

### 3.8. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕТЕРМИНАНТ ЕСТЕСТВЕННО-МОНОПОЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ ИХ РАЗВИТИИ

Лившиц В.Н., д.э.н., профессор, засл. деят. науки РФ, зав. лаб. Института системного анализа Российской Академии наук (ИСА РАН);

Белоусова Н.И., д.э.н., ведущий научный сотрудник ИСА РАН;

Бушанский С.П., к.э.н., старший научный сотрудник Центрального экономико-математического института Российской Академии наук (ЦЭМИ РАН);

Васильева Е.М., д.э.н., ведущий научный сотрудник ИСА РАН;

Гук С.Н., аспирант ИСА РАН

Рассматривается задача оценки эффективности перевозок по естественно-монопольной транспортной сети с включением технологических детерминант (экономии от масштаба и структуры); вводится сетевая трактовка субаддитивности. При моделировании агрегированной функции издержек в условиях растущего спроса на перевозки используется создаваемая информационная технологии синтеза сложных сетевых структур. Для фрагмента реальной сети – при оптимизации ее развития – приводятся результаты серии экспериментальных расчетов.

#### ВВЕДЕНИЕ

В данной работе речь идет о моделировании сетевых инфраструктурных подсистем, которое базируется на представлениях теории естественной монополии, методах оптимизации нелинейных сетевых транспортных задач и инвестиционного проектирования. Предлагаемые модели существенно расширяют возможности аналитического инструментария, применяемого при обосновании структурных реформ в сфере естественной монополии и ориентированы на получение специальных оценок эффективности проводимых преобразований различных сетевых подсистем (магистрального железнодорожного транспорта, внегородской сети автомобильных дорог и т.п.).

В работе рассматриваются теоретические и расчетные (применительно к фрагменту реальной сети) модели таких специальных индикаторов эффективности, как экономия от масштаба, экономия от структуры, индикаторы их влияния на интегральные показатели эффективности инвестиционных проектов развития сети (NPV). Эти индикаторы в значительной мере ориентированы на сопоставление динамики затрат и результатов, связанных с освоением перевозок по транспортным сетям заданной конфигурации (в том числе, работающих в режимах перегруженности). Они позволяют (при определенных предпосылках) оценивать эффекты синергетического характера, проявляющиеся в дополнительной экономии совокупных издержек, присущей естественным монополиям и обусловленные особым, оптимальным, способом организации (самоорганизации) перевозок.

При моделировании указанных специальных оценок эффективности сетевой подсистемы и проведении компьютерных экспериментов основное внимание уделяется формированию соответствующей функции издержек, и в этом смысле настоящая статья представляет непосредственное продолжение работ [5, 2, 3, 4]. Как известно, одна из наиболее трудных проблем прикладного моделирования функций издержек (помимо выбора функциональных форм при эконометрическом моделировании) – обеспечение исходной информацией, в наибольшей мере отвечающей гипотезам, заложенным в базовые модели теории естественной монополии. Прежде всего имеется ввиду включение в расчеты затратных характеристик сетевых технологий перевозок, в достаточной мере приближенных к их минимальным значениям. Такие характеристики не являются наблюдаемыми, и их требуется специально моде-

лировать. В данной работе в качестве генератора ненаблюдаемых данных используются оптимизационные модели распределения потоков и развития транспортной сети с нелинейными характеристиками, которые являются ключевыми в создаваемой в Институте системного анализа Российской Академии наук (ИСА РАН) и Центральном экономико-математическом институте (ЦЭМИ) РАН информационной технологии синтеза сложных сетевых структур (IT-S) [2, 5].

Соответственно, принят следующий порядок изложения материала.

- В первом разделе приводятся ключевые элементы нормативной теории естественной монополии в сочетании с оптимизационными подходами к нелинейным сетевым транспортным задачам, а также даются краткие сведения об информационной технологии синтеза сложных сетевых структур, принципах ее построения и основных базовых моделях.
- Во втором разделе представлены важнейшие моменты реализации IT-S применительно к межгородской сети автодорог, выбранной для экспериментальных расчетов, и описания так называемого инженерного подхода к компьютерному моделированию агрегированной общесетевой функции издержек с использованием IT-S в качестве генератора ненаблюдаемых данных.
- Третий раздел посвящен анализу результатов компьютерных экспериментов по автодорожной сети заданной топологии, иллюстрирующих способы моделирования технологических детерминант и возможности их использования для выявления естественно-монопольных свойств транспортных сетей.

### 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНОК ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗВИТИЯ СЕТЕВЫХ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ПОДСИСТЕМ С УЧЕТОМ ЕСТЕСТВЕННО-МОНОПОЛЬНЫХ СВОЙСТВ

Под учетом естественно-монопольных свойств имеется в виду учет технологических особенностей, определяющих особый характер зависимости издержек от объемов производимой продукции, масштабов расходуемых ресурсов и цен на них, что, согласно теории естественной монополии [12-17], содержательно означает наличие эффекта синергии в виде экономии издержек, а формально выражается через свойство субаддитивности функции издержек  $C(y)$ <sup>1</sup>. В качестве проверки необходимого условия субаддитивности предусматривается оценка экономии от структуры (технологического детерминанта  $SC$ ), т.е. экономии – при положительном значении  $SC$  – от расширения ассортимента выпуска, совместного производства взаимодополняемых видов продукции и т.п.<sup>2</sup> Соответственно, о целесообразности (или нецелесообразности) осуществления намечаемых мероприятий по из-

<sup>1</sup> Функция совокупных затрат в отрасли  $C(\bar{y})$  называется строго субаддитивной для вектора выпуска  $\bar{y}$ , если  $C(\bar{y}) < \sum_{i=1}^k C(\bar{y}^i)$  при любых допустимых наборах выпусков  $\bar{y}^1, \bar{y}^2, \dots, \bar{y}^k$ , таких, что  $\sum_{i=1}^k \bar{y}^i = \bar{y}$ ,  $\bar{y}^i \geq 0$ , причем существуют как минимум два положительных значения  $\bar{y}^i > 0$ .

<sup>2</sup>  $SC(\bar{y}_M) = \frac{\sum_i C(\bar{y}_{T_i}) - C(\bar{y}_M)}{C(\bar{y}_M)}$  определяется для любого разбиения  $P$  подмножества  $M$  выпускаемых в отрасли видов продуктов,  $M \subseteq N$ , таких что  $P = \{T_1, \dots, T_m\}$ , где  $\cup T_i = M$ ,  $T_i \cap T_j = \emptyset$  для  $i \neq j, T_i \neq 0, m > 1$ .



Задача оптимизации развития сети представляется в виде итеративного синтеза двух ключевых задач.

1. Распределение или/и самоорганизация потоков (в нормативных, дескриптивных или смешанных системах) по существующей или проектируемой сети.
2. Проектирование структуры сети, ее топологии, выбора наиболее рациональных технических состояний ее звеньев. При этом имеет место нелинейный и, как правило, невыпуклый вид зависимостей, используемых в целевой функции, целочисленность ряда переменных, их высокая размерность, рассмотрение задачи в динамике и др.

Соответственно, одна из важнейших базовых моделей оптимизации развития сети (в детерминированной постановке) для отдельного статического сечения (индекс  $t$  для упрощения опущен) имеет вид:

$$\min_{x, \eta} F(X, \eta) = \min_{x, \eta} \sum_{u, m} f_{um}(x_u) \eta_{um};$$

$$S_j X = b_j;$$

$$\eta_{um} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \text{ для всех } u \text{ и } m;$$

$$\sum_{m=0}^{M_u} \eta_{um} = 1;$$

$$x_u \left( 1 - \sum_{m=1}^{M_u} \eta_{um} \right) = 0, \quad x_u \geq 0 \text{ для всех } u;$$

$$\sum_{u, m} r_{um} \eta_{um} \leq R_j.$$

Данная модель допускает сочетание поиска нормативного распределения потоков  $X$  и варианта развития сети  $\eta$  при фиксированных потоках на сети, задаваемой матрицей инцидентий  $S_j$  – связности узлов сети в соответствии с ее топологией – по критерию «минимум суммарных по звеньям сети совокупных издержек  $F(X, \eta)$ » при ограничениях на спрос  $b_j$  и объем инвестиционных ресурсов  $R_j$ .

Основой решения задачи развития сети можно считать метод статических сечений и алгоритм оптимизации по группам переменных [8-11, 18]. Для каждого статического сечения декомпозиционный подход состоит в следующем:

- на первом этапе оптимизируются объемы грузо- и пассажиропотоков при фиксированных уровнях технического состояния звеньев сети (методом пошагового распределения потоков решается нелинейная транспортная задача);
- на втором этапе – организуется поиск наиболее выгодных технических состояний звеньев при выбранных загрузках с учетом ресурсных ограничений.

Важнейшие принципы моделирования развития сети, на которых – для условий переходной российской экономики – базируется создаваемая в рамках ИСА РАН и ЦЭМИ РАН информационная технология синтеза сложных сетевых структур, могут быть сформулированы в виде следующих положений:

- системный подход при моделировании, отражение в моделях оценки эффективности наличия нескольких участников (государство, частные инвесторы, население и др.) с разными интересами;
- включение моделей формирования допустимых решений и сравнительной оценки их качества (эффективности) с учетом специфики сетей различной природы и синергетических естественно-монопольных эффектов (внутритранспортных и внетранспортных эффектов);
- многовариантный анализ альтернатив инвестиционного изменения сети и распределения нагрузки между ее эле-

ментами, использование иерархических нелинейных моделей математического программирования и систем имитационного моделирования;

- введение в модели эндогенных переменных смешанного типа – векторов дискретных и непрерывных оптимизируемых переменных высокой размерности для учета дискретности и динамичности развития элементов сети при изменяющихся их нагрузках;
- формирование различных сценариев и оценок их эффективности для условий нестационарной экономики.

Основные направления, принятые при создании IT-S, по которым рассматриваются модификации базовой модели, могут быть представлены в следующем виде:

- изменения характеристик спроса  $b_j$ , включение эндогенных шахматных таблиц корреспонденций;
- использование различных видов критериальных функций  $F(X, \eta)$ , причем не только для оценки затрат, но и – индуцированных развитием сети результатов, интегрального эффекта типа чистого дисконтированного дохода ( $NPV$ );
- диверсификация затратных характеристик  $f_{um}(x_u)$  (на разных уровнях иерархии сети и этапах оптимизации, используемых для оценки затрат при различных распределениях потоков – нормативных, дескриптивных, смешанных, т.е. с элементами самоорганизации и др.);
- модификация ресурсных ограничений, отвечающих условиям нестационарной российской экономики, использование как экзогенных, так и эндогенных  $R_j$ ;
- учет различных источников (государственных, частных, международных и др.) и условий финансирования, формулируемых каждым инвестором.

Для оценки эффективности мероприятий по структурному регулированию сетевых подсистем естественных монополий предлагается ввести процедуры выявления степени перегруженности проектируемой транспортной сети через проверку в рамках IT-S свойства субаддитивности агрегированной общесетевой функции издержек. В случае подтверждения гипотезы о перегруженности сети (когда субаддитивность нарушена), о наличии узких мест на маршрутах следования корреспонденций, исчерпаниии пропускных способностей отдельных звеньев, включаются механизмы принятия решений по структурному регулированию, связанные с необходимостью усиления разветвленности сети, образованием дополнительных замкнутых контуров и даже дублированием отдельных, наиболее перегруженных участков сети или – с передачей части грузо- и пассажиропотоков (в пределах выявленных объемов спроса, включая индуцированный спрос, обусловленный предполагаемым развитием сети) на другие, конкурирующие виды транспорта.

В рамках принятой концепции потребуются введение дополнительного этапа оптимизации в алгоритмы решения задачи развития сети, содержание которого составляют специальные процедуры идентификации агрегированной, общесетевой функции издержек, проведение тестов различных типов на подтверждение или отрицание факта наличия естественной монополии. Целесообразность введения такого дополнительного этапа в процедуру оптимизации развития сети обусловлена также и 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 невозмещаемых полностью издержек) способны изменять характер нелинейности агрегированной функции издержек, область ее субаддитивности.

Соответственно, при отрицательном результате тестирования, выявляющем нарушение свойства субаддитивности, необходима корректировка параметров исходной информации [7], прежде всего, стоимостных характеристик элементов сети, характеристик топологии сети и схем финансирования, которые, наряду с параметрами вычислительных процедур, обуславливают качество получаемых решений по оптимизации развития сети.

## 2. ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ СЕТЕВЫХ СТРУКТУР (IT-S) – ГЕНЕРАТОР ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АГРЕГИРОВАННОЙ ОБЩЕСЕТЕВОЙ ФУНКЦИИ ИЗДЕРЖЕК

В задачах оптимизации развития транспортной сети нередко топология считается заданной, а новые звенья в начальном состоянии характеризуются малой величиной пропускной способности. За рамками моделирования остаются вопросы необходимости существенного дополнения конфигурации, дублирования отдельных фрагментов сети, построения альтернативных сетей и т.п. – и все это из-за ограниченности располагаемой информации о новых вариантах топологии. Например, для определения эффективности развития альтернативных видов пассажирского транспорта в мегаполисе должно быть предварительно проведено множество проектных изысканий, весьма затратных как по времени, так и в финансовом отношении. Соответственно, кроме отыскания оптимального набора проектов из множества заранее определенных допустимых вариантов, возникает в практическом приложении не менее важная задача: при каких объемах инвестиций и при каком уровне спроса полученные решения могут на самом деле оказаться неоптимальными, если бы можно было формально учесть все возможные варианты начертания сети. Одним из подходов к решению этой трудно формализуемой задачи является анализ свойств моделируемой сети как естественной монополии.

Диагностику естественно-монопольного эффекта синергии можно проводить, базируясь на моделировании агрегированной общесетевой функции издержек (и соответствующих технологических детерминант) с использованием IT-S в качестве генератора ненаблюдаемых данных. С целью анализа свойств естественной монополии и выявления областей, в которых агрегированная общесетевая функция издержек отвечает условию субаддитивности, разработаны сценарные подходы к генерации статистических выборок данных в зависимости от различных характеристик сети и внешних условий. В каждом сценарии выполняется поиск оптимального развития сети при разных уровнях исходного спроса на поездки.

При таком подходе к моделированию, который называется инженерным (см., например, [13]), каждая статистическая выборка данных имитируется результатами расчетов для определенного сценария по тем или иным принятым процедурам оптимизации. В настоящей работе характеристики оптимизируемой сетевой технологии определяются по алгоритмам решения нелинейных транспортных задач типа пошагового рас-

пределения потоков. Как следствие, общесетевые издержки складываются из транспортных затрат по кратчайшим маршрутам (с учетом изменяющихся предельных издержек для каждого звена сети), причем варьируются ограничения на бюджет инвестиций; объемы спроса на перевозки и тонно-километровой работы по кратчайшим маршрутам; значения уровней цен на ресурсы. Это позволяет оценивать эффективность сетевого проекта (в виде *NPV*) для ситуаций, когда сеть является естественной монополией, и ситуаций, когда естественно-монопольные свойства исчезают.

Остановимся более детально на важнейших моментах реализации IT-S применительно к межгородской сети автодорог, выбранной для компьютерных экспериментов.

Согласно приведенным выше принципам построения IT-S, применительно к магистральным сетям автомобильных дорог, как и в общем случае, центральной моделью IT-S является сетевая модель для решения задачи отыскания 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. Такой критерий выбора оптимального варианта развития сети как инвестиционного дорожного проекта формируется из:

- выгод от увеличения количества поездок в сравнении с исходным состоянием транспортной сети  $V(t)$ ;
- изменения затрат на ремонт и содержание дорог  $\Delta\mathcal{E}(t)$ ;
- затрат на строительные работы  $I(t)$ ;
- изменения транспортных затрат  $\Delta F(t)$ , и может быть представлен в виде:

$$NPV = \sum_{t=1, \dots, T} \frac{1}{(1+E)^t} [V(t) - \Delta\mathcal{E}(t) - I(t) - \Delta F(t)] \rightarrow \max,$$

где

$E$  – ставка дисконта;

$T$  – количество расчетных периодов.

Система ограничений в этой задаче может быть представлена следующим образом:

- заданы первоначальные объемы и структура перевозок; известны начальное техническое состояние сети и все технико-экономические характеристики ее элементов (необходимые для определения в динамике издержек на транспортировку и мероприятия по реконструкции);
- заданы ограничения финансового характера (экзогенные объемы инвестиций, выделяемых на реконструкцию сети и новое строительство, привлеченные средства от организации платных дорог и функционирования придорожной инфраструктуры, поступления в дорожный фонд, рыночные требования эффективности, формулируемые каждым инвестором и др.).

Требуется определить:

- какие и в каком году изменения целесообразно осуществить в техническом состоянии звеньев сети;
- 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.

