ІБ
3-6	5	0,02	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.
5-7	1	36,40	II	II	II	II	II
7-9	3	1,28	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.

Анализ расчетного периода 2006-2010 гг. (табл. 18, 19) показал, что в ограничения на инвестиции не вписывается последовательность технических состояний с рангом 1, но может быть реализована последовательность с рангом 2. На проведение хозяйственных мероприятий на остальных дорогах не хватает финансовых средств, прежде всего, в 2006 г. (табл. 19). Поэтому анализируется расчетный период 2007-2010 гг., при этом дорога между узлами 2-3 исключается из рассмотрения (табл. 20, 21).

Таблица 19

ОБЪЕМЫ ИНВЕСТИЦИЙ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ, НАРАСТАЮЩИМ ИТОГОМ В 2006-2010 гг., (2-я БОЛЬШАЯ ИТЕРАЦИЯ)

Млн. руб.

Ранг дороги и связь узлов сети	2006	2007	2008	2009	2010
1. 5-7	608	608	608	608	608
2. 2-3	126	126	126	126	126
3. 7-9	189	189	189	189	189
4. 2-5	118	118	118	118	118
5. 3-6	113	113	113	113	113
I. Освоено средств для непротивореч. решений, млн. руб.	308	440	509	1244	1407
II. Ограничения на инвестиции нараст. итогом, млн. руб.	500	1000	1500	2000	2500
Резерв инвестиций (строка II минус строка I)	192	560	991	756	1093

Таблица 20

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ДОРОГ В 2007-2010 гг. (ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА), РАНГ И ЗНАЧЕНИЯ ЭФФЕКТА, (2-я БОЛЬШАЯ ИТЕРАЦИЯ)

Млрд. руб.

Связь узлов сети	Ранг	Эффект	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
2-5	2	1,01	ІБ	ІБ	ІБ	ІБ
3-6	4	0,01	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.
5-7	1	26,33	III обл-легч.	III обл-легч.	III обл-легч.	III обл-легч.
7-9	3	0,72	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.	IV обл-легч.

Таблица 21

ОБЪЕМЫ ИНВЕСТИЦИЙ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ, НАРАСТ. ИТОГОМ В 2007-2010 гг., (2-я БОЛЬШАЯ ИТЕРАЦИЯ)

Млн. руб.

Ранг дороги и связь узлов сети	2007	2008	2009	2010
1. 5-7	301	301	301	301
2. 2-5	118	118	118	118
3. 7-9	189	189	189	189
4. 3-6	113	113	113	113
I. Освоено средств для непротивореч. решений, млн. руб.	566	635	1 369	1 533
II. Ограничения на инвестиции нараст. итогом, млн. руб.	1 000	1 500	2 000	2 500
Резерв инвестиций (строка II минус строка I)	434	865	631	967

Оптимальные технические состояния для дороги между узлами 5-7 меняются: вместо II категории (табл. 18) выбрана III категория с облегченным покрытием (табл. 20), что не повлияло на ранг дороги, который остается первым. Повышается ранг дороги между узлами 2-5, хозяйственные мероприятия на которой оказываются предпочтительней, чем на дороге между узлами 7-9. Ограничения на инвестиции позволяют реализовать мероприятия на дорогах, связывающих пары узлов 5-7, 2-5. Для остальных дорог не хватает финансовых средств, прежде всего в 2007 г. Далее программа анализирует расчетный период 2008-2010 гг., при этом дороги между узлами 2-5 и 5-7 исключаются из рассмотрения (табл. 22, 23).

Таблица 22

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ДОРОГ В 2008-2010 гг. (ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА), РАНГ И ЗНАЧЕНИЯ ЭФФЕКТА, (2-я БОЛЬШАЯ ИТЕРАЦИЯ)

Млрд. руб.

Связь узлов сети	Ранг	Эффект	2008	2009	2010
3-6	2	0	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.
7-9	1	0,47	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.

Таблица 23

**ОБЪЕМЫ ИНВЕСТИЦИЙ, НЕОБХОДИМЫЕ
ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ХОЗЯЙСТВЕННЫХ
МЕРОПРИЯТИЙ, НАРАСТ. ИТОГОМ
В 2008-2010 гг.,
(2-я БОЛЬШАЯ ИТЕРАЦИЯ)**

<i>Млн. руб.</i>			
Ранг дороги и связь узлов сети	2008	2009	2010
1. 7-9	189	189	189
I. Освоено средств для непротивореч. решений, млн. руб.	1 054	1 789	1 953
II. Ограничения на инвестиции на-раст. итогом, млн. руб.	1 500	2 000	2 500
Резерв инвестиций (строка II минус строка I)	446	211	547

Таблица 24

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ ДОРОГ СЕТИ,
ВЫБРАННЫЕ ПОСЛЕ 2-ОЙ БОЛЬШОЙ ИТЕРАЦИИ**

Связь узлов сети	Исходные состояния	2006	2007	2008	2009	2010
1-2	V переходн.	V переходн.	V переходн.	V обл-гч.	IV обл-гч.	IV обл-гч.
1-3	V обл-гч.	V обл-гч.	IV обл-гч.	IV обл-гч.	IV обл-гч.	IV обл-гч.
2-3	V переходн.	IV обл-гч.	IV обл-гч.	IV обл-гч.	IV обл-гч.	IV обл-гч.
2-5	III кап.	III кап.	IB	IB	IB	IB
2-4	V переходн.	V переходн.	V переходн.	V переходн.	V переходн.	V обл-гч.
3-4	IV переход.	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.
3-6	IV переход.	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.
4-5	ест-ств.	V обл-гч.	IV обл-гч.	IV обл-гч.	IV обл-гч.	IV обл-гч.
4-6	IV переход.	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.	IV переходн.
5-7	V обл-гч.	V обл-гч.	III обл-гч.	III обл-гч.	III обл-гч.	III обл-гч.
6-8	ест-ств.	IV обл-гч.	IV обл-гч.	IV обл-гч.	IV обл-гч.	IV обл-гч.
4-9	V обл-гч.	V обл-гч.	V обл-гч.	V обл-гч.	III обл-гч.	III обл-гч.
7-9	IV переход.	IV переходн.	IV переходн.	IV обл-гч.	IV обл-гч.	IV обл-гч.
8-9	III обл-гч.	III обл-гч.	III обл-гч.	III обл-гч.	III обл-гч.	III обл-гч.