В рамках IT-S для реализации указанного подхода к получению необходимой исходной информации был разработан программный комплекс взаимодействия модели генерации данных и сетевой модели. Программный комплекс состоит из диалоговой системы, программы генерации задач с разным уровнем спроса

на услуги монополии и сетевой модели. В диалоговом режиме пользователь задает конфигурацию сети, характеристики отдельных ее участков, набор допустимых инвестиционных проектов, правила формирования бюджета инвестиций, параметры, определяющие особенности используемых расчетных алгоритмов и диапазон значений спроса на услуги сети.

В соответствии с заданными параметрами программа последовательно формирует оптимизационные сетевые задачи. В ходе решения каждой из этих задач выполняется расчет совокупных сетевых затрат, соответствующих оптимальному функционированию системы при заданном уровне спроса (для исходного состояния сети) и ограничениях на бюджет инвестиций.

Каждый вариант расчета позволяет построить (таблично или эконометрически) зависимость совокупных сетевых затрат по оптимальным технологиям от объема производства (применительно к используемой сетевой модели – от суммарного количества поездок по всем корреспонденциям сети) при заданных экзогенных параметрах и конфигурации сети. Многовариантные расчеты проводятся при изменении экзогенных параметров для определения диапазона исследуемых параметров, при которых сеть характеризуется субаддитивностью издержек.

При проведении компьютерных экспериментов построение статистических выборок данных, используемых для анализа субаддитивности издержек естественных монополий, обеспечивается набором расчетов по оптимизационной сетевой модели при различных уровнях общего для всей сети спроса на перевозки, изменяемого в заданном диапазоне. При этом уровень спроса для исходной сети определяется, как доля от заданного максимального суммарного объема перевозок всех корреспонденций. Общая схема генерации данных приводится на рис. 1.

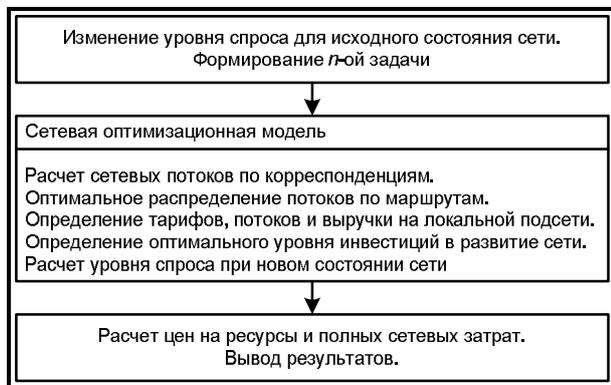


Рис. 1. Схема использования IT-S для генерации ненаблюдаемых исходных данных

В результате каждого расчета максимизируется общественный чистый дисконтированный доход *NPV* от развития сети (увеличения пропускной способности и улучшения качества покрытия) и обслуживания транспортных потоков (оптимизации распределения по маршрутам) за весь расчетный период.

Суммарные сетевые затраты для каждого расчетного года *t*, *Z(t)* включают транспортные расходы на выполнение объемов перевозок, заданных для каждой корреспонденции, и инвестиций в развитие сети (улучшение технических состояний звена сети) в экономических ценах:

$$Z(t) = \sum_{\lambda} (Z_{\lambda}^{mp} + I_{\lambda}),$$

где

$Z_{\lambda}^{mp}$  – суммарные транспортные расходы на дороге  $\lambda$ ,  $I_{\lambda}$  – инвестиции в улучшение технического состояния дороги  $\lambda$ .

Выгоды от дополнительных поездок в результате развития сети, которые оценивались по формуле:

$$\sum_{l,s,h} \Delta N_{lsh}(z_{lsh}(t) + \frac{1}{2} \Delta z_{lsh}(t)),$$

где

$\Delta N_{lsh}(t)$  – дополнительные поездки корреспонденции *ls* видом автомобилей *h* в году *t*;

$z_{lsh}(t)$  – средние затраты на 1 поездку корреспонденции *ls* видом автомобилей *h* для нового состояния сети («с проектом»);

$\Delta z_{lsh}(t)$  – сокращение затрат на одну поездку в условиях проекта в сравнении с исходной сетью («без проекта»)<sup>5</sup>.

Сетевые транспортные потоки разделены по видам, каждый из которых характеризуется функцией удельных транспортных затрат. Удельные транспортные затраты зависят от протяженности звена и времени обслуживания потоков на звене. Время обслуживания включает время движения и время ожидания обслуживания, оба этих компонента нелинейно зависят от уровня загрузки (в расчетах эта зависимость аппроксимирована кусочно-линейными функциями). В стоимостном выражении удельные транспортные затраты разделены на четыре вида:

- эксплуатационные затраты, зависящие от протяженности звена;
- эксплуатационные затраты, зависящие от времени обслуживания на звене;
- заработная плата транспортных работников в час;
- стоимостные затраты времени пассажиров.

Эксплуатационные затраты обычно включают расходы на топливо, прочие горюче-смазочные материалы, шины, техобслуживание и ремонт и приобретение автомобилей (помимо реновации еще учитываются и расходы на приобретение новых автомобилей, обусловленные увеличением суммарного пробега). Предполагалось, что цена этих используемых при перевозках ресурсов и услуг не зависит от спроса на них.

В основе стоимостных затрат времени пассажиров и отчасти водителей лежат субъективные оценки своего используемого времени, поэтому повышенные затраты времени в некомфортных условиях (заторы, ожидания и проч.) имеют более высокую цену за используемую единицу ресурса. Кроме того, в перегруженной сети или сети с плохой конфигурацией формируется значительный отложенный спрос на пассажирские поездки. Это ведет к удорожанию единицы затрачиваемого транспортного времени, лимит которого ограничен, и в структуре поездок большую долю занимают поездки, субъективно оцениваемые пассажирами дороже. Например, в затрудненных транспортных условиях обычно увеличивается доля поездок с работы –

<sup>5</sup> Иначе говоря, возможные затраты дополнительных поездок для каждой корреспонденции в условиях «без проекта» оценивались как средняя арифметическая из затрат «с проектом» и затрат «без проекта».

на работу. Таким образом, спрос на перевозки и состояние сети влияет на цену ресурса «затраты времени». В расчетах это влияние отражено тем, что цена за единицу затрачиваемого времени пассажирами и водителями повышается на перегруженных звеньях сети.

Объемы отдельной корреспонденции определяются в зависимости от изменения затрат на перевозки между начальным и конечным пунктами поездки по формуле:

$$A_{lsh} = A_{lh} \frac{A_{sh}}{(z_{lsh})^r} / \sum_s \frac{A_{sh}}{(z_{lsh})^r},$$

где

$A_{lsh}$  – объемы корреспонденции  $I_s$  (количество поездок автомобилей вида  $h$  из начального пункта  $l$  в конечный пункт  $s$ );

$A_{lh}$  – заданные объемы исходящих поездок вида  $h$  из пункта  $l$ ;

$r$  – коэффициент гравитационной зависимости.

Для каждого уровня спроса определяются показатели по сети в целом:

- 1) зарплата водителей, тыс. руб. в час;
- 2) стоимостные затраты времени пассажиров, тыс. руб. в час;
- 3) транспортные эксплуатационные расходы, тыс. руб. в час;
- 4) транспортные эксплуатационные расходы, тыс. руб. на км;
- 5) суммарные транспортные затраты по сети, тыс. руб.;
- 6) суммарный объем корреспонденций, количество поездок в год;
- 7) грузооборот, т-км в год;
- 8) пассажирооборот, пасс-км в год;
- 9) стоимость инвестированного капитала, тыс. руб. в год;
- 10) суммарные сетевые затраты по оптимальным технологиям, тыс. руб. в год;
- 11) чистые дисконтированные выгоды  $NPV$ , тыс. руб. в год;
- 12) стоимость условно-постоянного капитала, тыс. руб.;
- 13) интенсивность движения на платных дорогах, физ. авт. в сутки;
- 14) выручка от платных дорог, тыс. руб. в год.

Транспортные затраты по компонентам (пп. 1-4) рассчитываются как отношение суммарных затрат соответствующего компонента по всей сети (для всех звеньев и всех видов транспорта) к суммарным объемам корреспонденций. Из суммы компонент транспортных затрат по всей сети складываются суммарные транспортные затраты (п. 5).

Суммарный объем корреспонденций исходной сети для каждого варианта расчета является заданной величиной и не зависит от изменения маршрутов или набора технических состояний звеньев сети, показатели грузооборота и пассажирооборота рассчитываются и суммируются по звеньям и связаны с выбором маршрутов, поскольку использование тех или иных маршрутов влияет на уровень интенсивности движения на звеньях (пп. 6-8).

Суммарная стоимость инвестированного капитала (п. 9) определяется как произведение освоенных за весь расчетный период инвестиций и нормы дисконта.

Суммарные сетевые затраты по оптимальным технологиям (п. 10) складываются из суммарных транспортных затрат по предельным затратам кратчайших маршрутов и стоимости инвестированного капитала.

Чистые дисконтированные выгоды за период (п. 11), помимо инвестиций, включают разностные транспортные затраты (суммарные транспортные затраты без проекта минус суммарные транспортные затраты с проектом) и доходы от дополнительных поездок.

Стоимость условно-постоянного капитала (п. 12) рассчитывается как произведение нормы дисконта и инвестиций, вложенных на создание сети с исходными (на начало расчетного периода) техническими состояниями звеньев.

Если транспортная сеть включает платные дороги, результаты расчетов включают суммарную интенсивность на платных звеньях и суммарную выручку от взимания платы за проезд (пп. 13, 14).

Компьютерные эксперименты, которые были проведены для сетевой подсистемы в виде представленного фрагмента автодорожной сети из 45 звеньев и 35 узлов (рис. 2) и случая транспортировки одного обобщенного вида груза, позволили исследовать влияние ограничений по объему инвестиций на область субаддитивности для однопродуктовой агрегированной общесетевой функции издержек (от суммарного объема корреспонденций); была подтверждена гипотеза о расширении области субаддитивности при смягчении ресурсных ограничений, увеличении объемов инвестиций в развитие сети.

Детальный анализ результатов расчетов представлен в следующем разделе.

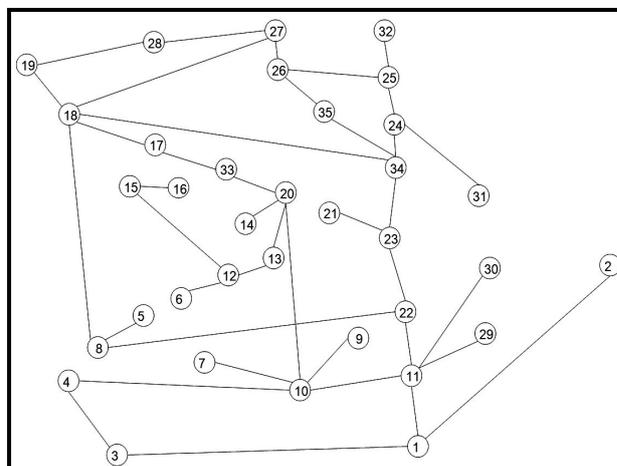


Рис. 2. Конфигурация анализируемой сети

### 3. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО АНАЛИЗУ ЕСТЕСТВЕННО-МОНОПОЛЬНЫХ СВОЙСТВ РАЗВИВАЕМОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

В данном разделе рассматриваются результаты компьютерных экспериментов по анализу естественно-монопольных свойств развиваемой транспортной сети на основе реализации изложенного выше инженерного подхода к генерации ненаблюдаемых данных, требуемых для моделирования функций издержек. Сформулируем предварительно, опираясь на положения пп. 1 и 2, перечень исходных предпосылок и условий, которым отвечают проведенные эксперименты.

1. Транспортная сеть представлена фрагментом сети автомобильных дорог Российской Федерации (рис. 2) в виде графа, состоящего из 35 узлов и 45 звеньев общей протяженностью 160 км.
2. В предположении монотонного роста спроса на перевозки для каждого экзогенно заданного фиксированного значения суммарного по сети объема перевозок построено – с использованием информационной технологии синтеза слож-

- ных сетевых структур (IT-S) – значение совокупных издержек, соответствующее оптимальной технологии его освоения. При этом фиксированные значения суммарного по сети объема перевозок находятся в диапазоне, разбитом равномерно на 600 точек, от 0,4 до 231 млн. поездов в год.
3. Агрегированная общесетевая функция издержек (совокупных), на основе которой выявляются естественно-монопольные свойства сети, считается либо заданной таблично – по 600 точкам – как функция от суммарного объема грузовых и пассажирских перевозок – результаты данной серии экспериментов представлены в п. 3.1, либо моделируется эконометрическим способом, и результаты серии таких экспериментов представлены в п. 3.2.
  4. Предполагается, что каждое из указанных 600 значений агрегированной общесетевой функции издержек соответствует статическому сечению в модели развития сети для момента начала эксплуатации сети, которому предшествовал 5-летний период ее развития.
  5. Технология перевозок моделируется в обобщенном смысле – включаются и распределение потоков, и развитие сети, причем рассматривается сеть заданной топологии (без трассировки и строительства новых дорог), а под развитием понимается модернизация существующих звеньев для повышения их пропускной способности (улучшение дорожного покрытия, увеличение числа полос и т.п.).
  6. Модернизация (и/или реконструкция) существующих звеньев сети моделируются в виде потенциального улучшения технических состояний звеньев, что соответствует возможному (с учетом ограничений на объем инвестиций) изменению категорийности дорог от нижней *V* до высшей *I* категории.
  7. При моделировании развития сети рассматриваются два варианта. Первый – многоэтапный (по количеству полос) переход к дорогам с покрытием более высокого качества (называемый более инновационным), когда при развитии (независимо от количества полос) сразу предусматривается строительство дороги с покрытием, соответствующим высшей *I* категории. Второй вариант, в котором предусматривается последовательный (также многоэтапный по количеству полос) переход от дорожного покрытия более низких категорий к нормативам первой категории (вариант, называемый менее инновационным).
  8. Экзогенный спрос представлен в виде однопродуктового агрегата – без учета пространственного фактора; при этом территориальная «привязка» спроса осуществляется в процессе преобразования суммарного объема перевозок в соответствующую шахматную таблицу корреспонденций по транспортной сети в рамках определенной территории, что предусмотрено в IT-S, в комплекс моделей которой для этой цели включена специальная вероятностно-гравитационная модель.
  9. Цены на ресурсы – для упрощения – считаются постоянными, в том числе учтена инфляция издержек (путем дефлирования с использованием общего индекса инфляции – дефлятора валового внутреннего продукта (ВВП) – без учета структурной инфляции), что позволяет моделировать агрегированную общесетевую функцию издержек как функцию только от объемов выпуска продукции, причем однопродуктовую (а не многопродуктовую).
  10. Агрегированная общесетевая функция издержек моделируется для ряда сценариев развития сети, различающихся величиной ограничений на суммарный объем инвестиций, включая граничные сценарии, в которых рассматривается моделирование развития сети как без ограничений на инвестиции, так и при отсутствии инвестиций, т.е. формально – без развития сети.
  11. В расчетах для первого варианта развития сети, который в тексте обозначается как «более инновационный вариант», требующий, соответственно, большего объема инвестиций, предусмотрено 10 сценариев. Эта совокупность сценариев охватывает от сценария нулевого развития «без инвестиций» до сценария наибольшего развития «без ограничения на инвестиции» (в том числе и при наибольшем значении ограничений на суммарный объем инвестиций в размере

24 млрд. руб.). В расчетах 2-го варианта развития сети (менее инновационного) предусмотрено девять сценариев с наибольшим значением ограничений на суммарный объем инвестиций в размере 16 млрд. руб.

12. Относительно суммарного объема инвестиций допускается, что этот объем может быть использован на развитие сети в течение 5-летнего периода до начала эксплуатации. Далее, в течение последующих лет, также включаемых в период расчета *NPV* проекта по развитию сети (с учетом постоянной величины дисконта в размере 0,1), предполагается, что сеть будет работать при достигнутом уровне технических состояний ее звеньев.
13. Для анализа естественно-монопольных свойств в рамках нормативной идентификации естественной монополии (т.е. путем проверки соответствующей функции издержек на субаддитивность) используются значения экономии от масштаба *S* и экономии от структуры *SC* или их дискретных аналогов, рассчитанных по всем 600 точкам каждого из рассматриваемых сценариев.

### 3.1. Оценки дискретных аналогов экономии от масштаба и экономии от структуры при табличном задании агрегированной общесетевой функции издержек

#### Оценка экономии от масштаба

Остановимся сначала на результатах расчета такого технологического детерминанта, как *S* – индикатора экономии от масштаба, точнее, его дискретного аналога, рассчитанного по всем 600 точкам каждого из рассматриваемых сценариев. Выбранный технологический детерминант, как известно, строго идентифицирует область субаддитивности в однопродуктовом случае только при значениях  $S > 1$ , допускает область субаддитивности в некотором диапазоне  $S < 1$  (этот диапазон может быть определен однозначно только с использованием технологического детерминанта экономии от структуры – *SC* по его положительному значению), но может служить для оценки эффективности работы сети в терминах изменений затратной эластичности по выпуску.

В табл. 1 и табл. 2 приведены усредненные значения дискретного аналога экономии от масштаба *S* для каждого из выделенных (примерно одинаковых) интервалов монотонного роста суммарного объема перевозок по выбранным сценариям и вариантам развития сети для дорог с покрытием более высокого качества (первый, более инновационный вариант) – табл. 1 и дорог с покрытием обычного качества (второй, менее инновационный вариант) – табл. 2. Усреднение проведено с использованием среднего геометрического для каждого интервала массива расчетных данных, причем согласно определению экономии от масштаба для оценки изменений выпуска и затрат использовались логарифмические шкалы.

Анализ представленных в табл. 1 и табл. 2 результатов показывает, что они могут быть проинтерпретированы следующим образом.

Область оценок *S*, в которой имеют место более высокие значения *S* – превышающие единичное значение, примерно совпадающие с ним или немного меньшие (в пределах 5-10%), наблюдается и для первого, и для второго варианта. Значения в этой области можно отнести к эффективным (или приближенно эффективным), однако размеры ее существенно больше для более инновационного варианта, поэтому остановимся сначала на анализе результатов, представленных в табл. 1.

Таблица 1

**ДИСКРЕТНЫЙ АНАЛОГ ЭКОНОМИИ ОТ МАСШТАБА S ДЛЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ РАЗВИТИЯ АВТОДОРОЖНОЙ СЕТИ ПО ПЕРВОМУ, БОЛЕЕ ИННОВАЦИОННОМУ ВАРИАНТУ**

Интервалы суммарного объема перевозок, млн. поездок в год	Ограничения по инвестициям в развитие сети, млрд. руб.									
	Без огр.	24	16	8	4	2	1	0,5	0,1	0
0,4-20,0	3,93	3,93	3,93	3,93	3,93	3,93	3,93	3,92	3,93	3,92
20,1-39,0	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,35	1,27	0,66	0,69	0,65
39,1-58,0	1,02	1,02	1,02	1,02	1,07	0,69	0,72	0,34	0,34	0,33
58,1-77,0	0,90	0,90	0,90	0,94	0,79	0,59	0,55	0,44	0,44	0,43
77,1-96,0	0,89	0,89	0,89	0,92	0,67	0,62	0,41	0,42	0,43	0,43
96,1-116,0	1,02	1,02	1,02	0,79	0,45	0,29	0,36	0,41	0,40	0,42
116,1-135,0	1,33	1,33	1,06	0,24	0,31	0,32	0,33	0,43	0,43	0,44
135,1-154,0	1,00	1,00	0,92	1,41	0,33	0,37	0,36	0,44	0,45	0,46
154,1-173,0	0,94	0,94	0,66	0,34	0,30	0,79	0,37	0,49	0,47	0,48
173,1-193,0	0,99	0,99	0,45	0,29	0,35	0,37	0,38	0,51	0,51	0,52
193,1-212,0	0,97	0,90	0,46	0,39	0,36	0,39	0,40	0,52	0,53	0,54
212,1-231,0	0,74	0,46	0,20	0,42	0,35	0,39	0,40	0,55	0,55	0,55

Таблица 2

**ДИСКРЕТНЫЙ АНАЛОГ ЭКОНОМИИ ОТ МАСШТАБА S ДЛЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ РАЗВИТИЯ АВТОДОРОЖНОЙ СЕТИ ПО ВТОРОМУ, МЕНЕЕ ИННОВАЦИОННОМУ ВАРИАНТУ**

Интервалы суммарного объема перевозок (млн. поездок в год)	Ограничения по инвестициям в развитие сети, млрд. руб.								
	Без огр.	16	8	4	2	1	0,5	0,1	0
0,4-20,0	3,97	3,97	3,97	3,97	3,97	3,97	3,93	3,97	3,92
20,1-39,0	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	0,71	0,91	0,65
39,1-58,0	1,08	1,08	1,08	1,08	1,11	1,06	0,33	0,57	0,33
58,1-77,0	0,93	0,93	0,93	0,92	0,75	0,44	0,39	0,19	0,43
77,1-96,0	0,88	0,88	0,88	0,78	0,43	0,51	0,45	0,48	0,43
96,1-116,0	1,03	1,03	0,99	0,38	0,40	0,28	0,40	0,43	0,42
116,1-135,0	0,83	0,83	0,37	0,44	0,21	0,24	0,42	0,40	0,44
135,1-154,0	0,76	0,76	0,52	0,30	0,27	0,33	0,45	0,45	0,46
154,1-173,0	0,78	0,67	0,29	0,21	0,73	0,46	0,48	0,44	0,48
173,1-193,0	0,72	0,48	0,29	0,44	0,31	0,34	0,50	0,51	0,52
193,1-212,0	0,70	0,26	0,19	0,26	0,26	0,37	0,54	0,54	0,54
212,1-231,0	0,62	0,80	0,85	0,28	0,51	0,45	0,55	0,55	0,55

Указанным значениям области оценок **S** отвечают практически все элементы столбцов таблицы, соответствующие сценарию «без ограничений на объем инвестиций» и сценарию максимального объема инвестиций – 24 млрд. руб. при выполнении объема перевозок до 212 млн. поездок в год; значительная часть элементов столбца для сценария – 16 млрд. руб. – при выполняемом объеме перевозок не более, чем 193 млн. поездок в год, а также примерно половина столбца расчетных значений **S** для сценария – 8 млрд. руб. – при объеме перевозок не более 96,5 млн. поездок в год.<sup>6</sup> Для других

<sup>6</sup> Исключение составляет значение **S**, превышающее единицу для интервала суммарной загрузки сети 135-154 млн. поездок в год. Опыт специальной корректировки подобных резких, скачкообразных эффектов показывает, что дополнительная обработка в расчетах позволяет сгладить границу зоны эффективности. Эта обработка аналогична процедурам демпфирования, используемым при численной реализации алгоритмов оптимизации нелинейных сетевых транспортных задач, и может рассматриваться как построение

сценариев при уменьшении объема инвестиций соответствующая область по объему спроса резко сжимается (всего 3 значения – до 58 млн. поездок в год при сценарии – 4 млрд. руб., и по 2 значения – до 39 млн. поездок в год при сценариях – 2 и 1 млрд. руб.).

Именно в рассмотренной выше области можно предполагать выполнение естественно-монопольных свойств, сохранение или незначительное нарушение формально-условия субаддитивности агрегированной общесетевой функции издержек. По крайней мере, в данной области можно считать работу развиваемой сети достаточно эффективной в том смысле, как показывает обратная к **S** величина затратной эластичности, что увеличение объема перевозок на 1% сопряжено с меньшим, чем на 1%, или примерно таким же ростом совокупных издержек. Это и позволяет называть такую область «зоной эффективности по **S**».

Подчеркнем, что аналогичным образом выделяемая область дорог с покрытием обычного качества (второй, менее инновационный вариант) – табл. 2, заметно меньше, хотя сохраняет подобную, почти треугольную конфигурацию. При этом значения экономии от масштаба, близкие к единице, практически совпадают в табл. 1 и табл. 2 при загрузке сети до 116 млн. поездок в год для высоких значений объемов инвестиций, выделяемых на развитие сети (или по сценарию «без ограничений...»). Полученные выводы означают, что рост загрузки сети может не приводить к потере естественно-монопольных свойств (свойств синергии), если сеть является хорошо развитой. Другими словами, более высоко развитая сеть, в которую вложено больше инвестиций, возможно, и на создание некоторых резервов пропускной способности, скорее будет обладать растущей экономией от масштаба и оставаться устойчивой естественной монополией. Заметим также, что вне зоны эффективности расчетные значения **S** в табл. 1 и табл. 2 практически совпадают при загрузке сети свыше 116 млн. поездок в год и при незначительных объемах инвестиций (например, для 0,1-0,5). Эти результаты свидетельствуют о заведомо неэффективных режимах работы сети в условиях высокого и растущего спроса в сочетании с недоинвестированием в развитие технической оснащенности ее элементов.

Проведем анализ расчетных данных по строкам и столбцам табл. 1. и табл. 2. В каждой из таблиц в выделенной зоне эффективности по **S**, по крайней мере, в большей ее части, имеет место – по строкам – монотонная зависимость значений **S** от значений объемов инвестиций, когда по сценариям (если их упорядочить по возрастанию выделяемых на развитие сети инвестиций) большим объемам инвестиций соответствуют и более высокие значения **S**. Следовательно, величина затратной эластичности по выпуску (обратная к **S**) снижается с ростом инвестиций в развитие сети, что означает, что на удовлетворение спроса, на каждый процент его роста, требуется все меньший прирост совокупных издержек, характеризующих расход ресурсов при оптимальной технологии перевозок.

В остальной области значений **S**, которую можно соответственно назвать «зоной неэффективности» (она расположена в таблицах ниже границы, обозначенной

приближений к выпуклым оболочкам негладких функций совокупных издержек, обусловленных дискретностью «мгновенного» и «одновременного» развития многих элементов сети и, как следствие, значительными увеличениями условно-постоянных издержек при относительном снижении условно-переменных.

жирной линией) преимущественно наблюдается (по строкам таблицы) немонотонная, почти U-образная зависимость от объемов инвестиций. Так, при рассмотрении по упорядоченным сценариям (по возрастающему выделяемым на развитие сети объемам инвестиций), значения падающей экономии от масштаба ( $S < 1$ ) либо не изменяются по величине, либо сначала убывают, а затем снова растут. Такая U-образная зависимость особенно ярко проявляется для достаточно загруженной сети, в диапазоне объемов перевозок примерно от 100 до 230 млн. поездок в год. В терминах показателя затратной эластичности это означает, что по мере увеличения объемов инвестиций величина данного показателя сначала растет до некоторого уровня, а затем – снижается, когда на каждый процент роста объема удовлетворяемого спроса на перевозки обеспечивается все меньший прирост совокупных издержек. В итоге расчеты демонстрируют возможность уменьшения (правда, немонотонного) неэффективности сценариев по мере ослабления ограничений на объем инвестиций при данных загрузках сети.

Эта закономерность свидетельствует, что недостаточное количество инвестиций не приводит (или не сразу приводит) к положительному эффекту и лишь при существенном увеличении выделяемых объемов инвестиций неэффективность работы сети может начать уменьшаться. Другими словами, результаты расчетов допускают интерпретацию запаздывающей отдачи от вносимых инвестиций в развитие (в виде снижения затратной эластичности), что подтверждает хорошо известный тезис: инновации, требуя инвестиций, могут не дать незамедлительной отдачи. Заметно менее выраженный эффект немонотонности по строкам табл. 2, по-видимому, связан с менее инновационным вариантом развития сети, когда в модельных расчетах предусматривается возможность постепенного улучшения качества покрытия в соответствии с категорией дороги.

Немонотонность проявляется в зоне неэффективности и по столбцам рассматриваемых таблиц. Наиболее отчетливо U-образная зависимость проявляется при жестких ресурсных ограничениях на развитие сети (в диапазоне 0-2 млрд. руб.), причем при любых уровнях ее загрузки. Подобный результат можно интерпретировать как подтверждение свойства инерционности работы сети. Можно считать, что таким образом демонстрируется способность адаптации сети к работе в режимах дефицита ресурсов, перераспределению потоков, их самоорганизации в направлениях снижения затратной эластичности по мере роста выполняемого объема перевозок. Такая интерпретация позволяет объяснить во многом иллюзорный эффект повышения эффективности функционирования сети при реализации также хорошо известной для отечественной инфраструктуры стратегии запаздывающего развития.

### **Оценка экономии от структуры**

Выполненный в предыдущем разделе анализ результатов компьютерного моделирования характеристики  $S$  – экономии от масштаба – показывает, что имеет место неоднородность по значениям  $S$  в области варьируемых параметров  $Q \times K$ , когда разные объемы спроса  $Q$  – на перевозку некоторого обобщенного вида продукта (аккумулирующего поездки грузовых и пассажирских транспортных средств) – должны быть выполнены с учетом того или иного объема инвестиций  $K$  на развитие сети. А именно, есть области эффективности, где совокупные издержки растут

медленнее, чем объемы спроса на перевозку ( $S > 1$ ), и транспортная сеть заведомо сохраняет свойства естественной монополии как оптимального способа организации перевозочного процесса. Напротив, существуют области, где совокупные издержки растут быстрее, чем спрос на перевозки и, возможно, сеть утрачивает характеристические свойства естественной монополии.

Это в рамках принятой методологии расчетов означает, что хотя сеть и «справляется» с перевозками, но перегружена до такой степени, что рационально увеличить плотность сети и создать дублирующие маршруты. В предельном случае, например, может быть целесообразным и продублировать все звенья сети, если перерасход дополнительных на строительство дублирующей сети инвестиций окажется скомпенсированным экономией издержек при ее эксплуатации. Рассмотрим далее результаты соответствующего такой ситуации компьютерного эксперимента.

В современной теории естественной монополии доказано, что исчезновение естественной монополии можно уловить с помощью показателя  $SC$ , характеризующего наличие или отсутствие экономии от структуры. Действительно, результаты моделирования соответствующего показателя в рассматриваемой области вариантных расчетов, как показывают отрицательные значения  $SC$  в табл. 3 и табл. 4, подтверждают предположение о том, что транспортная сеть в определенной области спроса может перестать быть естественной монополией. Более того, расчеты показывают, что имеют место положительные значения  $SC$  в области, более широкой, чем область, идентифицируемая значениями  $S > 1$ , а также отрицательные значения  $SC$ , где  $S < 1$ , что вполне согласуется с теорией естественной монополии.

Проанализируем теперь более детально усредненные результаты расчета дискретного аналога экономии от структуры  $SC$ , представленные в табл. 3 более инновационного варианта и табл. 4 – для менее инновационного варианта. При этом способ усреднения расчетных значений  $SC$  был принят следующим. По всем 600 точкам, в которых для каждого сценария рассчитываются значения однопродуктовой общесетевой функции издержек, каждое значение суммарного объема корреспонденций расщепляется относительно произвольным образом, по крайней мере, на две части, причем значения долевого параметра в расчете варьируются в диапазоне (0,1) с шагом 0,1. Согласно теории естественной монополии, требуется рассчитывать  $SC$  для произвольного разбиения  $Q$ , т.е. на произвольное число частей, но, как показывает анализ полученных с использованием ИТ-S данных по совокупным издержкам, которые хорошо аппроксимируются квадратичной параболой, зона субаддитивности может только расти с увеличением количества частей. Следовательно, чтобы уловить возможные нарушения естественно-монопольных свойств сети, достаточно провести расчет для предполагаемого расщепления загрузки сети  $Q$  на две части. Первое, так называемое, горизонтальное усреднение (среднее арифметическое) заключается в определении среднего значения  $SC$  по количеству принятых в расчет вариантов значений долевого параметра. Второе, вертикальное усреднение (также с использованием среднего арифметического), выполнено для каждого из выделенных (примерно одинаковых) интервалов монотонного роста суммарного объема перевозок  $Q$ , причем среднее

значение  $SC$  определяется для каждого из выбранных сценариев ( $K$ ).

Анализ представленных результатов показывает, что они могут быть проинтерпретированы следующим образом. В целом характер изменения экономии от структуры  $SC$  соответствует изменениям экономии от масштаба  $S$ , и конфигурация области с нарушением субаддитивности, где  $SC < 0$  и исчезают свойства естественной монополии, почти повторяет очертания выделенной при анализе  $S$  области неэффективности, где  $S$  заметно меньше единицы.