Для дороги между узлами 3-6 наилучшим вариантом оказался отказ от мероприятий с NPV=0. Поэтому эту дорогу можно исключить из рассмотрения. Хозяйственные мероприятия на дороге между узлами 7-9 удовлетворяют ограничениям на инвестиции. Так как все противоречивые последовательности технических состояний исправлены, анализ расчетных периодов 2009-2010 гг. и 2010 г. ничего не меняет в решении блока В 2-ой большой итерации, результаты которой показаны в табл. 24.

Пересчет транспортных потоков процедурами блока А на 3-й большой итерации незначительно увеличивает значение NPV (табл. 25). Выполнение блока В и затем снова пересчет транспортных потоков приводит к ухудшению значения NPV, поэтому решение, приведенное в табл. 24 и 25, выдается программой как окончательное.

Таблица 25

**ОСНОВНЫЕ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ,
МЛРД. РУБ., ПОСЛЕ ВЫПОЛНЕНИЯ БЛОКА А
(НА 3-й БОЛЬШОЙ ИТЕРАЦИИ)**

Годы	Освоенные инвестиции	Резерв инвестиций	Чистые выгоды NB, нараст. итогом	Приведенные чистые выгоды NPV, нараст. итогом
2006	0,434	0,066	17,557	15,961
2007	0,551	0,015	28,877	23,865
2008	0,258	0,257	33,860	25,440
2009	0,735	0,023	38,989	26,630
2010	0,164	0,359	45,704	28,378
Итого	2,141	0,359	164,987	120,274

Модификации вычислительных схем

На основе анализа процедуры решения можно указать возможные недостатки применявшихся вычислительных схем.

- Во-первых, они не позволяют отказываться от мероприятий с относительно небольшими инвестициями, чтобы реализовать в последующие годы более выгодные мероприятия, но требующие больших финансовых затрат. Чтобы устранить этот недостаток, можно использовать модификацию алгоритма, в которой заложены требования реализовать только лучшие мероприятия, удовлетворяющие ограничениям на инвестиции. Предлагаемая модификация оказалось эффективной для схемы выбора мероприятий с использованием только метода динамического программирования, причем увеличение общественного эффекта существенно (более 7%) при значительном сокращении объемов инвестиций (на 16%).
 - Во-вторых, из-за несовпадения общественных и пользовательских издержек и проблем при поиске оптимальных мероприятий, вызванных их целочисленностью и ограничениями на инвестиции, нельзя сформулировать четкие критерии поиска набора мероприятий, которые обеспечивали бы в конечном итоге наилучшие результаты, а перебор всех вариантов даже для небольшой сети практически невозможен. Поэтому целесообразно применить процедуры случайного поиска. Расчеты методом случайного поиска были проведены только для вычислительных схем с зависимыми статическими сечениями. Расчеты показали, что метод случайного поиска эффективен при условии достаточно большого числа внешних итераций, что существенно увеличивает длительность работы программного комплекса.
 - В-третьих, при пересчете транспортных потоков часть найденных мероприятий на предыдущей итерации может оказаться не нужной, так как они были осуществлены на «конкурирующих» дорогах, значительная часть интенсивности движения которых формируется совпадающими подмножествами корреспонденций. Эти ошибки, в принципе, должны быть устранены последующими итерациями. Но можно использовать и вычислительную схему, предполагающую постепенное освоение выделяемых инвестиций на каждой большой итерации. Это позволит добиваться более плавных изменений транспортных потоков на каждой большой итерации, что, возможно, приведет к обнаружению более эффективных решений.
- При этом методе задается число начальных внешних итераций, в течение которых объемы инвестиций, доступных для использования, будут равномерно увеличиваться. На практических расчетах показано, что метод позволяет увеличить полученный общественный эффект почти для всех вычислительных схем. Данный метод удобен при использовании для сети с эндогенными объемами выделяемых инвестиций, так как постепенное увеличение инвестиций в ходе решения позволит резко снизить вероятность нарушения финансовых ограничений.

Вариант алгоритма с отбором только лучших мероприятий

Расчеты проведены по той же базовой схеме с той лишь разницей, что проводится отбор только лучших мероприятий по рангу (табл. 26).

Сравнение результирующих показателей (чистая дисконтированная стоимость и объемы используемых инвестиций), полученных расчетами по модифицированному алгоритму (табл. 26) и основному варианту алгоритма (см. табл. 7), проводилось как для средних по всем значениям штрафа за использование инвестиций величин, так и для максимальных (рис. 17).

Таблица 26

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА ОБЪЕМ ИНВЕСТИЦИЙ ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ВАРИАНТА АЛГОРИТМА