Таблица 3

#### ДИСКРЕТНЫЙ АНАЛОГ ЭКОНОМИИ ОТ СТРУКТУРЫ $SC$ ДЛЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ РАЗВИТИЯ АВТОДОРОЖНОЙ СЕТИ ПО ПЕРВОМУ, БОЛЕЕ ИННОВАЦИОННОМУ ВАРИАНТУ

Интервалы суммарного объема перевозок, млн. поездок в год	Ограничения по инвестициям в развитие сети, млрд. руб.									
	Без огр.	24	16	8	4	2	1	0,5	0,1	0
0,4-20,0	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
20,1-39,0	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,30	0,11	0,11	0,11
39,1-58,0	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,11	-0,34	-0,33	-0,35
58,1-77,0	0,13	0,13	0,13	0,13	0,11	0,02	-0,07	-0,44	-0,44	-0,45
77,1-96,0	0,06	0,06	0,06	0,08	0,02	-0,16	-0,24	-0,43	-0,43	-0,44
96,1-116,0	0,06	0,06	0,06	0,05	-0,11	-0,29	-0,33	-0,44	-0,44	-0,44
116,1-135,0	0,09	0,09	0,07	-0,08	-0,27	-0,44	-0,42	-0,44	-0,45	-0,44
135,1-154,0	0,10	0,11	0,07	-0,28	-0,41	-0,48	-0,46	-0,45	-0,44	-0,44
154,1-173,0	0,09	0,09	0,04	-0,30	-0,44	-0,45	-0,47	-0,44	-0,42	-0,43
173,1-193,0	0,08	0,09	-0,02	-0,35	-0,48	-0,42	-0,49	-0,42	-0,42	-0,42
193,1-212,0	0,09	0,09	-0,12	-0,44	-0,49	-0,44	-0,49	-0,41	-0,40	-0,40
212,1-231,0	0,07	0,05	-0,31	-0,46	-0,49	-0,45	-0,49	-0,40	-0,39	-0,39

Таблица 4

#### ДИСКРЕТНЫЙ АНАЛОГ ЭКОНОМИИ ОТ СТРУКТУРЫ $SC$ ДЛЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ РАЗВИТИЯ АВТОДОРОЖНОЙ СЕТИ ПО ВТОРОМУ, МЕНЕЕ ИННОВАЦИОННОМУ ВАРИАНТУ

Интервалы суммарного объема перевозок, млн. поездок в год	Ограничения по инвестициям в развитие сети, млрд. руб.									
	Без огр.	16	8	4	2	1	0,5	0,1	0	
0,4-20,0	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
20,1-39,0	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,14	0,19	0,11	
39,1-58,0	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	-0,30	-0,02	-0,35	
58,1-77,0	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,02	-0,47	-0,51	-0,45	
77,1-96,0	0,09	0,09	0,09	0,07	-0,07	-0,15	-0,45	-0,51	-0,44	
96,1-116,0	0,07	0,07	0,07	-0,06	-0,27	-0,39	-0,45	-0,50	-0,44	
116,1-135,0	0,06	0,06	0,00	-0,22	-0,40	-0,51	-0,45	-0,47	-0,44	
135,1-154,0	0,03	0,03	-0,21	-0,35	-0,53	-0,55	-0,45	-0,46	-0,44	
154,1-173,0	0,00	0,00	-0,29	-0,46	-0,53	-0,53	-0,44	-0,45	-0,43	
173,1-193,0	-0,01	-0,07	-0,36	-0,49	-0,50	-0,52	-0,42	-0,44	-0,42	
193,1-212,0	-0,02	-0,15	-0,49	-0,54	-0,54	-0,53	-0,41	-0,42	-0,40	
212,1-231,0	-0,05	-0,26	-0,52	-0,57	-0,54	-0,52	-0,39	-0,40	-0,39	

Еще раз подчеркнем, что полученные результаты расчетов в целом хорошо согласуются с теорией, согласно которой область субаддитивности по суммарной загрузке сети может быть шире области, в которой имеет место растущая экономия от масштаба, т.е. там, где  $S > 1$ . Другими словами, естественная монополия сохраняется в некоторой большей области при  $S < 1$  (границы этой области в табл. 3 и табл. 4 очерчены жирной линией).

Действительно, как показывают результаты, для дорог с покрытием более высокого качества (по первому, более инновационному варианту) область нарушения субаддитивности начинается преимущественно от значений  $S$ , равных 0,5-0,6, а для дорог с покрытием обычного качества (по второму, менее инновационному варианту) область нарушения субаддитивности соответствует значениям  $S$ , равным 0,3-0,7 – различным для разных сценариев.

Исключение составляет сценарий при  $K = 8$  млрд.руб. в табл. 3, где отрицательное значение  $SC$  появляется при  $S = 1,41$ , но это скорее всего не характерный эффект, проявившийся при отсутствии сглаживающих процедур. В итоге, общий вывод можно сделать следующий: область субаддитивности расширяется по мере увеличения объема инвестиций, выделяемых на развитие сети, и ограничивающие эту область соответствующие значения суммарного объема корреспонденций растут монотонно. Иначе говоря, можно считать, что чем более развита проектируемая сеть, тем больше область, в которой выполняются свойства естественной монополии. Эта область охватывает почти весь рассматриваемый диапазон загрузки (до 212 млн. поездок в год) для первого варианта по сценариям с наибольшими объемами инвестиций, а далее область «сжимается» по мере уменьшения объема инвестиций. Такое же монотонное убывание области субаддитивности по мере снижения объемов инвестиций наблюдается и по второму варианту для дорог с покрытием обычного качества, но в существенно меньшем диапазоне загрузок – до 173 млн. поездок в год.

Интересно отметить, что для обоих наборов сценариев (более инновационного и менее инновационного) значения  $SC$  для выделенных диапазонов загрузки почти не меняются от сценария к сценарию: например, в диапазоне загрузки 39-58 млн. поездок составляют не более 17-18% для дорог с покрытием высокого качества, и не более 21% – для дорог с покрытием обычного качества. При этом в области, где не только выполняется свойство субаддитивности, но и там, где однопродуктовая естественная монополия устойчива, т.е. при  $S > 1$ , значения  $SC$  по строкам таблиц остаются постоянными.

Поскольку сами значения  $SC$  указывают на степень субаддитивности, имеет смысл следующая интерпретация результатов. Заметное снижение  $SC$  по мере роста загрузки сети при каждом сценарии ее развития можно трактовать, как диссипацию (расточение, расходование, постепенное растрачивание) синергетического эффекта естественной монополии, причем тем более быструю, чем меньше объем вкладываемых в развитие сети инвестиций. Это снижение в области устойчивой естественной монополии (с 17% до 8-9%) является менее заметным и более плавным для дорог с покрытием высокого качества и более существенным и резким (с 21% до 6%) – для дорог с покрытием обычного качества. И в этом смысле более инновационный вариант развития сети оказывается более предпочтительным.

Имеет место явно выраженная тенденция разнонаправленного изменения степени субаддитивности по вариантам, когда для одного и того же сценария могут быть разные доминанты с увеличением загрузки сети. Так, например, для сценария «без ограничений на инвестиции» для малых загрузок значения  $SC$  выше для дорог с покрытием высокого качества, чем – для дорог с покрытием обычного качества, а для больших загрузок

зок – наоборот. Наблюдается также некоторая немонотонность в изменениях значений **SC** по строкам и столбцам таблицы, но она выражена существенно слабее, чем в изменениях значений **S**.

В итоге, полученные результаты по выделению области субаддитивности, где экономия от структуры существует, т.е.  $SC > 0$ , при сравнении двух вариантов, называемых «более инновационным» и «менее инновационным», подтверждают рассмотренные выше результаты и выводы, связанные с анализом экономии от масштаба **S**. Действительно, данные расчетов экономии от структуры **SC** также показывают, что рост загрузки сети не приводит к потере естественно-монопольных свойств, если сеть является хорошо развитой, т.е. такой, в которую, согласно более инновационному варианту, вложено больше инвестиций. И, напротив, в менее инновационном варианте свойства естественной монополии быстрее исчезают по мере роста загрузки сети. Так, в менее инновационном варианте для сценариев «без ограничений...» и при ограничении 16 млрд. руб. значения **SC** становятся отрицательными, начиная уже от суммарного объема корреспонденций более 173 млн. поездок в год, а при сценарии, например, 4 млрд. руб. – примерно от 100 млн. поездок в год.

**Модифицированные модели технологических детерминант и оценка их влияния на NPV**

Напомним, что в рассматриваемых задачах оптимизации развития транспортной сети топология считается заданной. Тогда за рамками моделирования остаются вопросы необходимости формирования (в том числе, с привлечением экспертов) вариантов изменения топологии:

- существенного дополнения конфигурации;
- дублирования отдельных фрагментов сети;
- построения альтернативных сетей и т.п.

Если в задачах оптимизации развития транспортной сети предусматривается возможность изменения топологии, то представляется целесообразным применять следующий декомпозиционный подход. Сначала для сети заданной топологии отбираются с использованием IT-S наиболее эффективные (по критерию **max NPV**) проекты во всей экспертно задаваемой области сочетаний объемных (спросовых и инвестиционных) характеристик. А далее для каждого из рассматриваемых сочетаний экзогенно задаваемых объемных (спросовых и инвестиционных) характеристик предлагаются способы изменения топологии сети (увеличение количества звеньев и/или узлов, добавление звеньев-дублеров и т.п.).

Способы и диапазоны варьирования топологических параметров могут быть различными для разных сочетаний объемных параметров, причем определяемыми не только экспертным путем, если принять во внимание возможность получения количественных оценок взаимосвязей между объемными и топологическими характеристиками. Речь идет о возможности моделирования (в рамках IT-S) стоимостных оценок перегруженности недостаточно развитой сети (относительно растущего спроса на перевозки), появления заторов на ее участках, вызывающих резкий рост издержек при исчерпании пропускных способностей звеньев и т.п.

С использованием такого технологического детерминанта, как экономия от структуры, можно оценить возможность дополнительной экономии совокупных затрат от добавления одного или нескольких звеньев се-

ти. В частности, по изменениям значений **SC** (от положительных до нулевых и отрицательных) можно показать, что при растущем спросе для относительно небольших объемов инвестиций в развитие сети становится экономически выгодным дублирование даже всех звеньев сети. Подобную диагностику можно рассматривать и как инструмент установления границ допустимой области оцениваемых инвестиционных проектов развития транспортной сети, чтобы исключить возможность проектирования «ненадежных», перегруженных сетей заданной топологии. Такие сети, как сигнализирует индикатор **SC**, достаточно быстро – по мере роста спроса на перевозки – теряют свойства естественной монополии как способа организации перевозок с минимальными совокупными затратами.

Вопрос о способах варьирования топологических параметров, формировании стоимостных оценок их изменений является предметом многих исследований (см., например, [14]), и в настоящей статье рассматривается один из возможных подходов, использующий для анализа топологии транспортной сети концепцию нормативной идентификации естественной монополии через субаддитивность функции издержек.

Действительно, согласно результатам расчетов и принятой сетевой трактовке субаддитивности, диагностика эффективности работы сети по детерминанту **SC** (см. табл. 3-4) сигнализирует, что возможны нарастающие – при растущих суммарных объемах корреспонденций – потери в экономии издержек, что отражает недостатки в топологии сети, уровне ее разветвленности, отсутствие необходимых дорог – дублеров и т.п. При этом, однако, расчетные значения **NPV** инвестиционного проекта по развитию данной сети, которые были определены при ее неизменной топологии, продолжают увеличиваться по мере роста загрузки сети (табл. 5 и 6).

Таблица 5

**ЧИСТЫЙ ДИСКОНТИРОВАННЫЙ ДОХОД (NPV, МЛРД. РУБ.) ДЛЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ РАЗВИТИЯ АВТОДОРОЖНОЙ СЕТИ ПО ПЕРВОМУ, БОЛЕЕ ИННОВАЦИОННОМУ ВАРИАНТУ**

Интервалы суммарного объема перевозок, млн. поездок в год	Ограничения по инвестициям в развитие сети, млрд. руб.							
	Без огр.	24	16	8	4	2	1	0,1
20,1-39,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9	0
39,1-58,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,2	7,8	6,9	0,2
58,1-77,0	20,7	20,5	20,5	20,5	21,1	19,0	17,5	0,6
77,1-96,0	36,8	36,6	36,6	37,0	36,9	32,5	27,7	1,6
96,1-116,0	60,0	59,9	59,9	59,9	57,0	50,1	42,5	2,4
116,1-135,0	86,6	86,6	87,3	85,9	79,8	68,6	59,5	2,3
135,1-154,0	117,9	117,9	121,2	117,3	104,3	90,6	77,4	3,0
154,1-173,0	154,8	154,9	155,8	150,6	133,6	111,9	97,3	4,2
173,1-193,0	194,1	194,2	196,2	187,1	163,5	133,7	114,8	4,5
193,1-212,0	234,8	235,2	238,7	223,7	192,7	156,6	133,4	4,8
212,1-231,0	278,5	280,3	280,0	259,8	224,5	180,3	152,1	5,2

Тогда, для определения вариантов развития сети, в которых топологию сети целесообразно изменить (например, в указанном выше смысле, дублируя звенья сети), удобно ввести индикатор  $IS = 1 / (1 - SC)$  как модификацию показателя экономии от структуры.

Таблица 6

**ЧИСТЫЙ ДИСКОНТИРОВАННЫЙ ДОХОД (*NPV*, МЛРД. РУБ.) ДЛЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ РАЗВИТИЯ АВТОДОРОЖНОЙ СЕТИ ПО ВТОРОМУ, МЕНЕЕ ИННОВАЦИОННОМУ ВАРИАНТУ**

Интервалы суммарного объема перевозок, млн. поездов в год	Ограничения по инвестициям в развитие сети, млрд. руб.							
	Без огр.	16	8	4	2	1	0,5	0,1
20,1-39,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,1	0,6
39,1-58,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	7,9	1,1	4,4
58,1-77,0	21,2	21,2	21,2	21,2	20,9	19,1	0,8	3,6
77,1-96,0	37,6	37,6	37,6	38,1	35,5	32,5	1,6	2,3
96,1-116,0	59,9	59,9	60,0	59,6	53,9	47,9	3,0	3,5
116,1-135,0	86,9	86,9	88,9	82,0	73,8	62,0	3,1	4,1
135,1-154,0	120,7	120,7	120,6	107,1	93,3	78,1	3,1	3,8
154,1-173,0	156,7	157,1	153,4	134,3	110,5	93,1	3,6	3,9
173,1-193,0	194,0	199,9	188,1	160,2	130,9	109,0	3,9	2,9
193,1-212,0	236,3	241,7	220,2	184,4	149,6	122,6	4,2	3,3
212,1-231,0	279,5	281,3	253,4	206,0	166,7	136,5	4,9	3,7

Таблица 7

**ИНДИКАТОР  $IS=1/(1-SC)$  ДЛЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ РАЗВИТИЯ АВТОДОРОЖНОЙ СЕТИ ПО ПЕРВОМУ, БОЛЕЕ ИННОВАЦИОННОМУ ВАРИАНТУ**

Интервалы суммарного объема перевозок, млн. поездов в год	Ограничения по инвестициям в развитие сети, млрд. руб.									
	Без огр.	24	16	8	4	2	1	0,5	0,1	0
0,4-20,0	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92
20,1-39,0	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,45	1,44	1,13	1,12	1,12
39,1-58,0	1,20	1,20	1,20	1,20	1,21	1,23	1,13	0,75	0,75	0,74
58,1-77,0	1,15	1,15	1,15	1,15	1,13	1,02	0,94	0,70	0,69	0,69
77,1-96,0	1,06	1,06	1,06	1,09	1,02	0,86	0,81	0,70	0,70	0,70
96,1-116,0	1,06	1,06	1,06	1,06	0,90	0,78	0,75	0,69	0,69	0,69
116,1-135,0	1,10	1,10	1,08	0,93	0,79	0,69	0,70	0,69	0,69	0,69
135,1-154,0	1,12	1,12	1,08	0,78	0,71	0,68	0,68	0,69	0,70	0,70
154,1-173,0	1,10	1,10	1,04	0,77	0,70	0,69	0,68	0,70	0,70	0,70
173,1-193,0	1,09	1,09	0,98	0,74	0,67	0,70	0,67	0,70	0,71	0,71
193,1-212,0	1,10	1,10	0,89	0,69	0,67	0,70	0,67	0,71	0,71	0,71
212,1-231,0	1,08	1,05	0,77	0,68	0,67	0,69	0,67	0,72	0,72	0,72

Таблица 8

**ИНДИКАТОР  $IS = 1/(1-SC)$  ДЛЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ РАЗВИТИЯ АВТОДОРОЖНОЙ СЕТИ ПО ВТОРОМУ, МЕНЕЕ ИННОВАЦИОННОМУ ВАРИАНТУ**

Интервалы суммарного объема перевозок, млн. поездов в год	Ограничения по инвестициям в развитие сети, млрд. руб.								
	Без огр.	16	8	4	2	1	0,5	0,1	0
0,4-20,0	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,92	1,93	1,92
20,1-39,0	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,16	1,23	1,12
39,1-58,0	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	0,77	0,98	0,74
58,1-77,0	1,16	1,16	1,16	1,16	1,15	1,02	0,68	0,66	0,69
77,1-96,0	1,10	1,10	1,10	1,07	0,93	0,87	0,69	0,66	0,70
96,1-116,0	1,07	1,07	1,07	0,95	0,79	0,72	0,69	0,67	0,69
116,1-135,0	1,07	1,07	1,00	0,82	0,71	0,66	0,69	0,68	0,69
135,1-154,0	1,03	1,03	0,83	0,74	0,65	0,65	0,69	0,68	0,70
154,1-173,0	1,00	1,00	0,78	0,68	0,65	0,65	0,70	0,69	0,70
173,1-193,0	0,99	0,94	0,73	0,67	0,67	0,66	0,70	0,69	0,71
193,1-212,0	0,98	0,87	0,67	0,65	0,65	0,65	0,71	0,70	0,71
212,1-231,0	0,95	0,79	0,66	0,64	0,65	0,66	0,72	0,71	0,72

Этот индикатор имеет значения, большие единицы, когда сеть обладает свойством естественной монополии при  $SC > 0$ ; значения, равные единице, когда дополнительная экономия издержек, присущая естественно-монопольному способу организации перевозок, исчерпывается при  $SC = 0$ , и – меньшие единицы при  $SC < 0$ , когда сеть теряет свойства естественной монополии.

Последняя из перечисленных ситуаций (обусловленная нарушением субаддитивности агрегированной общесетевой функции издержек) допускает следующую трактовку: соответствующий нарушению субаддитивности перерасход совокупных издержек имеет место из-за перегруженности сети, обусловлен ее недостаточной плотностью и, в частности – в рассматриваемом предельном случае – может быть скомпенсирован дублированием всех звеньев сети. Агрегированные результаты вариантных расчетов оценок  $IS$ , когда моделируется сравнение оптимальных издержек на транспортировку по единственной проектируемой сети заданной конфигурации или – по двум ее копиям, образованным дублированием звеньев, представлены в табл. 7 и табл. 8. Хотя выделяемые по оценкам  $IS$  области в этих таблицах в точности совпадают с аналогичными областями в табл. 3 и табл. 4, тем не менее, индикатор  $IS$  является более удобным инструментом анализа. Так, исходя из величин оценок  $IS$ , можно считать, что указанный индикатор более отчетливо представляет границу в области варьирования объемных (спросовых и инвестиционных) показателей, когда сеть теряет свойства естественной монополии.

Для оценки влияния технологических детерминант на динамику  $NPV$  в рассматриваемой области варьирования объемных переменных введем индикатор  $ISNPV$ . В зависимости от того, какие изменения  $NPV$  рассматриваются (от объемов спроса или от объемов инвестиций) – этот индикатор в обобщенном виде может быть представлен в следующем виде:

$$ISNPV = I_{Q(K)}NPV * IS,$$

где  $I_{Q(K)}NPV$  – обычный коэффициент роста  $NPV$  по мере роста объемов спроса  $Q$  (или по мере роста объемов инвестиций  $K$ ).

Подчеркнем, что мультипликативный характер введенного показателя удобен при переходе к логарифмическим шкалам, и позволяет увидеть, что в области, где проектируемая сеть является естественной монополией и динамика  $NPV$ , его тенденция к росту будет усиливаться, т.к. в этой области  $SC > 0$ ,  $IS > 1$  и  $\ln IS > 0$ . В остальной части области варьирования параметров  $Q$  и  $K$   $SC < 0$ , и, следовательно,  $IS < 1$ ,  $\ln IS < 0$ . Тогда, как показывают количественные оценки, растущая динамика  $NPV$  будет ослабевать или изменяться на падающую, и соответствующие значения  $ISNPV$  будут пригодны для выявления области, в которой целесообразно дублирование сети.

В табл. 9 и 10 представлены (соответственно для более инновационного варианта и менее инновационного) значения показателей динамики без учета и с учетом т.н. эффектов естественно-монопольной синергии. Динамика  $NPV$  без учета таких эффектов в виде  $I_QNPV$  – цепных коэффициентов роста по мере увеличения спроса – приведена в верхней части каждой из этих таблиц, а в нижней части – динамика  $NPV$  с учетом таких эффектов, т.е. значения  $ISNPV$  в виде  $I_QNPV * IS$ .

Расчеты показывают, что полученные значения  $I_Q NPV$  свидетельствуют о монотонном росте  $NPV$  по параметру  $Q$  во всей области его изменения, независимо от наличия или отсутствия естественно-монопольных свойств развиваемой транспортной сети. При этом имеет место рост с замедлением: так, из приводимых в таблицах данных видно, что с ростом загрузки сети по всем сценариям, темпы роста  $NPV$  замедляются до 100-120% (см. верхнюю часть табл. 9 и табл. 10).

Таблица 9

**ДИНАМИКА  $NPV$  (ЦЕПНЫЕ ТЕМПЫ РОСТА ПО МЕРЕ УВЕЛИЧЕНИЯ СПРОСА) И ЗНАЧЕНИЯ ИНДИКАТОРА  $ISNPV$  (ДОРОГИ С ПОКРЫТИЕМ БОЛЕЕ ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА)**

Интервалы суммарного объема перевозок, млн. поездок в год	Ограничения по инвестициям в развитие сети, млрд. руб.							
	Без огр.	24	16	8	4	2	1	0,1
<b><math>NPV</math></b>								
39,1-58,0	7,3	7,6	7,6	7,6	7,8	7,5	7,4	-
58,1-77,0	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,5	2,5	2,8
77,1-96,0	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	2,8
96,1-116,0	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5
116,1-135,0	1,4	1,4	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,0
135,1-154,0	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3
154,1-173,0	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,3	1,4
173,1-193,0	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1
193,1-212,0	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1
212,1-231,0	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
<b><math>ISNPV</math></b>								
39,1-58,0	8,7	9,1	9,1	9,1	9,4	9,2	8,3	-
58,1-77,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,9	2,5	2,4	1,9
77,1-96,0	1,9	1,9	1,9	2,0	1,8	1,5	1,3	2,0
96,1-116,0	1,7	1,7	1,7	1,7	1,4	1,2	1,2	1,0
116,1-135,0	1,6	1,6	1,6	1,3	1,1	1,0	1,0	0,7
135,1-154,0	1,5	1,5	1,5	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9
154,1-173,0	1,4	1,4	1,3	1,0	0,9	0,8	0,9	1,0
173,1-193,0	1,4	1,4	1,2	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8
193,1-212,0	1,3	1,3	1,1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
212,1-231,0	1,3	1,3	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Таблица 10

**ДИНАМИКА  $NPV$  (ЦЕПНЫЕ ТЕМПЫ РОСТА ПО МЕРЕ УВЕЛИЧЕНИЯ СПРОСА) И ЗНАЧЕНИЯ ИНДИКАТОРА  $ISNPV$  (ДОРОГИ С ОБЫЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ)**

Интервалы суммарного объема перевозок, млн. поездок в год	Ограничения по инвестициям в развитие сети, млрд. руб.							
	Без огр.	16	8	4	2	1	0,5	0,1
<b><math>NPV</math></b>								
39,1-58,0	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,4	10,7	7,8
58,1-77,0	2,7	2,7	2,7	2,7	2,6	2,4	0,7	0,8
77,1-96,0	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	2,1	0,6
96,1-116,0	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,9	1,6
116,1-135,0	1,4	1,4	1,5	1,4	1,4	1,3	1,0	1,2
135,1-154,0	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,0	0,9
154,1-173,0	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,0
173,1-193,0	1,2	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	0,8
193,1-212,0	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1
212,1-231,0	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1
<b><math>ISNPV</math></b>								
39,1-58,0	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,4	8,3	7,7
58,1-77,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	2,5	0,5	0,5

Интервалы суммарного объема перевозок, млн. поездок в год	Ограничения по инвестициям в развитие сети, млрд. руб.							
	Без огр.	16	8	4	2	1	0,5	0,1
77,1-96,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,6	1,5	1,4	0,4
96,1-116,0	1,7	1,7	1,7	1,5	1,2	1,1	1,3	1,0
116,1-135,0	1,5	1,5	1,5	1,1	1,0	0,9	0,7	0,8
135,1-154,0	1,4	1,4	1,1	1,0	0,8	0,8	0,7	0,6
154,1-173,0	1,3	1,3	1,0	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7
173,1-193,0	1,2	1,2	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5
193,1-212,0	1,2	1,1	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
212,1-231,0	1,1	0,9	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8

В то же время результаты экспериментальных расчетов индикатора  $ISNPV$  указывают на чувствительность данного показателя к свойствам естественной монополии. Так, значения  $ISNPV$  существенно выше 100% в области, где естественная монополия имеет место. В то же время, почти всюду в области, где естественно-монопольные свойства исчезают, оценки  $ISNPV$  становятся меньше 100% (70-90% для дорог с покрытием более высокого качества и 40-90% для дорог с обычным покрытием), т.е. рост сменяется падением.

Следовательно, результаты подобных расчетов позволяют выявить границу в области  $Q * K$ , задаваемую значениями  $ISNPV$ , близкими к единице (примерно 100-110%), за пределами которой в условиях растущего спроса на перевозки объемов инвестиций по каждому сценарию может оказаться недостаточно, чтобы избежать перегруженности сети заданной топологии.

Аналогичным образом в табл. 11 и 12 представлены (соответственно для более инновационного варианта и менее инновационного) значения показателей динамики  $NPV$  без учета и с учетом естественно-монопольных свойств развиваемой транспортной сети. Динамика  $NPV$  без учета естественно-монопольных свойств в виде  $I_Q NPV$  – цепных коэффициентов роста по мере увеличения объемов инвестиций в развитие сети – приведена в верхней части каждой из этих таблиц, а в нижней части – динамика  $NPV$  с учетом естественно-монопольных свойств, т.е. значения  $ISNPV$  в виде  $I_Q NPV * IS$ .

Расчеты показывают, что полученные значения  $I_Q NPV$  свидетельствуют о монотонном росте  $NPV$  по параметру  $K$  во всей области его изменения, независимо от наличия или отсутствия естественно-монопольной синергии. При этом имеет место рост с незначительным замедлением: так, из приводимых в таблицах данных видно, что с ростом объемов инвестиций при всех загрузках темпы роста  $NPV$  немного замедляются со 120% до 100% (см. верхнюю часть табл. 11 и 12).

И в данном случае результаты экспериментальных расчетов индикатора  $ISNPV$  указывают на его чувствительность к наличию или отсутствию естественной монополии. Так, оценки  $ISNPV$  меняются примерно до 150% в области, где естественная монополия имеет место, в то время как в области, где она исчезает, оценки  $ISNPV$  становятся меньше 100% (79-95% для дорог с покрытием более высокого качества и 81-98% для дорог с обычным покрытием), т.е. рост сменяется падением. Следовательно, и в данном случае результаты подобных расчетов позволяют выявить границу в области  $Q * K$ , задаваемую значениями  $ISNPV$ , близкими к единице (примерно 100-106% для дорог с покрытием более высокого качества и 101-112% – для дорог с обычным покрытием), за пределами которой – в условиях растущего спроса на перевозки – объемов ин-

вестиций может оказаться недостаточно, чтобы избежать перегруженности сети заданной топологии.

Таким образом, предлагаемые индикаторы могут быть полезны при составлении перспективных схем развития транспортной сети, исследовании условий изменения сложившейся топологии, рассмотрении принципиально новых решений для обслуживания транспортных потоков (таких, как развитие альтернативных сетей, расширения конфигурации сети и т.д.), с учетом имеющихся инвестиционных возможностей.

Таблица 11

**ДИНАМИКА NPV (ЦЕПНЫЕ ТЕМПЫ РОСТА ПО МЕРЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ИНВЕСТИЦИЙ) И ЗНАЧЕНИЯ ИНДИКАТОРА ISNPV (ДОРОГИ С ПОКРЫТИЕМ БОЛЕЕ ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА)**

Интервалы суммарного объема перевозок, млн. поездок в год	Ограничения по инвестициям в развитие сети, млрд. руб.					
	Без огр.	24	16	8	4	2
<b>NPV</b>						
20,1-39,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1
39,1-58,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1
58,1-77,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1
77,1-96,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2
96,1-116,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2
116,1-135,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2
135,1-154,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,1
154,1-173,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2
173,1-193,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2
193,1-212,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2
212,1-231,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2
<b>ISNPV</b>						
20,1-39,0	1,50	1,43	1,43	1,43	1,46	1,62
39,1-58,0	1,21	1,20	1,20	1,17	1,28	1,38
58,1-77,0	1,15	1,15	1,15	1,12	1,25	1,11
77,1-96,0	1,07	1,06	1,05	1,09	1,16	1,02
96,1-116,0	1,06	1,06	1,06	1,11	1,02	0,91
116,1-135,0	1,10	1,09	1,10	1,00	0,92	0,80
135,1-154,0	1,12	1,09	1,11	0,88	0,82	0,79
154,1-173,0	1,10	1,10	1,07	0,87	0,83	0,79
173,1-193,0	1,09	1,08	1,02	0,85	0,82	0,82
193,1-212,0	1,10	1,08	0,95	0,80	0,83	0,82
212,1-231,0	1,07	1,06	0,83	0,79	0,84	0,82

Таблица 12

**ДИНАМИКА NPV (ЦЕПНЫЕ ТЕМПЫ РОСТА ПО МЕРЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ИНВЕСТИЦИЙ) И ЗНАЧЕНИЯ ИНДИКАТОРА ISNPV (ДОРОГИ С ОБЫЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ)**

Интервалы суммарного объема перевозок, млн. поездок в год	Ограничения по инвестициям в развитие сети, млрд. руб.					
	Без огр.	16	8	4	2	
<b>NPV</b>						
20,1-39,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
39,1-58,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
58,1-77,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1
77,1-96,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1
96,1-116,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1
116,1-135,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	
135,1-154,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	
154,1-173,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	
173,1-193,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	
193,1-212,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	
212,1-231,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	

Интервалы суммарного объема перевозок, млн. поездок в год	Ограничения по инвестициям в развитие сети, млрд. руб.				
	Без огр.	16	8	4	2
<b>ISNPV</b>					
20,1-39,0	1,43	1,43	1,43	1,43	1,45
39,1-58,0	1,20	1,20	1,20	1,21	1,24
58,1-77,0	1,15	1,15	1,15	1,14	1,12
77,1-96,0	1,06	1,06	1,07	1,10	0,94
96,1-116,0	1,06	1,06	1,06	1,00	0,87
116,1-135,0	1,10	1,06	1,01	0,87	0,83
135,1-154,0	1,12	1,08	0,88	0,82	0,81
154,1-173,0	1,10	1,06	0,88	0,85	0,82
173,1-193,0	1,06	1,04	0,87	0,82	0,84
193,1-212,0	1,07	0,98	0,83	0,83	0,85
212,1-231,0	1,07	0,85	0,84	0,83	0,84

**3.2. Оценки экономии от масштаба и экономии от структуры по эконометрическим моделям агрегированной общесетевой функции издержек**

Для построения эконометрических моделей агрегированной общесетевой функции издержек использованы данные, полученные путем компьютерного моделирования работы и развития сети с нелинейными характеристиками. Соответствующий инженерный подход реализован на базе информационной технологии синтеза сложных сетевых структур (IT-S), причем IT-S использована в качестве специального генератора данных (см. п. 2). Общие условия моделирования оценок для анализа естественно-монопольных свойств сети изложены в преамбуле к п. 3.

Прежде, чем переходить к изложению результатов эконометрических экспериментов, следует подчеркнуть отдельные моменты. Так, для информационного обеспечения эконометрического подхода к моделированию функций издержек сетевых подсистем в данном случае используются разработанные в рамках создания информационной технологии синтеза сложных сетевых структур (IT-S) компьютерные алгоритмы решения нелинейных транспортных задач. С одной стороны, программный комплекс позволяет в результате вариантных расчетов получать 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. В то же время подобный способ, как указано выше, формирования исходной информации по издержкам, теоретически соответствующим оптимальной технологии перевозок, может обеспечивать моделирование лишь достаточно хорошего приближения к общесетевой функции минимальных издержек, т.е. по сути моделирование квази-функций 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. Тем не менее, отечественный опыт по моделированию и решению нелинейных сетевых задач позволяет рассчитывать на получение достаточно хороших приближений, которые могут служить альтернативой формированию агрегированной функции издержек с использованием граничного подхода.

Кроме того, в приводимом далее упрощенном варианте моделирования, когда принимается гипотеза о постоянстве цен на ресурсы, анализ проводится лишь относительно данных по общему объему корреспонденций по сети и соответствующим значениям совокупных издержек на осуществление перевозок и развитие сети. При этом издержки варьируются по сценариям – в зависимости от объема инвестиций, выделяемых на развитие сети, и по возможностям модернизации технического состояния звеньев сети.

**Анализ исходных данных**

Анализ полученных данных по всем указанным вариантам и сценариям проведен средствами программного пакета Eviews (версия 6.0). При этом массив данных охватывает выборку в 600 наблюдений, причем значение максимальной нагрузки на сеть, соответствующее 600-й точке выборки, равно 231 млн. поездок в год.

При использовании программы Eviews нет возможности оперировать с дополнительно вводимыми обозначениями переменных, поэтому ниже приведена таблица соответствий (табл. 13). В табл. 14 представлен пример характеристик (таких как минимальные, средние значения, медиана и другие статистики), получаемых в Eviews при обработке массива исходной информации характеристик для варианта «дороги с покрытием более высокого качества» и сценария «без ограничения на инвестиции».