№ схемы		Штраф за использование инвестиций, %									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	NB	136,07	150,08	160,62	161,10	161,10	160,58	160,38	160,48	160,48	160,48
	NPV	97,57	107,80	116,88	117,18	117,18	116,79	116,67	116,73	116,73	116,73
	I	2,48	1,84	2,46	2,27	2,27	2,27	2,47	2,38	2,38	2,38
2	NB	146,63	149,25	149,25	149,25	149,61	146,88	146,88	147,14	146,90	146,90
	NPV	106,42	108,05	108,05	108,05	108,29	106,59	106,59	106,75	106,61	106,61
	I	1,93	1,90	1,90	1,90	1,66	1,77	1,77	1,53	1,53	1,53
3	NB	17,48	87,36	125,66	137,30	141,00	141,14	141,16	141,09	141,19	141,19
	NPV	14,37	64,05	88,99	96,22	98,84	98,93	98,97	98,93	98,99	98,98
	I	0,82	1,87	1,96	2,27	2,35	2,35	2,36	2,24	2,27	2,27
4	NB	136,07	149,49	155,45	161,10	161,10	160,58	160,38	160,48	160,48	160,48
	NPV	97,50	107,44	113,67	117,18	117,18	116,79	116,67	116,73	116,73	116,73
	I	2,48	2,41	2,20	2,27	2,27	2,27	2,47	2,38	2,38	2,38
5	NB	147,50	150,22	150,22	150,22	152,33	152,31	152,24	152,24	147,38	147,40
	NPV	107,04	108,74	108,74	108,74	110,20	110,19	110,15	110,15	107,00	107,02
	I	1,93	1,90	1,90	1,90	1,66	1,66	1,66	1,66	1,53	1,53
6	NB	16,48	85,10	91,89	137,30	138,25	138,25	138,06	137,98	138,03	138,03
	NPV	13,62	62,65	68,02	96,22	96,87	96,87	96,73	96,69	96,72	96,72
	I	0,82	1,87	1,96	2,27	2,35	2,35	2,36	2,24	2,27	2,27
7	NB	152,98	143,99	160,45	161,10	161,10	160,58	160,38	160,48	160,48	160,48
	NPV	111,05	103,47	116,80	117,18	117,18	116,79	116,67	116,73	116,73	116,73
	I	1,59	1,84	2,46	2,27	2,27	2,27	2,47	2,38	2,38	2,38
8	NB	144,22	146,83	146,83	146,83	146,96	144,46	144,46	144,49	144,49	144,49
	NPV	104,23	105,86	105,86	105,86	105,95	104,40	104,40	104,42	104,42	104,42
	I	1,93	1,90	1,90	1,90	1,90	1,77	1,77	1,53	1,53	1,53
9	NB	77,75	133,18	130,28	137,30	137,41	137,87	137,91	137,98	137,81	137,76
	NPV	55,43	93,56	91,72	96,22	96,32	96,62	96,64	96,69	96,57	96,54
	I	0,70	1,62	2,29	2,27	2,36	2,38	2,17	2,24	2,24	2,21
10	NB	165,52	163,98	163,99	163,98	163,17	170,23	170,23	170,23	165,55	165,42
	NPV	120,45	119,36	119,36	119,36	118,70	124,76	124,76	124,76	120,60	120,51
	I	1,50	1,61	1,61	1,57	1,57	1,48	1,48	1,48	1,51	1,61

Схема 1. NPV ухудшилось как для средних, так и для максимальных результатов примерно на 2-3%. На 4% в среднем сократились использование инвестиций.

Схема 2. Ухудшение NPV на 7% при тех же объемах освоенных инвестиций.

Схема 3. Существенное ухудшение NPV – на 23%, при том что объемы использования инвестиций остались примерно на том же уровне.

Схема 4. В среднем NPV осталось на том же уровне, а максимальный результат вырос на 1,1%. Среднее увеличение объемов освоенных инвестиций составило около 13%.

Схема 5. Снижение NPV на 9%, объемы освоенных инвестиций уменьшились на 3,6%.

Схема 6. Резкое снижение среднего значения NPV – более чем на четверть, при том что объемы освоенных инвестиций остались примерно на том же уровне.

Схема 7. Максимум NPV снизился на 3%, а средняя величина – на 1,5. На 5% возрос объем освоенных инвестиций.

Схема 8. NPV упало на 11% при тех же в среднем объемах освоенных инвестиций.

Схема 9. Снижение NPV более чем на 15% и сокращение использования инвестиций на 8%.

Схема 10. Увеличение NPV – в среднем на 7%, при том что объемы использования инвестиций сокращаются на 16%.

ВЫВОДЫ

Предлагаемая модификация оказалась эффективной только для схемы 4 (анализ статических зависимых сечений при разных критериях отбора мероприятий и ранжирования дорог по всей сети) и схемы 10 (выбор мероприятий с использованием только метода динамического программирования). Причем для схемы 10 улучшение существенно при значительном сокращении объемов инвестиций. В результате модификация алгоритма позволила увеличить максимальное значение NPV на 3%, а соответствующие максимальным результатам объемы используемых инвестиций сократить на 12% (см. рис. 20).

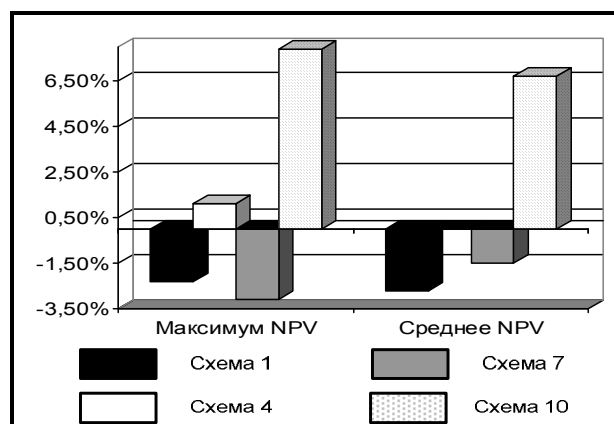


Рис. 20. Изменения эффекта, рассчитанного по модифицированному алгоритму (в сравнении с основным вариантом алгоритма)

Метод случайного поиска

При случайном поиске модифицируются схемы с анализом зависимых статических сечений (схемы 4-6). Суть процедуры заключается в следующем. Во время каждого запуска программы активизируется новая последовательность случайных чисел. Значения критериев выбора мероприятий на каждой дороге сети умножаются на случайное число от 0 до p , где p – задаваемый пользователем параметр случайного поиска, т.е.:

$$K_{\lambda}^{1p}(t) = s_{\lambda}^{ch}(t) K_{\lambda}^1(t); \quad (71)$$

$$K_{\lambda}^{2p}(t) = s_{\lambda}^{ch}(t) K_{\lambda}^2(t), \quad (72)$$

где $K_{\lambda}^1(t)$ и $K_{\lambda}^2(t)$ – детерминированные значения статических критериев 1 и 2 (см. условия (58-59)) для технического состояния γ дороги λ в году t ,

$s_{\lambda}^{ch}(t)$ – случайное число;

$K_{\lambda}^{1p}(t)$ и $K_{\lambda}^{2p}(t)$ – случайные значения статических критериев 1 и 2.