Таблица 13

**СООТВЕТСТВИЯ ОБОЗНАЧЕНИЙ В ДАННОМ ТЕКСТЕ И В EIEWS**

Обозначения в данном тексте	Обозначения в Eviews	Название параметра
C	Cf	Суммарные затраты на работу и развитие сети, тыс. руб. в год
Y	Z	Суммарная загрузка по сети – объем корреспонденций, кол-во поездок в год
F	C	Константа, свободный член в уравнении регрессии для агрегированной общесетевой функции издержек

Таблица 14

**ПРИМЕР СТАНДАРТНОГО НАБОРА ХАРАКТЕРИСТИК В EIEWS ПО ВЫБОРКЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ВАРИАНТА «ДОРОГИ С ПОКРЫТИЕМ БОЛЕЕ ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА» И СЦЕНАРИЯ «БЕЗ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ИНВЕСТИЦИИ»**

indicator	CF00	z
Mean	8 360 595	1,16E+08
Median	8 742 466	1,16E+08
Maximum	16 237 042	2,31E+08
Minimum	422 948,3	384 650,7
Std. Dev.	4 517 163	66678952
Skewness	-0,076136	2,57E-10
Kurtosis	1,828254	1,799993
Sum	5,02E+09	6,49E+10
Sum Sq. Dev.	1,22E+16	2,66E+18
Observations	600	600

Наряду с полученными минимальными, средними значениями, медианой и другими статистиками, наи-

больший интерес при анализе исходных данных представляют собой графики совокупных издержек (сформированных с использованием IT-S) по различным сценариям для рассматриваемых вариантов модернизации состояний звеньев сети.

Так, для более инновационного варианта развития сети графики исходных совокупных издержек для четырех различных сценариев развития сети, различающихся величиной ограничений на суммарный объем инвестиций, представлены на рис. 3; для менее инновационного варианта развития сети – на рис. 4. Приведенные на рис. 3 и 4 зависимости включают графики совокупных издержек как для сценария нулевого развития, называемого «без инвестиций», так и для сценария наибольшего развития, называемого «без ограничения на инвестиции». Данные графики издержек представляют из себя выпуклые вниз кривые, причем легко заметить резкое снижение издержек при максимальной нагрузке на сеть по мере роста объемов инвестиций, вкладываемых в развитие сети.

Необходимо отметить присутствие некоторой «гребенки» на графиках, возможные причины появления которой связаны, прежде всего, с дискретностью представления данных и особенностями алгоритма выбора проектов для развития сети при генерации данных, когда многоэтапное развитие звеньев сети моделируется дискретно. Если сравнить графики издержек для двух вариантов расчетов, то, несмотря на заметные различия в характере динамики кривых, общий вид кривых издержек для сети, состоящей из дорог с покрытием обычного качества аналогичен виду кривых издержек для сети из дорог с покрытием высокого качества. Уровень издержек для максимальной, минимальной и средней загрузки сети, так же остается на аналогичном уровне, поэтому визуально отличия невелики и оправдывают выбор при эконометрическом моделировании однопродуктовой функции издержек квадратичной параболической формы для любых вариантов и сценариев.

**Формирование расчетных моделей**

На базе полученного массива исходных данных для каждого сценария развития сети было проведено эконометрическое моделирование агрегированной общесетевой однопродуктовой функции издержек, исходя из квадратичных форм вида:

$$C(y) = F + ay^2 \text{ для } y > 0,$$

- где
- C – совокупные издержки в руб.;
- F – условно-постоянные издержки в руб.;
- y – количество поездок в год.

Для примера в табл. 15 и 16 представлены характеристики результатов моделирования в Eviews с использованием квадратичной функции издержек (приведенные параметры относятся к варианту дорог с покрытием более высокого качества при отсутствии дополнительных инвестиций в развитие сети).

Восстановленная на основе моделирования функция издержек для данного сценария развития сети имеет вид:

$$C(y) = 2001090 + 6,07 * 10^{-9} y^2.$$

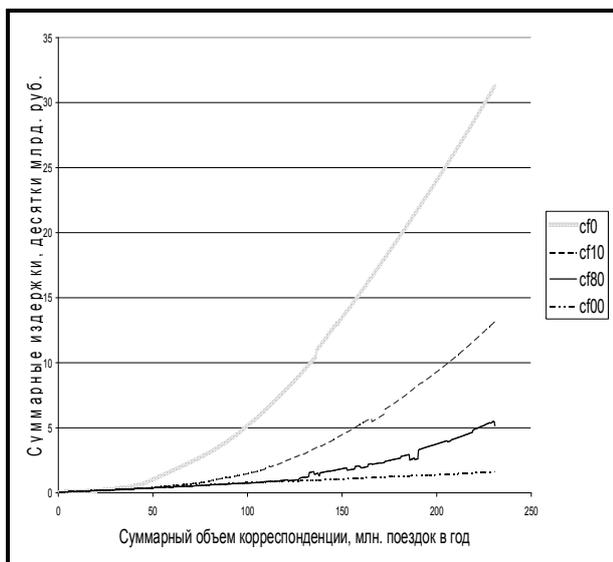


Рис. 3. Графики издержек (для разных ограничений на инвестиции) от суммарного объема корреспонденции (дороги с покрытием более высокого качества). Ограничения на инвестиции (различные сценарии), млрд. руб.: cf0 – нет инвестиций; cf10 – 1; cf80 – 8; cf00 – нет ограничений на объем инвестиций

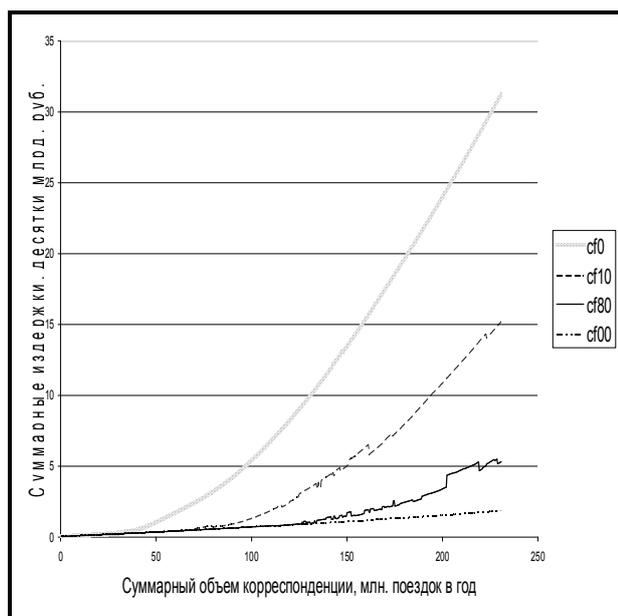


Рис. 4. Графики издержек (для разных ограничений на инвестиции) от суммарного объема корреспонденции (дороги с покрытием обычного качества). Ограничения на инвестиции (различные сценарии), млрд. руб.: cf0 – нет инвестиций; cf10 – 1; cf80 – 8; cf00 – нет ограничений на объем инвестиций

На рис. 5 представлены графики исходных издержек и результатов полученной эконометрической модели издержек (для примера также выбран более инновационный вариант, сценарий – без дополнительных инвестиций в развитие сети). Данный рисунок удобен для визуального анализа возможностей моделирования – при

Таблица 15

ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ КВАДРАТИЧНОЙ ФУНКЦИИ ИЗДЕРЖЕК (С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА EVIEWS)

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	2001090	204661.0	-21.85984	0.0000
z * z	6.07E-09	8.57E-12	708.0494	0.0000

Таблица 16

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ В EVIEWS КВАДРАТИЧНОЙ ФУНКЦИИ ИЗДЕРЖЕК

Indicator	Value	Indicator	Value
R-squared	0.998809	Mean dependent var	1.04E+08
Adjusted R-squared	0.998807	S.D. dependent var	96694512
S. E. of regression	3340357	Akaike info criterion	32.88438
Sum squared resid	6.67E+15	Schwarz criterion	32.89904
Log likelihood	-9863.314	Hannan-Quinn criterion	32.89009
F-statistic	501333.9	Durbin-Watson stat	0.003534

сопоставлении результатов расчетов значений функции издержек в Eviews и аналогичных значений исходных данных. Как видно из совпадения графиков в целом, представленная модель удовлетворительно отражает агрегированную функцию издержек для данной автодорожной сети. Имеются лишь небольшие отклонения в начале области ее определения (при малом суммарном объеме корреспонденций) и в конце области определения (при большом суммарном объеме корреспонденций), а в подавляющей же части области графики практически повторяют друг друга.

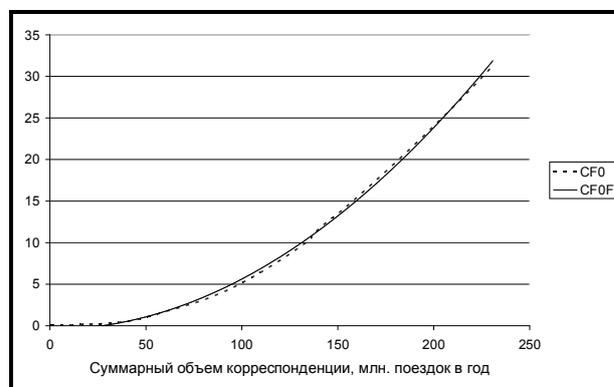


Рис. 5. Графики издержек, для дорог с покрытием более высокого качества по сценарию без дополнительных инвестиций в развитие сети: CF0 – исходные данные, CF0F – рассчитанные на основе квадратичной функции. По оси ординат совокупные издержки в десятках млрд. руб., по оси абсцисс суммарный объем корреспонденции, млн. поездок в год

С использованием программных средств пакета Eviews для каждого сценария восстановлена общесетевая функция издержек, параметры которой для удобства анализа далее представлены в таблицах. Так, в табл. 17 приведены основные параметры  $F$  и  $a$ , полученные при моделировании в Eviews квадратичных функций издержек при различных сценариях более ин-

новационного варианта развития сети (от сценария нулевого развития «без инвестиций» до сценария наибольшего развития «без ограничения на инвестиции») и в табл. 18 приведены аналогичные результаты для дорог с обычным покрытием. Параметр *F* в этих таблицах для удобства анализа скорректирован на начальную стоимость представленной автодорожной сети.

Таблица 17

**ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ КВАДРАТИЧНЫХ ФУНКЦИЙ ИЗДЕРЖЕК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ИНВЕСТИЦИЙ (ДОРОГИ С ПОКРЫТИЕМ БОЛЕЕ ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА)**

Сценарий развития (ограничения на объем инвестиций), млрд. руб.	<i>F</i> , руб.	<i>a</i>	Граница области субаддитивности, <i>y</i> , млн. поездок в год
Нет инвестиций (сценарий нулевого развития)	2 001 090	6,07E-09	25,7
0.05	3 094 464	6,07E-09	25,7
0.1	2 001 090	5,88E-09	32,4
1	3 664 641	2,40E-09	35,6
2	4 142 190	1,83E-09	67,2
4	3 831 402	1,44E-09	72,9
8	5 966 606	9,2E-10	113,9
16	8 727 651	4,25E-10	202,7
24	9 942 458	2,76E-10	268,3
Нет ограничений на инвестиции (сценарий наибольшего развития)	9 984 612	2,73E-10	270,7

Таблица 18

**ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ КВАДРАТИЧНЫХ ФУНКЦИЙ ИЗДЕРЖЕК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ИНВЕСТИЦИЙ (ДОРОГИ С ПОКРЫТИЕМ ОБЫЧНОГО КАЧЕСТВА)**

Сценарий развития (ограничения на объем инвестиций), млрд. руб.	<i>F</i> , руб.	<i>a</i>	Граница области субаддитивности, <i>y</i> , млн. поездок в год
Нет инвестиций (сценарий нулевого развития)	3 105 489	6,05E-09	22,6
0.05	523 988	6,00E-09	19,1
0.1	2 177 702	5,98E-09	9,3
1	1 692 452	2,5E-09	26,0
2	192 821	2,22E-09	9,3
4	2 317 454	1,49E-09	39,5
8	5 153 197	9,38E-10	74,1
16	8 722 230	4,07E-10	146,4
Нет ограничений на инвестиции (сценарий наибольшего развития)	9 467 037	3,21E-10	171,7

Как и ожидалось, с ростом вложений в развитие сети (увеличением объема инвестиций) параметр *F* (условно-постоянные издержки) растет, а параметр *a* при квадратичном члене (отражающий изменение переменных издержек) падает, что свидетельствует о замедлении роста издержек, а также, согласно теории, о расширении области субаддитивности отраслевой функции издержек. Преимущественно такой характер носят расчетные данные в правом столбце табл. 17 и 18, указывающие границу области субаддитивности моделируемой функции издержек, а, значит, и область естественной монополии для данной сети. Детальнее характеристики области субаддитивности будут рассмотрены ниже.

По итогам эконометрического моделирования были построены (также средствами Eviews) графики моделей функций издержек для всех рассматриваемых сценариев. Для удобства анализа результатов моделирования и визуального сравнения их с исходными данными на рис. 6 и рис. 7 представлены – для примера – графики моделей функций издержек для тех же выбранных четырех сценариев развития, что и на рис. 3 и 4.

Соответственно, рис. 6 относится к автодорожной сети, развиваемой по более инновационному варианту, а рис. 7 – к сети, развиваемой по менее инновационному варианту. Графики моделей агрегированных функций издержек для данной автодорожной сети представляют выпуклые вниз параболы, как и для исходных данных издержек, причем заметно резкое снижение издержек, особенно при максимальной нагрузке – по мере роста объемов инвестиций в развитие сети.

**Оценка экономии от масштаба**

Для анализа естественно-монопольных свойств в рамках нормативной идентификации однопродуктовой естественной монополии (т.е. путем проверки соответствующей функции издержек на субаддитивность) используются значения такого технологического детерминанта, как *S* – индикатора экономии от масштаба. В данном разделе представлены значения технологического детерминанта *S*, рассчитанные, исходя из построенной функции издержек, для всех объемов выпуска данной автодорожной сети (от 0,4 до 231 млн. поездок в год) по следующей модели:

$$S = \frac{AC}{MC} = \frac{\frac{F}{y} + ay}{2ay} = \frac{F}{2ay^2} + \frac{1}{2}.$$

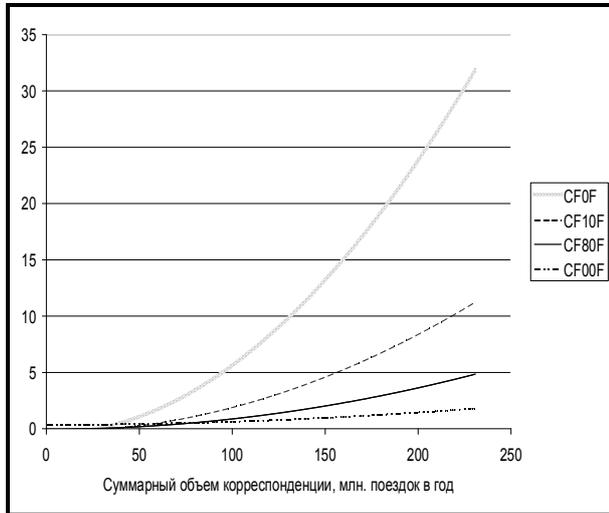
Для анализа полученных результатов были построены семейства кривых *S* по всем рассматриваемым сценариям развития автодорожной сети и вариантам модернизации ее звеньев, но в иллюстративных целях на рисунках приведены графики, соответствующие лишь выбранным выше четырем сценариям. Так, на рис. 8 представлено семейство кривых экономии от масштаба для сети, развиваемой по более инновационному варианту, и на рис. 9 представлено аналогичное семейство кривых – для сети, развиваемой по менее инновационному варианту.

Выбранный технологический детерминант, как известно, строго идентифицирует область субаддитивности в однопродуктовом случае только при значениях *S* > 1, допускает область субаддитивности в некотором диапазоне *S* < 1, но может служить для оценки эффективности работы сети в терминах изменений затратной эластичности по выпуску.

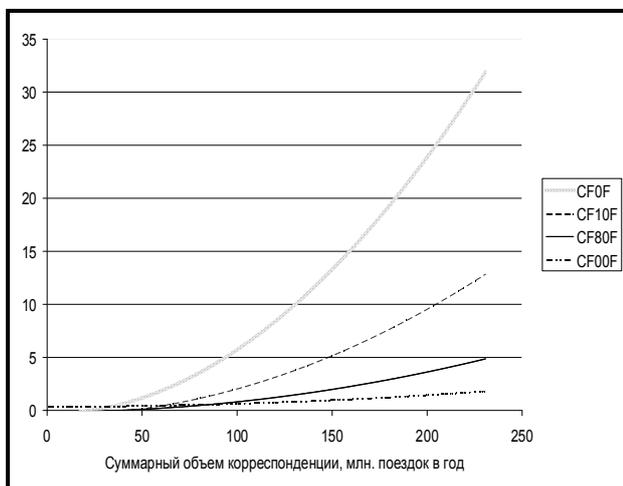
Визуальный анализ приведенных графиков показывает, что область, в которой *S* > 1, наблюдается и для дорог с покрытием более высокого качества, и для дорог с обычным покрытием. Детальный анализ графиков, отвечающих всем рассматриваемым сценариям, позволяет интерпретировать полученные результаты следующим образом.