В отличие от процедур, изложенных выше, при выборе мероприятий используются случайные значения критериев, при этом выполняется несколько итераций отбора и затем ранжирования мероприятий. В конце каждой

итерации вычисляется оценка эффекта сокращения дисконтированных общественных затрат (естественно, без пересчета транспортных потоков). Пользователем задается как общее количество итераций случайного поиска, так и максимальное количество неудачных итераций, в течение которых не произошло увеличения эффекта.

При экспериментальных расчетах максимальное количество итераций случайного поиска равнялось 1 млн., а максимальное количество неудачных итераций – 500. Параметр случайного поиска p желательнее устанавливать в пределах от 0,5 до 1. Уменьшение параметра увеличивает вероятность существенного замедления работы программы, увеличение параметра ухудшает получаемые результаты. Каждая вычислительная схема выполнялась несколько раз при разных значениях p для основного и модифицированного вариантов алгоритма. В среднем модифицированный вариант алгоритма (см. предыдущий пункт) давал худшие результаты. В табл. 27 показаны результирующие показатели для наиболее удачных экспериментов.

Таблица 27

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА ОБЪЕМ ИНВЕСТИЦИЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СХЕМ

№ схемы		Штраф за использование инвестиций, %									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
4	NB	155,15	162,01	163,67	170,49	164,20	158,46	163,27	166,46	163,15	154,59
	NPV	112,16	117,65	119,25	125,18	119,76	115,16	119,01	121,74	118,96	111,40
	I	2,33	2,49	2,42	1,84	2,41	2,26	2,30	2,19	2,48	2,43
5	NB	168,96	166,45	169,32	170,34	170,74	169,14	164,96	156,62	168,34	169,94
	NPV	124,16	121,51	124,32	125,00	125,37	124,34	120,87	113,93	123,72	124,90
	I	2,43	2,09	2,49	1,78	1,78	1,78	1,69	2,16	1,64	1,42
6	NB	154,35	159,35	155,14	158,19	164,09	155,01	167,02	164,20	157,95	163,58
	-	111,08	115,31	111,86	114,62	119,71	111,65	122,40	119,78	114,40	119,09
	-	2,50	2,24	2,45	2,49	2,50	2,42	2,35	2,38	2,40	2,20

Результаты расчетов показали:

- во-первых, наиболее удачной для случайного поиска является схема 5 (рис. 21);
- во-вторых, использование случайного поиска оправдано, так как позволяет найти более эффективное решение (см. табл. 7 и табл. 26).

Метод случайного поиска может быть эффективно использован при условии заданного количества внешних итераций, когда программа выводит лучшее решение с учетом перераспределения потоков, полученное за определенное пользователем количество итераций. Так, для вычислительной схемы 5 при значении штрафа за использование инвестиций, равном 0,2, проведены расчеты для 1000 внешних итерации.

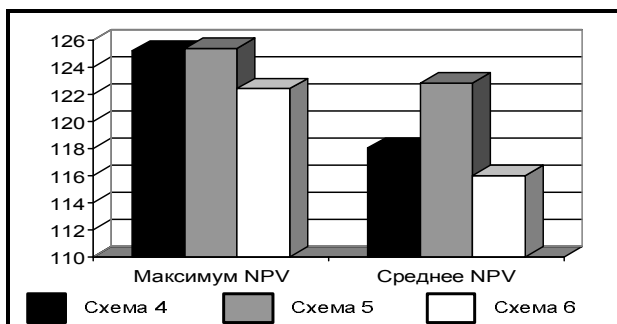


Рис. 21. Значения эффектов, полученных с применением метода случайного поиска

Метод постепенного увеличения инвестиций

При этом методе пользователь задает количество внешних итераций, в течение которых объемы инвестиций, доступных для использования, будут равномерно увеличиваться согласно формуле:

$$I_i^v(t) = \begin{cases} I^v(t) \hat{i}, \hat{i} < k^b; \\ k^b, \hat{i} \geq k^b, \end{cases} \quad (73)$$

где

$I^v(t)$ – выделенные финансовые средства за период от начала расчетного периода до начала года t (заданные величины);

$I_i^v(t)$ – доступные финансовые средства на i -й итерации \hat{i} ;

k^b – количество внешних итераций, в течение которых наращиваются объемы доступных финансовых средств.

Таблица 28

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА ОБЪЕМ ИНВЕСТИЦИЙ ПРИ ДВУХШАГОВОМ «НАЛОЖЕНИИ» ВЫДЕЛЯЕМЫХ ФИНАНСОВЫХ СРЕДСТВ

№ схемы		Штраф за использование инвестиций, %									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	NB	149,98	142,70	161,61	160,92	161,33	165,14	166,05	165,83	166,27	166,07
	NPV	107,90	102,25	117,72	117,29	117,67	120,43	121,08	120,95	121,30	121,16
	I	2,43	2,49	2,43	2,45	2,45	2,48	2,19	2,26	2,26	2,30
2	NB	158,07	160,65	160,65	160,65	157,90	158,12	158,12	158,12	158,38	158,38
	NPV	116,19	117,79	117,79	117,79	116,09	116,23	116,23	116,23	116,39	116,39
	I	1,93	1,90	1,90	1,90	1,72	1,32	1,32	1,32	1,21	1,21
3	NB	0,00	156,98	153,51	151,26	154,33	156,45	156,71	155,44	159,09	159,76
	NPV	0,00	113,57	111,47	109,53	112,02	113,51	113,68	112,80	115,32	115,81
	I	0,00	2,40	2,43	2,29	2,16	2,16	2,04	1,92	1,92	2,46
4	NB	151,20	152,12	149,59	148,52	148,58	159,33	162,72	162,72	162,64	166,41
	NPV	108,82	109,31	109,65	108,99	109,08	116,42	118,53	118,53	118,47	121,37
	I	2,25	2,26	2,45	2,37	2,37	2,37	2,33	2,33	2,43	2,19
5	NB	162,51	162,64	162,64	162,64	162,37	162,74	162,74	162,74	162,74	162,74
	NPV	119,21	119,31	119,31	119,31	119,15	119,39	119,39	119,39	119,39	119,39
	I	1,94	1,90	1,90	1,90	1,90	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49
6	NB	0,00	151,87	157,61	159,63	159,25	159,36	159,40	159,12	158,03	157,85
	NPV	0,00	110,07	115,18	116,44	116,11	116,21	116,24	116,07	115,39	115,27
	I	0,00	2,40	2,43	2,29	2,16	2,16	2,04	1,92	1,92	2,46
7	NB	142,23	158,50	161,08	160,38	161,49	164,54	166,10	165,04	165,04	165,62
	NPV	102,53	114,67	117,34	116,90	117,67	119,92	121,09	120,34	120,34	120,77
	I	2,11	2,40	2,40	2,45	2,45	2,48	2,19	2,35	2,35	2,04
8	NB	153,57	153,57	153,57	153,57	153,77	153,77	153,77	153,58	154,39	157,50
	NPV	111,29	111,29	111,29	111,29	111,43	111,44	111,44	111,30	111,83	113,95
	I	1,93	1,93	1,93	1,93	1,69	1,53	1,53	1,49	1,38	1,74
9	NB	0,00	148,59	148,09	154,89	160,84	158,89	158,34	159,25	163,73	163,21
	NPV	0,00	107,97	107,70	112,55	117,44	115,87	115,53	116,19	119,22	111,17
	I	0,00	2,45	2,41	2,43	2,35	2,47	1,90	2,48	2,26	2,24
10	NB	157,06	158,30	158,30	158,30	158,30	158,88	158,88	160,05	152,31	157,29
	NPV	114,40	115,42	115,42	115,42	115,42	115,92	115,92	116,89	110,60	114,71
	I	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90

Экспериментальные расчеты проводились при заданном параметре $k^b = 2$ (табл. 28). В сравнении с расчетами, представленными в табл. 7, максимальные значения чистой приведенной стоимости (NPV), выделенные в таблицах жирным курсивом, возросли для вычислительных схем 1-4, 6, 7, 9, 10.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные разработки по модификации постановки задачи оптимизации развития магистральной сети, динамических моделей и алгоритмов, их компьютерной реализации являются ключевыми элементами создаваемой информационной технологии решения задач синтеза сложных сетевых структур. В сравнении с разработанными до сих пор системами данная информационная технология, имеет, по мнению авторов, следующие преимущества и особенности:

- уточнения (в соответствии с подходами к инвестиционному проектированию с учетом факторов нестационарности) используемых в алгоритмах развития сети критериев (как стоимостных нормативных, так и допускающих самоорганизацию потоков по сети) и, что особенно важно, учитывающих диверсификацию источников и схем финансирования в рыночных условиях;
- уточнения способов динамических расчетов потоков по звеньям сети и характеристик их технических состояний на основе включения в алгоритмы оптимизации развития магистральной транспортной сети способов согласования отдельных статических сечений (в том числе не полностью формализуемых, с применением комбинаций эвристических методов, штрафных функций и алгоритмов случайного поиска) при различных финансовых ограничениях и в условиях целочисленности инвестиционных мероприятий;
- включение в расчеты по оптимизации развития транспортных сетей алгоритмов оценки различных видов вне-транспортных эффектов (в том числе индуцированного спроса) с использованием модифицированных моделей динамического межотраслевого баланса;
- включение в расчетные модели иерархической системы стоимостных (прежде всего, затратных) характеристик деятельности инфраструктурных объектов в рыночных условиях для учета естественно-монопольной природы инфраструктурных технологий;
- создание компьютерной системы синтеза сетевых структур большой размерности, предусматривающей адаптацию к задачам развития транспортных сетей принятых в проектном анализе критериев оценки эффективности решений (прежде всего, включение в компьютерную систему процедур расчета чистого дисконтированного дохода).

Лившиц Вениамин Наумович
E-mail: Livchits@isa.ru

Позамантур Эльмар Ильич
E-mail: Posamant@isa.ru

Белоусова Наталия
E-mail: dual@isa.ru

Бушанский Сергей
E-mail: ergr190@rambler.ru

Васильева Елена
E-mail: dual@isa.ru

Литература

1. Лившиц В.Н. О применении математических методов при выборе оптимальной схемы развития транспортной сети – I Всесоюз. конф. по оптимизации и моделированию транспортных сетей – Сб. докл. Киев, 1967.
2. Левит Б.Ю., Лившиц В.Н. Нелинейные сетевые транспортные задачи. – М., Транспорт, 1972.
3. Васильева Е.М., Левит Б.Ю., Лившиц В.Н. Нелинейные транспортные задачи на сетях. – М., Финансы и статистика, 1981.
4. Лившиц В.Н. Системный анализ экономических процессов на транспорте. – М.: Транспорт, 1986.
5. Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М., Лившиц В.Н., Позамантур Э.И. Совершенствование теоретических основ, моделей и методов оптимизации развития сети ав-

6. Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов: теория и практика. – М., Дело, 2004 (3-е издание).
7. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. Вторая редакция. Официальное издание. – Утверждено Минэкономки РФ, Минфином РФ, Госкомитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике, №ВК 477 от 21.06.1999. Рук. авт. кол. – Коссов В.В., Лившиц В.Н., Шахназаров А.Г. – М., ОАО «НПО Изд-во «Экономика», 2000.
8. Виленский П., Лившиц В., Смоляк С., Шахназаров А. О методологии оценки эффективности реальных инвестиционных проектов. – Российский экономический журнал, 2006, Вып. 9-10.
9. Стенбринк П. Оптимизация транспортных сетей. Пер. с англ., М., Транспорт, 1981 (Peter A. Steenbrink. Optimization of Transport Networks, L., N.Y., Sydney, Toronto, Ed. John Wiley&Sons, 1974.
10. Litman T. Transportation cost analysis summary. Victoria Transport Policy Institute, 2001.
11. Weisbrod G., Grovak M. Alternative methods for valuing economic benefits of transportation projects// Transportation Association of Canada: Benefit Cost Analysis Symposium, 2001.
12. Weisbrod G., Treyz F. Productivity and accessibility: bridging project-specific and macroeconomic analyses of transportation investments// Journal of Transportation and Statistics, v.1, No.3, 1998.
13. Review of the literature and operational models. Puget Sound Regional Council. Cambridge Systematics, Inc. University of Washington, 2001.
14. Levinson D., Kumar A. Density and the Journey to Work, Growth and Changes, v.28, No.2, 1997).
15. Kockelman K.M. A model for time- and budget-constrained activity demand analysis. Transportation research, August 1999.
16. Assessing the Issue of Induced Travel: a Briefing on Evidence & Implications from the Literature. Prepared for Washington Metropolitan Council of Governments by Transtech Management, Inc. & Hagler Bailly, July 2000.
17. Noland R.B., William A. Cowart Analysis of metropolitan Highway Capacity and the Growth in Vehicle Miles of Travel. Preprint Transportation Research Board 79th Annual Meeting. January 9-13, 2000. Washington, DC.
18. Calculating transport congestion and scarcity costs. Final report of the expert advisors to the high level group on infrastructure charging. Prepared by Professor Chris Nash and Mr. Tom Sansom, L., 1999.
19. Santos B., Antunes A., Miller E. Optroad: A computer program for interurban road network planning. Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, June 14-16, 2006 – Montreal, Canada.
20. Santos B., Antunes A., Miller E. Solving an accessibility-maximization road network design model: a comparison of heuristics. 16th Mini-EURO Conference. Poznan, 13-16 September, 2005.
21. Nagurney A.. Sustainable Transportation Networks, Edward Elgar Publishers, Cheltenham, England, 2000.
22. <http://www.people.umass.edu/nagurney>.
23. Hong K.L.O, Wai Yuen SZETO. Time-dependent transport network design: a study on budget sensitivity. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, October, 2003.
24. Chien-Hung W., Schonfeld P. Multiperiod network improvement model. Travel Demand Modeling and Network Assignment Models. Transportation Research Record 1443. Washington, DC 1994.
25. Qiang MENG, Guoshan LIU. A trust region method for the transportation network optimization problems with user equilibrium constraints. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, 2005.
26. Waters W. The value of time savings for the economic evaluation of highway investments in British Columbia. BC Ministry of Transportation and Highways, 1992.

27. Litman T. Generated traffic and induced travel. Victoria Transport Policy Institute, 2002.
 28. Braess D. Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. Unternehmensforschung, 1968, V. 12.
 29. Wardrop J.J. Some theoretical aspects of road traffic research. – Proc. Institution Civil Engineers, 1952, P. II, 1(2).
 30. Руководство по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах. Официальное издание. – Утверждено Минтрансом России, №ОС-555-р от 19.06.2003.
 31. Позамантир Э.И., Тищенко Т.И. Анализ влияния инвестиций в инфраструктуру народного хозяйства с использованием модели динамического межотраслевого баланса. –

В сб. трудов конференции «Системный анализ и информационные технологии», М., ИСА РАН, URSS, 2005.
 32. Позамантир Э.И., Тищенко Т.И. Оценка народнохозяйственного эффекта модернизации и развития сети автомобильных дорог России. – Экономика и математические методы, 2005, т. 41, Вып. 1.
 33. Белоусова Н.И., Васильева Е.М., Лившиц В.Н. Оптимизация развития нелинейных транспортных сетей с учетом естественно-монопольной природы. – Вестник РАЕН, М., 2005, т.5, №1.
 34. Белоусова Н.И., Васильева Е.М. Вопросы теории государственного регулирования и идентификации естественных монополий. М., Труды ИСА РАН, КомКнига, 2006.

Приложение

Исходные данные для расчетного примера

Таблица 1

ОБЪЕМЫ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ НА ДОРАСЧЕТНЫЙ ГОД

№	Пункт 1	Пункт 2	Пункт 3	Пункт 4	Пункт 5	Пункт 6	Пункт 7	Пункт 8	Пункт 9	Тонаж
Пункт 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Менее 3 тонн
Пункт 2	100	0	0	0	0	0	0	0	0	
Пункт 3	123	175	0	0	0	0	0	0	0	
Пункт 4	180	194	194	0	0	0	0	0	0	
Пункт 5	166	145	235	238	0	0	0	0	0	
Пункт 6	228	180	156	249	200	0	0	0	0	
Пункт 7	221	175	164	232	247	152	0	0	0	
Пункт 8	145	178	204	238	156	235	190	0	0	
Пункт 9	197	240	257	140	218	254	152	185	0	
Пункт 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	От 3 до 8 тонн
Пункт 2	97	0	0	0	0	0	0	0	0	
Пункт 3	95	169	0	0	0	0	0	0	0	
Пункт 4	107	135	90	0	0	0	0	0	0	
Пункт 5	105	104	114	123	0	0	0	0	0	
Пункт 6	154	111	92	140	130	0	0	0	0	
Пункт 7	166	118	157	100	130	88	0	0	0	
Пункт 8	123	131	86	143	171	93	154	0	0	
Пункт 9	173	147	147	102	100	171	147	164	0	
Пункт 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Более 8 тонн
Пункт 2	74	0	0	0	0	0	0	0	0	
Пункт 3	69	118	0	0	0	0	0	0	0	
Пункт 4	97	105	55	0	0	0	0	0	0	
Пункт 5	76	114	85	67	0	0	0	0	0	
Пункт 6	109	121	67	98	95	0	0	0	0	
Пункт 7	62	69	93	76	88	116	0	0	0	
Пункт 8	79	104	92	83	54	54	76	0	0	
Пункт 9	95	64	81	62	119	71	55	107	0	
Пункт 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Автобусы
Пункт 2	152	0	0	0	0	0	0	0	0	
Пункт 3	138	138	0	0	0	0	0	0	0	
Пункт 4	135	111	123	0	0	0	0	0	0	
Пункт 5	119	98	143	98	0	0	0	0	0	
Пункт 6	124	123	116	147	104	0	0	0	0	
Пункт 7	150	152	157	104	126	162	0	0	0	
Пункт 8	116	107	157	133	133	140	93	0	0	
Пункт 9	90	111	169	114	143	118	118	114	0	
Пункт 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Легковые
Пункт 2	1 249	0	0	0	0	0	0	0	0	
Пункт 3	1 312	1 149	0	0	0	0	0	0	0	
Пункт 4	1 591	1 104	1 472	0	0	0	0	0	0	
Пункт 5	1 158	1 477	1 134	1 555	0	0	0	0	0	
Пункт 6	962	1 716	1 412	1 382	1 645	0	0	0	0	
Пункт 7	1 242	1 521	1 077	1 191	1 208	1 318	0	0	0	
Пункт 8	931	1 638	959	1 427	1 643	1 064	1 685	0	0	
Пункт 9	1 289	1 529	1 586	1 194	1 032	1 146	1 222	995	0	