Для более инновационного варианта развития для сценариев при 24 млрд. руб. и «без ограничения на инвестиции» область с *S* > 1 заканчивается в районе 120 млн. поездок в год, и составляет примерно 50% от максимальной загрузки сети. При этом необходимо отметить, что области, в которых *S* превышает единичное значение, практически одинаковы для этих

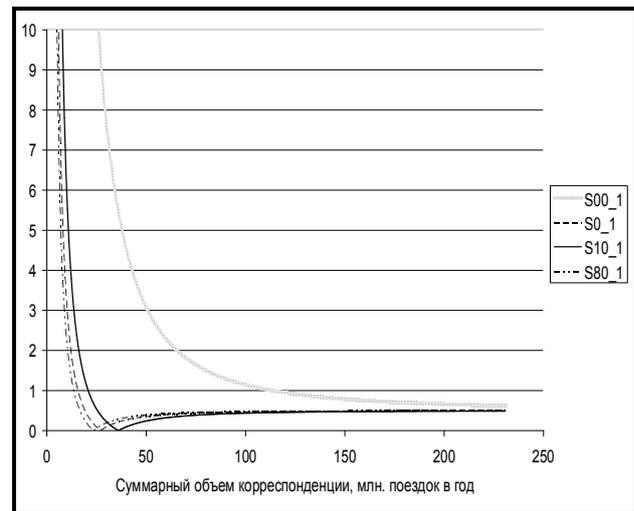
сценариев, и это можно объяснить, если вернуться к анализу исходных данных. Действительно, анализ исходных данных показывает, что максимальный объем инвестиций, который потребляет данная автодорожная сеть в сценарии «без ограничения на инвестиции» составляет 26 млрд. руб., что очень близко к 24 млрд. руб. и объясняет полученную близость результатов.



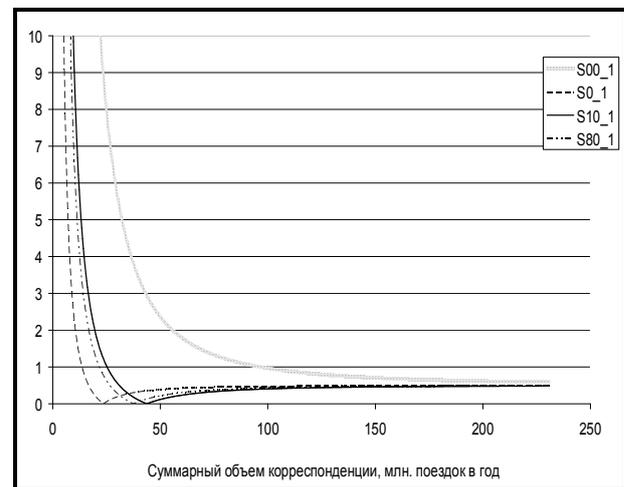
**Рис. 6.** Графики моделей квадратичных функций издержек при различных уровнях ограничений на инвестиции (дороги с покрытием более высокого качества). По оси ординат совокупные издержки в десятках млрд.руб., по оси абсцисс суммарный объем корреспонденции млн поездок в год. Ограничения на инвестиции (различные сценарии), млрд. руб.: CF0F – нет инвестиций; CF10F – 1; CF80F – 8; CF00F – нет ограничений на объем инвестиций



**Рис. 7.** Графики моделей квадратичных функций издержек при различных уровнях ограничений на инвестиции (дороги с покрытием обычного качества). По оси ординат совокупные издержки в десятках млрд.руб., по оси абсцисс суммарный объем корреспонденции, млн. поездок в год. Ограничения на инвестиции (различные сценарии), млрд. руб.: CF0F – нет инвестиций; CF10F – 1; CF80F – 8; CF00F – нет ограничений на объем инвестиций



**Рис. 8.** График экономии от масштаба S для автодорожной сети, состоящей из дорог с покрытием более высокого качества. Ограничения на инвестиции (различные сценарии), млрд. руб.: S0\_1 – нет инвестиций; S10\_1 – 1; S80\_1 – 8; S00\_1 – нет ограничений на объем инвестиций



**Рис. 9.** График экономии от масштаба S для автодорожной сети, состоящей из дорог с покрытием обычного качества. Ограничения на инвестиции (различные сценарии), млрд. руб.: S0\_1 – нет инвестиций; S10\_1 – 1; S80\_1 – 8; S00\_1 – нет ограничений на объем инвестиций

Для сценария 16 млрд. руб. область, в которой S превышает единичное значение, заканчивается в районе 80 млн. поездок в год, что составляет примерно 35% от максимальной нагрузки на сеть; для остальных сценариев от 8 млрд. руб. до сценария нулевого развития «без инвестиций» область, в которой S превышает единичное значение, постепенно снижается от 30 до 20 млн. поездок в год, что составляет около 10-15% от максимальной нагрузки на сеть. Также необходимо отметить, что для всех представленных сценариев в области, где технологический детерминант S уже не принимает значений, превышающих единицу, он постепенно снижается и стабилизируется примерно на уровне 0,5, сохраняя это значение до максимальной нагрузки на сеть (231 млн. поездок в год).

Относительно дорог с покрытием обычного качества для сценария «без ограничения на инвестиции» область с  $S > 1$  заканчивается также в районе 120 млн. поездок в год, и составляет примерно 50% от максимальной загрузки сети. Для сценария 16 млрд. руб. область, в которой  $S$  превышает единичное значение, заканчивается в районе 75 млн. поездок в год, что составляет примерно 30% от максимальной нагрузки на сеть; для остальных сценариев – от 8 млрд. руб. до сценария «без инвестиций» – область, в которой  $S$  превышает единичное значение, постепенно снижается от 30 до 20 млн. поездок в год, что составляет около 10-15% от максимальной нагрузки на сеть. Как и для дорог с покрытием более высокого качества, для менее инновационного варианта вне области, где  $S > 1$ , характерна стабилизация значения этого технологического детерминанта около 0,5.

Именно в указанной выше области, где технологический детерминант  $S$  превышает единичное значение или близок к нему, можно предполагать выполнение естественно-монопольных свойств, сохранение или незначительное нарушение формального условия субаддитивности агрегированной общесетевой функции издержек. По крайней мере, можно считать работу развиваемой сети достаточно эффективной в том смысле, что, как показывает обратная к  $S$  величина затратной эластичности, увеличение объема перевозок на 1% сопряжено с меньшим, чем на 1%, или примерно таким же ростом совокупных издержек.

Проведенный анализ показывает, что более развитая сеть (с большим объемом вложенных инвестиций, в том числе, возможно, и на создание некоторых резервов пропускной способности) в заметно большей области будет обладать растущей экономией от масштаба и оставаться устойчивой естественной монополией. При этом, как показывают результаты расчетов, загрузка хорошо развитой сети может не приводить к потере естественно-монопольных свойств в достаточно широкой области.

Для выявления естественно-монопольных свойств сети в области, в которой  $S$  уже не принимает значение больше единицы, необходимо дополнительное исследование. Требуется анализ технологического детерминанта  $SC$  – экономии от структуры, положительное значение которого в однопродуктовом случае однозначно идентифицирует естественную монополию, либо непосредственный аналитический анализ области субаддитивности, возможность которого в данном случае обеспечивается за счет выбора квадратичной функциональной формы.

**Оценка экономии от структуры**

Здесь уместно напомнить, что, несмотря на сложность идентификации естественной монополии в общем случае, когда требуется тестирование значений целой системы технологических детерминант и анализ их динамики, в данном случае, когда моделирование ограничено обоснованным выбором данной функциональной формы, имеется возможность упрощенного аналитического определения области субаддитивности.

Действительно, если функция затрат выпукла и имеет вид:

$$C(y) = F + ay^2 \text{ для } y > 0,$$

нетрудно показать, что кривая средних издержек имеет U-образный вид: снижается при  $0 < y < \sqrt{F/a}$  и возрастает при  $y > \sqrt{F/a}$ .

Однако, эта функция затрат остается субаддитивной в большей области, до  $y = \sqrt{kF/a}$ .

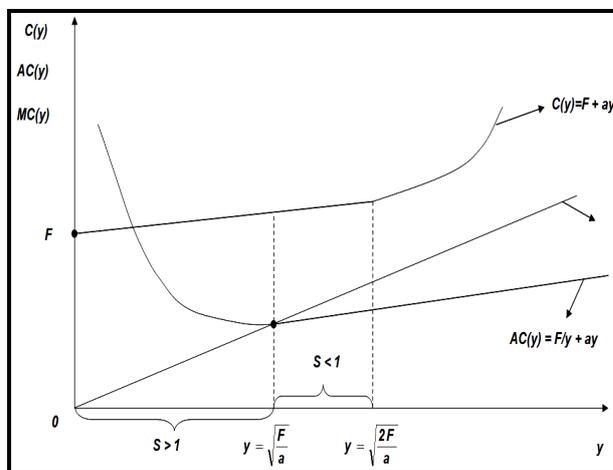
Данное граничное значение легко вычисляется, если учесть, что при любом количестве  $k$  фирм в отрасли имеет место соотношение:

$$kC(y/k) = kF + ay^2/k > F + ay^2$$

для любых  $y < \sqrt{kF/a}$ . (см. рис. 10 при  $k = 2$ ).

Именно это выражение использовано в расчетах области субаддитивности, исходя из эконометрически определяемых параметров  $F$  и  $a$  агрегированной общесетевой функции издержек. Соответствующее значение  $y$  определяет границу области субаддитивности для разных сценариев и приведено в табл. 17 и 18.

Отметим, что область допустимых объемов выпуска  $y$  (на которые еще имеется спрос) может оказаться шире области, идентифицируемой с помощью снижения средних издержек и законодательно определяющей область естественной монополии. При этом область снижения средних издержек, как нетрудно показать, совпадает и с областью, где  $S > 1$ . Следовательно, растущая экономия от масштаба иногда может определять только часть допустимой области  $y$ , где  $C(y)$  – субаддитивна, и соответствующая отрасль является естественной монополией с позиций современной теории; именно в этом смысле условие  $S > 1$  является достаточным, но не необходимым условием естественной монополии. Как известно, естественным монополиям могут соответствовать и выпуклые, и вогнутые (для которых всюду в допустимой области  $S > 1$ ) функции затрат с определенным характером их роста.

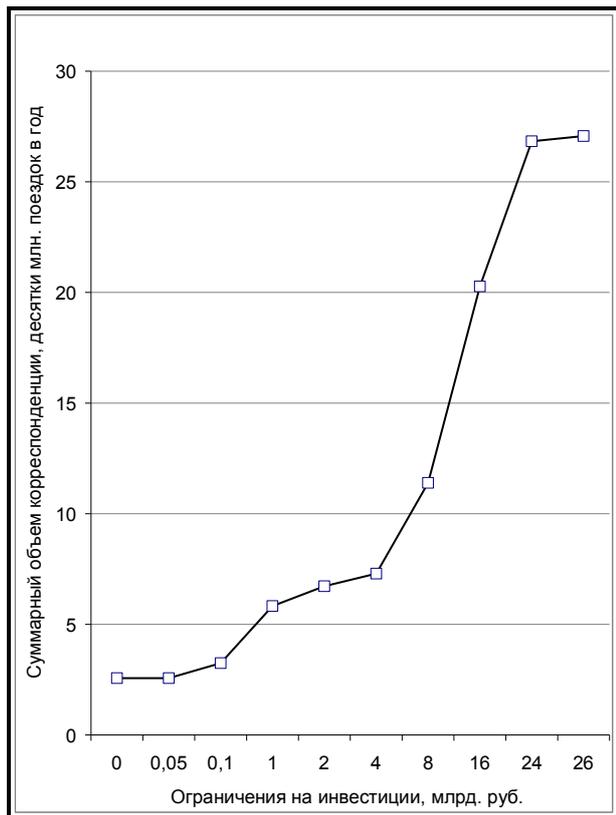


**Рис. 10. Вид однопродуктовой функции издержек, субаддитивной в более широкой области, чем область, где  $S > 1$ . Кривые средних и предельных издержек**

Данные вычисления иллюстрируют также и то положение, что если  $S(y) > 1$ , то и  $SC(y) > 0$ , т.е. для таких  $y$ , где имеет место растущая экономия от масштаба, проявляется и экономия от структуры, однако, обратно не верно (из наличия экономии от структуры не следует факт растущей экономии от масштаба). Соответственно, рассчитанная в предыдущем разделе рас-

тушая экономия от масштаба может определять только часть допустимой области  $y$ , где  $C(y)$  – субаддитивна, и соответствующая сеть обладает свойствами естественной монополии.

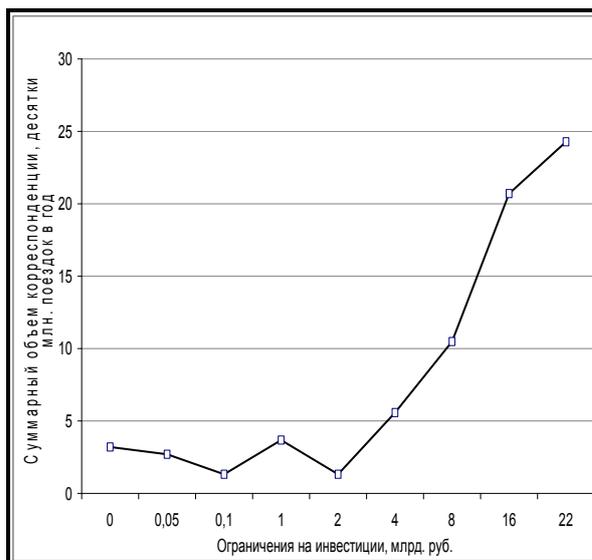
Результаты расчетов границ области субаддитивности, исходя из соответствующих параметров эконометрической модели агрегированной общесетевой функции издержек для различных сценариев развития сети и вариантов модернизации ее звеньев, приведенные ранее в табл. 17 и 18, представлены также и в виде графиков. Так, на рис. 11 можно наблюдать изменения области субаддитивности для первого (более инновационного) варианта развития сети в зависимости от объема вложенных в развитие сети инвестиций, а на рис. 12 приведен аналогичный график для второго (менее инновационного) варианта.



**Рис. 11. Зависимость границы области субаддитивности от объемов выделяемых на развитие сети инвестиций (дороги с покрытием более высокого качества)**

Визуальный анализ приведенных графиков позволяет интерпретировать полученные результаты следующим образом. В целом характер расширения области субаддитивности (в данном однопродуктовом случае – области положительных значений экономии от структуры  $SC$ ) соответствует изменениям экономии от масштаба  $S$ , и конфигурация области с нарушением субаддитивности, где  $SC < 0$  и исчезают свойства естественной монополии, почти повторяет очертания выделенной при анализе  $S$  области неэффективности, где  $S$  меньше единицы. Необходимо отметить, что, как и в п. 3.1., полученные результаты расчетов также хорошо согласуются с теорией, согласно которой область субаддитивности по суммарной загрузке сети может быть шире области, в

которой имеет место растущая экономия от масштаба, т.е.  $S > 1$ , и, следовательно, естественная монополия сохраняется и в некоторой большей области при  $S < 1$ .



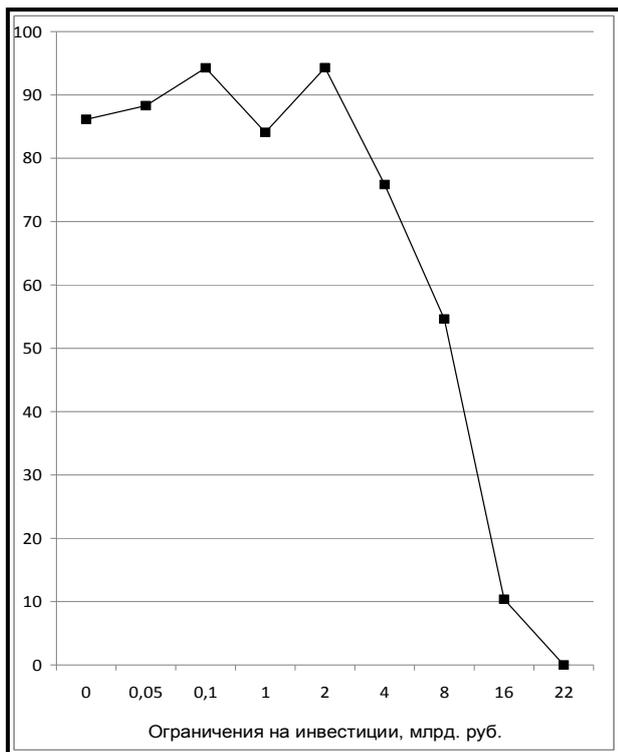
**Рис. 12. Зависимость границы области субаддитивности от объемов выделяемых на развитие сети инвестиций (дороги с обычным покрытием)**

Интересно отметить, что по результатам эконометрического моделирования функции издержек для первого варианта развития сети характерен более монотонный рост области субаддитивности в зависимости от объема инвестиций, в то время как для второго варианта характерен резкий, практически скачкообразный рост области субаддитивности при ограничении на инвестиции от 4 до десятков млрд. руб. Очень хорошо это заметно на рис. 13, на котором изображен график, отражающий нарушения области субаддитивности и показывающий, сколько процентов от максимальной загрузки сети не входят в зону субаддитивности для каждого сценария развития. Аналогичный график для первого варианта развития сети приведен на рис. 14.