Таблица 2

НЕРАСПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПОТОКИ АВТОМОБИЛЕЙ

Связь узлов сети	Менее 3 тонн	От 3 до 8 тонн	Более 8 тонн	Автобусы	Легковые
1-2	49,2	32,4	26,4	24,0	266,4
1-3	58,8	34,8	30,0	28,8	247,2
2-3	50,4	28,8	30,0	32,4	294,0
2-5	63,6	30,0	24,0	34,8	270,0
2-4	67,2	28,8	28,8	34,8	312,0
3-4	58,8	32,4	19,2	31,2	278,4
3-6	48,0	25,2	30,0	24,0	325,2
4-5	61,2	36,0	26,4	34,8	357,6
4-6	62,4	31,2	19,2	32,4	270,0
5-7	69,6	27,6	30,0	33,6	308,4
6-8	55,2	26,4	18,0	30,0	296,4
4-9	54,0	31,2	27,6	27,6	355,2
7-9	62,4	36,0	19,2	25,2	272,4
8-9	56,4	32,4	18,0	30,0	345,6

Таблица 3

ТЕМПЫ ПРИРОСТА ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

%

Виды автомобилей	Темпы прироста
Грузовые	3
Автобусы	2
Легковые	4

Таблица 4

МАТРИЦА ПЕРЕХОДОВ ИЗ ОДНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ В ДРУГОЕ

Технические состояния	Ia	Iб	II	III кап.	III облегч.	IV кап.	IV облегч.	IV перех.	V облегч.	V перех.
Ia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Iб	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
II	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-
III кап.	4	5	6	-	-	-	-	-	-	-
III облегч.	7	8	9	10	-	-	-	-	-	-
IV кап.	11	12	13	14	15	-	-	-	-	-
IV облегч.	11	12	13	14	15	16	-	-	-	-
IV переходн.	11	12	13	14	15	16	17	-	-	-
V облегч.	11	12	13	14	15	16	17	18	-	-
V переходн.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	-
естественное	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Таблица 5

ОБЪЕМЫ ИНВЕСТИЦИЙ В ХОЗЯЙСТВЕННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ НА ДОРОГАХ

Млн. руб.

Связь узлов сети	Шифр мероприятий																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1-2	407	780	373	943	197	67	977	570	197	35	1 170	763	390	228	193	126	108	76	69	65
1-3	346	658	312	795	165	58	824	478	165	29	986	640	328	191	162	105	88	64	57	53
2-3	494	940	446	1 135	236	82	1 177	683	236	41	1 408	914	468	273	232	150	126	91	82	76
2-5	247	470	223	568	118	41	588	341	118	21	704	457	234	137	116	75	63	46	41	38
2-4	988	1 881	893	2 271	472	165	2 353	1 365	472	82	2 817	1 829	936	546	464	299	251	182	164	152
3-4	939	1 787	848	2 157	449	156	2 235	1 297	449	78	2 676	1 737	889	519	440	284	239	173	156	144
3-6	445	846	402	1 022	213	74	1 059	614	213	37	1 268	823	421	246	209	135	113	82	74	68
4-5	494	940	446	1 135	236	82	1 177	683	236	41	1 408	914	468	273	232	150	126	91	82	76
4-6	611	1 170	559	1 414	296	101	1 466	855	296	52	1 755	1 144	585	341	289	189	163	114	104	98
5-7	642	1 222	580	1 476	307	107	1 529	887	307	54	1 831	1 189	608	355	301	194	163	118	106	99
6-8	889	1 693	803	2 044	425	148	2 118	1 229	425	74	2 535	1 646	842	491	417	269	226	164	147	137
4-9	1482	2 821	1 339	3 406	709	247	3 530	2 048	709	124	4 225	2 743	1404	819	696	449	377	273	246	228
7-9	741	1 411	670	1 703	354	124	1 765	1 024	354	62	2 113	1 372	702	410	348	224	189	137	123	114
8-9	593	1 128	536	1 362	283	99	1 412	819	283	49	1 690	1 097	562	328	278	179	151	109	98	91

РЕЦЕНЗИЯ

Статья посвящена системному анализу принципов моделирования и оптимизации параметров информационной технологии решения задач развития магистральных сетей (транспортных, коммуникационных и др.) с нелинейными характеристиками в условиях диверсификации источников финансирования. Разработки такой информационной технологии продолжают оставаться актуальными для нашей страны как с позиций оптимизации развития сетевых инфраструктурных подсистем, так и с позиций выбора наиболее эффективных инвестиционных проектов для условий нестационарной российской экономики. Заметим, что проблематика, связанная с нелинейными сетевыми транспортными задачами, составляет предмет серьезного интереса авторов статьи в течение нескольких десятков лет (начиная от условий централизованно управляемой экономики), а результаты исследований по созданию информационной технологии применительно к условиям реформируемой экономики (их первого этапа) были опубликованы в журнале «Аудит и финансовый анализ» в 2004 г.

В данной статье в развитие полученных ранее авторским коллективом результатов представлены:

- основные методологические подходы к решению задачи синтеза сложных сетевых структур нестационарной российской экономики;
- содержательное и формальное описание модифицированных моделей оптимизации динамических нелинейных сетевых транспортных задач с учетом особенностей критериев и ресурсных ограничений;
- декомпозиционные алгоритмы оптимизации (с элементами имитационного моделирования) многоэкстремальных частично-целочисленных сетевых задач большой размерности;
- разработки по компьютерному обеспечению решения задач развития сети в уточненной постановке.