Если сравнить результаты, полученные для различных вариантов, то видно, что область субаддитивности для второго варианта развития сети (дороги с обычным покрытием) получается более узкой и расширяется медленнее в зависимости от объема вложенных в развитие сети инвестиций. Подчеркнем, что первый вариант является более инновационным, и полученные результаты подтверждают – развитие звеньев до состояния более дорогих дорог (с покрытием лучшего качества) позволяет создать некоторый резерв пропускной способности для представленной автодорожной сети, благодаря более высокому классу технического состояния ее элементов. Как следствие, полученная сеть в большей области сохраняет естественно-монопольные свойства.

Таким образом, на основе построенной модели функции издержек для автодорожной подсистемы (на примере фрагмента сети дорог Российской Федерации) с использованием возможностей эконометрического пакета Eviews были рассчитаны такие технологические детерминанты, как экономия от масштаба и экономия от структуры и построены соответствующие графики. Анализ этих технологических детерминант позволяет вы-

делить область загрузок для данной автодорожной сети, для которой сеть функционирует в зоне эффективности в том смысле, что по мере роста загрузки сети совокупные издержки растут медленнее. Кроме того, анализ значений показателя экономии от структуры или доступный для однопродуктового случая непосредственный аналитический расчет с использованием параметров построенной эконометрической модели позволяет находить область загрузок, в которой отраслевая функция для данной сети является субаддитивной. В этой области сетевая структура является естественной монополией и отвечает минимальным издержкам на удовлетворение выявленного объема спроса на перевозки с учетом возможностей развития сети.

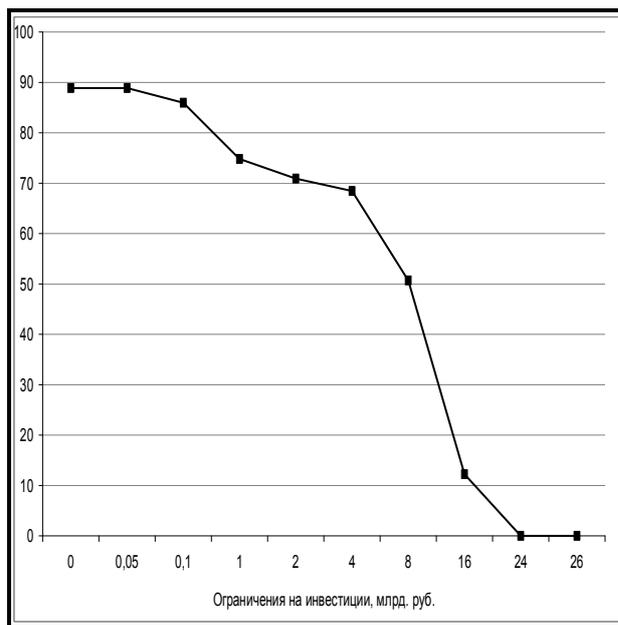


**Рис. 13. Характеристика нарушения области субаддитивности (дороги с обычным покрытием)**

Проведем сравнительный анализ значений технологических детерминант при различных способах их расчета, а именно оценки дискретных аналогов экономии от масштаба и экономии от структуры, приведенных в п. 3.1, когда функция издержек задается таблично, и аналогичных оценок, приведенных в п. 3.2 при эконометрическом моделировании агрегированной общесетевой функции издержек для той же допустимой области суммарных загрузок сети (объемов спроса).

Анализ экономии от масштаба показывает, что при эконометрическом моделировании зона эффективности, где  $S > 1$  получается заметно меньше, несмотря на сохранение общих тенденций. Так, экономия от масштаба при обоих способах расчета имеет одинаковый характер для сценария развития с ограничением на инвестиции в 24 млрд. руб. и без ограничений для дорог с покрытием более высокого качества. В области, где  $S < 1$  значение стабилизируется на уровне 0,5, и эта тенденция также сохраняется при обоих способах расчетов. Интересно отметить, что при эконометрическом моделировании (для рассматриваемой транспортной сети) заметно су-

жается область, в которой можно предполагать выполнение естественно-монопольных свойств, причем именно для сценариев с большим уровнем инвестиций.



**Рис. 14. Характеристика нарушения области субаддитивности (дороги с покрытием более высокого качества)**

Для того, чтобы объяснить эту тенденцию необходимо вернуться к анализу графиков исходных данных (рис. 3 и 4), из которых видно, что принятая гипотеза о квадратичной форме функции издержек лучше всего выполняется для сценариев с маленьким уровнем инвестиций, и соответственно хуже для сценариев с большими инвестициями или вообще без ограничений на инвестиции. Возможно, это и является причиной расхождения полученных результатов. Большие значения экономии от масштаба на начальных этапах развития сети при эконометрическом расчете, по сравнению с результатами п. 3.1, также объясняются выбором одной функциональной формы функции издержек для всей области определения и дискретностью представления данных при генерации. Что касается сценариев с низким уровнем инвестиций, то тут расхождения в оценках по различным методам незначительны.

При анализе экономии от структуры наиболее существенное отличие наблюдается для дорог с обычным покрытием и сценария без ограничений на инвестиции. Метод эконометрического моделирования выявляет значительно большую область положительной экономии от структуры, а значит и область выполнения свойства субаддитивности. Однако, результаты, представленные в табл. 4 в п. 3.1, показывают, что полученная в расчетах экономия от структуры для данного сценария при большом объеме корреспонденций принимает отрицательные значения (от -0,01 до -0,05), что в свою очередь очень близко к нулевому граничному значению, а значит расхождения при различных способах расчета совсем невелики.

В целом можно отметить, что оба способа расчета технологических детерминант, результаты по которым приведены в п. 3.1 и в п. 3.2, практически одинаково (в пределах погрешности) определяют границы области

варьируемых объемных (спросовых и инвестиционных) показателей, в которой сохраняются (или нарушаются из-за перегруженности) свойства естественной монополии при оптимизации развития транспортной сети в условиях растущего спроса.

## Литература

1. Белоусова Н.И. Вопросы теории государственного регулирования и идентификации естественных монополий [Текст] / Н.И. Белоусова, Е.М. Васильева. – М. : КомКнига, 2006. – 320 с.
2. Белоусова Н.И. и др. Информационная технология синтеза сложных сетевых структур нестационарной российской экономики: модели, алгоритмы, программная реализация [Текст] / Н.И. Белоусова, С.П. Бушанский, Е.М. Васильева, В.Н. Лившиц, Э.И. Позамантир // Аудит и финансовый анализ. – М. : 1с: компьютерный аудит, 2008. – Вып. 1. – С. 50-88.
3. Белоусова Н.И. и др. Моделирование оценки естественно-монопольных эффектов синергии сетевых инфраструктурных подсистем [Текст] / Н.И. Белоусова, Е.М. Васильева, В.Н. Лившиц // Труды IV междунар. школы-симпозиума АМУР : анализ, моделирование, управление, развитие. – Севастополь, 2010. – Сентябрь. – С. 37-42.
4. Белоусова Н.И. и др. Моделирование оценок эффективности в задачах структурного регулирования естественно-монопольных корпораций [Текст] / Н.И. Белоусова, Е.М. Васильева, В.Н. Лившиц // Труды XI междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества. – М. : Изд. дом Высшей школы экономики, 2011. –Т. 1. – С. 303-312.
5. Белоусова Н.И. и др. Совершенствование теоретических основ, моделей и методов оптимизации развития сети автомобильных дорог [Текст] / Н.И. Белоусова, С.П. Бушанский, Е.М. Васильева, В.Н. Лившиц, Э.И. Позамантир // Сборник научных трудов : приложение к журналу «Аудит и финансовый анализ». – М. : 1с: Компьютерный аудит, 2004. – Вып. 3. – С. 114-204.
6. Белоусова Н.И. и др. Теоретические проблемы реформирования естественных монополий в России: модели и методы структуризации [Текст] / Н.И. Белоусова, Е.М. Васильева, В.Н. Лившиц ; препринт ; ИСА РАН. – М., 1998. – 85 с.
7. Васильева Е.М. Формирование оценок эффективности естественно-монопольных производственных систем [Текст] / Е.М. Васильев. – М. : Либроком, 2008. – 176 с.
8. Васильева Е.М. и др. Нелинейные транспортные задачи на сетях [Текст] / Е.М. Васильева, Б.Ю. Левит, В.Н. Лившиц. – М. : Финансы и статистика, 1981. – 104 с.
9. Левит Б.Ю. Нелинейные сетевые транспортные задачи [Текст] / Б.Ю. Левит, В.Н. Лившиц. – М. : Транспорт, 1972. – 144 с.
10. Лившиц В.Н. Выбор оптимальных решений в технико-экономических расчетах [Текст] / В.Н. Лившиц. – М. : Экономика, 1971. – 255 с.
11. Стенбринк П. Оптимизация транспортных сетей [Текст] / П. Стенбринк ; пер. с англ. Е.М. Васильевой, В.В. Космина ; под ред. В.Н. Лившица. – М. : Транспорт, 1981. – 320 с.
12. Baumol W.J., Panzar J.C., Willig R.D. Contestable markets and the theory of industry structure. – N.Y., 1982. – 497 p.
13. Gasmí F., Laffont J.J., Sharkey W.W. The natural monopoly test reconsidered: an engineering process-based approach to empirical analysis in telecommunications // International Journal of industrial organization. 2002. Vol. 20. Pp. 435-459.
14. Jara-Díaz S.R., Basso L.J. Transport cost function, network expansion and economic of scope // Transportation research. Part E39. 2003. Pp. 271-288.
15. Joscow P. Regulation of natural monopoly. Handbook of law and economics. 2007. Vol. 2.
16. Laffont J.-J., Tirole J. A theory of incentives in procurement and regulation. Cambridge : MIT Press, 1993. 1023 p.
17. Sharkey W. The theory of natural monopoly. Cambridge: Cambr. Univ. Press, 1982. 229 p.
18. Steenbrink P.A. Optimization of transport networks. Ed. John Wiley&Sons, 1974.

## Ключевые слова

Транспортные сети; эффективность перевозок; оптимизация развития; инвестиционное проектирование; естественные монополии; моделирование технологических детерминант; экономия от масштаба; экономия от структуры; функция издержек; информационная технология синтеза сложных сетевых структур.

*Лившиц Вениамин Наумович*

*Белоусова Наталия Ивановна*

*Бушанский Сергей Петрович*

*Васильева Елена Михайловна*

*Гук Сергей Николаевич*

## РЕЦЕНЗИЯ

В статье развивается проблематика, связанная с нелинейными сетевыми транспортными задачами, инвестиционным проектированием, моделями и методами теории естественной монополии. Представлены результаты исследований авторов по созданию информационной технологии синтеза сложных сетевых структур применительно к условиям нестационарной российской экономики, причем данная статья является непосредственным продолжением работ, опубликованных в журнале «Аудит и финансовый анализ» ранее: «Совершенствование теоретических основ, моделей и методов оптимизации развития сети автомобильных дорог» (2004, №3), «Информационная технология синтеза сложных сетевых структур нестационарной российской экономики: модели, алгоритмы, программная реализация» (2008, №1).

Статья посвящена моделированию технологических детерминант как характеристик эффективности грузовых и пассажирских перевозок по транспортной сети с учетом изменений ее топологической структуры, построению теоретических и расчетных моделей оценки соответствующих инвестиционных проектов развития транспортной сети, в том числе, в условиях ее перегруженности, что, безусловно, является актуальным для анализа экономической ситуации в нашей стране.

В центре внимания авторов данной статьи – разработка подходов к оценке важнейших технологических детерминант – экономии от масштаба и структуры транспортной сети, которые целесообразно использовать при решении целого ряда прикладных задач, связанных с оптимизацией развития транспортной сети и инвестиционным проектированием. Речь идет о решении таких вопросов, как: достаточно ли звеньев проектируемой транспортной сети для эффективной организации ее работы, в какой мере показатели эластичности издержек на перевозки и развитие сети могут служить характеристиками ее надежности в условиях растущего спроса и т.п.

В качестве замечания отметим, что, несмотря на принятые подходы к вариации параметров, недостаточно внимания уделяется способам учета неопределенности и риска при проектировании инвестиций в развитие сети.

В целом статья представляет интерес для экономистов, занимающихся инвестиционным проектированием, моделированием отраслей естественных монополий и их сетевых подсистем, специалистов в области транспортного планирования. Статья несомненно заслуживает положительного отзыва и может быть опубликована.

*Орлова Е.Р., д.э.н., зав. лаб. Института системного анализа Российской Академии наук*

### 3.8. DYNAMIC ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL DETERMINANTS FOR NATURAL MONOPOLY TRANSPORT NETWORKS UNDER OPTIMAL EXPANSION

V.N. Livshits, Dr. of Science (Economics), Professor,  
Chief of Department ISA RAS;

N.I. Belousova, Dr. of Science (Economics),  
Leading Researcher, ISA RAS ;

S.P. Bushansky, Doctor Ph. (Economics),  
Senior Researcher, CEMI RAS;

E.M. Vasilyeva, Dr. of Science (Economics),  
Leading Researcher, ISA RAS;

S.N. Huk, Graduate of ISA RAS

The problem of efficiency assessment on natural monopoly transport network design is considered. It's proposed to apply the system of technological determinants (economy of scale and economy of scope) and network interpretation of subadditivity is formulated. Informational technology of synthesis of complex network structures is used for modeling of aggregate transport cost function subject to increasing transportation demand. The results of optimization procedures for real transport network are represented.

#### Literature

1. N. Belousova, E. Vasilyeva, V. Livshits. Theoretical problems of Russian natural monopoly reforms: models and technique of structurization. Preprint. ISA RAS. -M., 1998, 85 p.
2. N. Belousova, S. Bushansky, E. Vasilyeva, V. Livshits, E. Posamantier. Development of theoretical foundation, models and optimization algorithms for road network design. *Audit and Financial Analysis*, 2004, N3, p. 114-204.
3. N. Belousova, E. Vasilyeva. Issues of state regulation and natural monopoly identification.. M., Komkniga Publishing House, 2006, 320 p.
4. N. Belousova, S. Bushansky, E. Vasilyeva, V. Livshits, E. Posamantier. Informational technology of synthesis of complex network structures: models, algorithms, programs. *Audit and Financial Analysis*, 2008, №1, p. 50-88
5. N. Belousova, E. Vasilyeva, V. Livshits. Natural monopoly synergy network effects of infrastructure subsystems. Proceedings of IV International symposium «Analysis, Modeling, Management, Development», September 2010, Sevastopol, p. 37-42.
6. N. Belousova, E. Vasilyeva, V. Livshits. Efficiency assessment modeling for natural monopoly structure regulation. Proceedings of XI International scientific conference on the problems of economy and society development. M., HSE Publishing House, 2011, Vol. 1, p. 303-312.
7. E. Vasilyeva Forming of natural monopoly efficiency assessment for industrial subsystems. M., LIBROKOM Publishing House, 2008, 176 p.
8. E. Vasilyeva, B. Levit, V. Livshits. Nonlinear transportation problems for networks. M., Finance and Statistics Publishing House, 1981, 104 p.
9. B. Levit, V. Livshits. Network nonlinear transportation problems. M., Transport Publishing House, 1972, 144 p.
10. V. Livshits. Optimal decision making in technical-economic evaluations. M., *Economica*, 1971, 255p.
11. P. Stenbrink. Optimization of Transport Networks. Translation from English by E. Vasilyeva, V.Kosmin, ed.- V. Livshits.- M., Transport, 1981. – 320 p.
12. W.J. Baumol, J.C. Panzar, R.D. Willig. Contestable Markets and the Theory of Industry Structure. – N.Y., 1982, 497 p.
13. F. Gasmi, J.J. Laffont, W.W. Sharkey. The natural monopoly test reconsidered: an engineering process-based approach to empirical analysis in telecommunications. *International Journal of Industrial Organization*, 2002, No. 20, P. 435-459.
14. S.R. Jara-Diaz, L.J. Basso. Transport cost function, network expansion and economic of scope // *Transportation Research Part E* 39, 2003, p. 271-288.
15. P. Joscow. Regulation of Natural Monopoly. *Handbook of Law and Economics*, Volume 2, Ed. by A.Mitchell Polinsky and Steven Shavell, 2007, Elsevier B.V., p. 1227-1348.
16. Laffont J-J, J. Tirole. *A Theory of Incentives in Procurement and Regulation*. – Cambridge: MIT Press, 1993, 1023 p.
17. W. Sharkey. *The Theory of Natural Monopoly*. – Cambridge : Cambr. Univ. Press, 1982, 229 p.
18. P.A. Steenbrink. *Optimization of Transport Networks*. Ed. John Wiley&Sons, 1974. 351 p.

#### Keywords

Transport network; efficiency assessment; optimization network expansion; investment project; natural monopoly; models of technological determinants; economy of scale; economy of scope; transport cost function; informational technology of synthesis of complex network structures.