Тестирование экспериментального программного комплекса проведено применительно к сети автомобильных дорог; изложение результатов реализации вычислительных схем сопровождается иллюстративными примерами вариантов расчетов основных параметров сетевых инвестиционного проектирования с таблицами, графиками и схемами.

Полученные результаты по созданию информационной технологии синтеза больших транспортных сетей, по моему мнению, соответствуют достигнутому уровню наиболее продвинутых современных разработок в рассматриваемой области. Они обеспечивают учет специфики отечественных инфраструктурных подсистем в условиях нестационарной российской экономики при формировании эффективных управленческих решений по распределению потоков по сетям и оптимизации их развития. Подобные результаты применительно к магистральным транспортным сетям, с достаточно адекватными в содержательном плане реальным объектам целевой функции и ограничениями (с включением стоимостных оценок затрат и результатов), насколько мне известно, отсутствуют. Новыми также представляются методические подходы к формированию ряда параметров, включаемых в модифицированные алгоритмы поиска эффективных вариантов развития транспортных сетей:

- характеристик спроса в виде шахматной таблицы корреспонденций;
- оценок внутранный транспортных эффектов через анализ межотраслевых взаимодействий;
- затратных характеристик в виде нелинейных зависимостей издержек от загрузки дуг одно- или многопродуктовыми потоками на разных иерархических уровнях магистральной сети).

В качестве замечаний можно указать следующие.

1. В постановке задачи в качестве основного критерия указана максимизация общественного эффекта. Неясно, насколько адекватной можно считать такую постановку, когда в процессе развития сети могут принимать участие частные инвесторы. Учет их интересов (скорее всего, не совпадающих с общественными) следует предусмотреть в будущем при расширении постановки задачи, принимая во внимание, что в Методических рекомендациях по оценке эффективности инвестиционных проектов предусмотрено такое согласование (в рамках специальных договоров относительно параметров проекта). Также неясно, почему при данной постановке задачи указанный в Методических рекомендациях принцип использования общественных (экономических) цен для расчетов по проекту притоков и оттоков, связанных с развитием дорог, не распространяется на оценки притоков и оттоков, связанных с потребителями, и предлагается считать эти составляющие в коммерческих ценах.
2. Переход к модифицированным моделям и алгоритмам выбора наиболее эффективных вариантов развития сети представляется вполне оправданным, поскольку в процессе оптимизации необходимо учитывать особенности схем финансирования в российской экономике и др. факторы нестационарности. Вместе с тем, далеко не все используемые в работе эвристические приемы могут гарантировать нахождение решения, достаточно близкого к оптимальному, что требует в каждом отдельном случае дополнительных обоснований, а также проведения большого количества вари-

антных расчетов при различных параметрах вычислительных схем.

3. Методология, принципы, модели и методы синтеза сложных сетевых структур, положенные авторами в основу предлагаемой информационной технологии, предназначены для оптимизации сетей различной природы. Однако, их реализация для современных российских условий пока исследована лишь применительно к сетям автомобильных дорог. Представляется весьма полезным и интересным – в дальнейших исследованиях авторов по рассматриваемой проблематике – изучение особенностей моделей, алгоритмов и вычислительных схем для оптимизации развития магистральных сетей других видов транспорта (прежде всего, железнодорожного и трубопроводного транспорта в рамках таких естественно-монопольных корпораций, как ОАО «РЖД», «Газпром»), электроэнергетики, телекоммуникационных систем, банковских и финансовых систем и т.п.

В целом, считаю, что авторам удалось существенно продвинуться в разработке информационной технологии синтеза сложных сетевых структур, не только получить весьма интересные теоретические и практические результаты, но и представить их в удобной для восприятия форме, так что целесообразность опубликования данной статьи в журнале «Аудит и финансовый анализ» не вызывает сомнения.

Костюк В.Н., д.э.н., профессор, г.н.с., института системного анализа РАН

3.4. INFORMATION TECHNOLOGY OF SYNTHESIS OF THE DIFFICULT NETWORK STRUCTURES OF NONSTATIONARY RUSSIAN ECONOMY: MODELS, ALGORITHMS, PROGRAM IMPLEMENTATION

Livshits Veniamin Naumovich – Doctor Ph. (Economics), Professor, Chief of Department, Institute for Systems Analysis Russian Academy of Sciences;

Pozamantir Elmar Ilyich – Doctor Ph., Professor, Institute for Systems Analysis Russian Academy of Sciences;

Belousova Nataliya Ivanovna – Doctor Ph. (Economics), Institute for Systems Analysis Russian Academy of Sciences;

Bushansky Sergey Petrovich – Doctor Ph. (Economics), Central Economics & Mathematics Institute Russian Academy of Sciences;

Vasilyeva Elena Mihailovna – Doctor Ph. (Economics), Institute for Systems Analysis Russian Academy of Sciences

In order to develop methodological and methodic approaches that have been elaborated by the authors of the project methods of forming information technology for synthesis of complex nonlinear networks have been worked out. The methods and techniques concern optimization of nonlinear network transport problem of large dimension with some local extremes. The main statements in the sphere of modeling methodology have been formed, first of all, principles for synthesis of nonlinear network structures, accounting conditions of financing their development under transit economy of Russia. Some modified models of optimization of dynamic nonlinear network multiproduct transport problems (with discrete-continuous variables) have been worked out taking into account peculiarities of criteria and resource subjects – schemes of financing the nets' development – in terms of transit Russian economy. Some modified decomposition algorithms have been elaborated (with elements of simulation) for op-

timization of nonlinear network transportation problems. Some models have been worked out on evaluation of the parameters included into the suggested modified algorithms of searching for effective variants of transport networks' development. The models deal with evaluation of demand characteristics through correspondences table, assessments of non-transport effects (externalities) through input-output model, cost determinants in terms of nonlinear functions depending on loads of network links with multiproduct flows at different hierarchical levels of a long-distance network. The requirements to computer software providing optimization of network development's problems have been proposed according to modified models and algorithms. The main blocks of experimental software complex have been worked out, as well as testing under generalized parameters' assessments has been fulfilled concerning road networks.