

УДК 656.223.2

Д. Н. КОЗАЧЕНКО^{1*}, Б. В. ГЕРА^{2*}, В. В. СКАЛОЗУБ^{3*}, Ю. Н. ГЕРМАНЮК^{4*}

^{1*} Научно-исследовательская часть, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта kozachenko@upr.dit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

^{2*} Каф. «Транспортные технологии», Львовская филия Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И. Блажкевич 12а, г. Львов, Украина, тел. +30 (032) 267-99-74, эл. почта gera-zen@ukr.net

^{3*} Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 373-15-35, эл. почта skalozub_vl_v@mail.ru, ORCID 0000-0002-1941-4751

^{4*} Каф. «Транспортные технологии», Львовская филия Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И. Блажкевич 12а, г. Львов, Украина, тел. +30 (032) 267-99-74, эл. почта hermanjuk@yandex.ua, ORCID 0000-0002-4905-8313

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУЗОПОТОКОВ НА НАПРАВЛЕНИЯХ ТРАНЗИТНЫХ ПЕРЕВОЗОК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ В МЕЖДУНАРОДНОМ СООБЩЕНИИ

Цель. Целью исследования является построение математической модели распределения грузопотоков на железнодорожных сетях в условиях, когда имеет место конкуренция между отдельными элементами сети за грузопотоки. **Методика.** Решение задачи выполнено с использованием методов теории графов и теории игр. **Результаты.** В качестве модели железнодорожной сети использован ориентированный параметрический граф, вершинам которого в соответствие поставлены пункты погрузки и выгрузки, а также транзитные пункты; дугам в соответствие поставлены железнодорожные участки между вершинами. На графе задаются объемы погрузки, выгрузочные способности, стоимости грузов в начальных и конечных пунктах, стоимости перевозки и пропускные способности дуг. В процессе организации перевозок грузов принимают участие активные субъекты двух типов: грузоотправители и грузоперевозчики. Выбор маршрута перевозки отдельным грузоотправителем осуществляется из условия получения максимальной прибыли на основании решения задачи поиска кратчайших расстояний. Выбор стоимостей перевозки отдельными перевозчиками осуществляется с учетом конкурирующих предложений других перевозчиков путем решения задачи бескоалиционных матричных игр. **Научная новизна.** Научная новизна работы состоит в усовершенствовании методов оценки распределения грузопотоков по железнодорожной сети на основании использования методов теории игр. **Практическая значимость.** Результаты работы могут использоваться для создания системы поддержки решений для оценки тарифов, технических и технологических решений, принимаемых в сфере международных транзитных перевозок железнодорожным транспортом.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; международные перевозки; теория игр; транспортные потоки, конкуренция.

Введение

Одним из основных перевозчиков грузов в международном сообщении на территории Восточной Европы является железнодорожный транспорт. Железные дороги позволяют выполнять перевозки значительных объемов грузов с мест их добычи или производства в места их потребления или перевалки на другие виды транспорта. Страны с развитой железнодорожной сетью рассматривают транзитные железнодорожные перевозки как одно из основных направлений экспорта транспортных услуг.

Характерным отличием перевозок грузов в международном сообщении от перевозок во

внутригосударственном сообщении является наличие конкуренции между отдельными элементами транспортной системы за грузопотоки. Достаточно показательным примером таких перевозок является доставка сырьевых грузов железнодорожным транспортом из Российской Федерации в порты Черного и Балтийского моря. На этих направлениях возможны перевозки с участием транзитных железных дорог Украины, Литвы, Латвии, Эстонии, Белоруссии, каждая из которых заинтересована в привлечении транзитных грузопотоков. В этой связи исследования, выполняемые с целью повышения конкурентоспособности и эффективности транзитных перевозок, являются актуальными для

железнодорожного транспорта.

Тематике международных железнодорожных перевозок посвящено значительное число научных работ. Большое внимание при этом уделяется формированию транспортных коридоров и снижению себестоимости доставки грузов по ним. В частности в [14] представлен проект OPTIRAIL, направленный на повышение доступности железнодорожного транспорта, улучшения взаимодействия при пересечении границ, повышения эффективности международных перевозок. Задачи согласованного развития элементов транспортных коридоров рассмотрены в [1, 15]. В работах [3, 4, 10] международные перевозки грузов рассмотрены с позиции грузоотправителей, которые выполняют поиск маршрутов перевозок таким образом, чтобы минимизировать свои логистические расходы. Железные дороги, обслуживающие международные перевозки, находятся в состоянии конкуренции как с автомобильными и морскими транспортными путями, так и между собой [3, 16]. Конкурентоспособность их услуг зависит от множества факторов, таких как стоимость и сроки доставки грузов на маршруте, пропускная способность, безопасность перевозок и др. Наличие альтернативных маршрутов перевозок приводит к тому, что менеджеры железнодорожной инфраструктуры должны устанавливать стоимость своих услуг с учетом стоимости услуг других участников процесса перевозок. Решение задач подобного класса выполняется методами теории игр. Примеры задач моделирования процессов в транспортных системах с помощью методов теории игр приведены в статьях [7, 9, 11, 18]. Значительное число научных работ посвящено проблеме ценовой конкуренции и планирования развития конкурирующих портов. В частности такие задачи рассмотрены в [8, 12, 13, 17]. Анализ представленных работ показывает, что методы теории игр позволяют учитывать особенности функционирования транспортных систем в условиях конкурентной борьбы. Необходимо также отметить, что функционирование железнодорожной сети при организации международных перевозок имеет особенности, поскольку на конкурентоспособность отдельных участников перевозочного процесса существенно влияет их географическое положение и топология сети. Поэтому рассматриваемая проблема требует дальнейшего исследования.

Цель

Целью исследования является построение математической модели распределения грузопотоков в железнодорожных транспортных сетях в условиях конкуренции между отдельными их элементами за грузопотоки.

Методика

В качестве модели железнодорожной сети используется параметрический ориентированный граф $G(V, E)$. Вершинам графа V соответствуют пункты погрузки V_s и выгрузки V_d грузов, а также транзитные пункты V_t , на которых происходит изменение условий продвижения грузопотоков. Вершинам $v_{sj} \in V_s$ в соответствие поставлены запасы грузов $a_j > 0$ в пунктах погрузки ($j = \overline{1; J}$). Вершинам $v_{dk} \in V_d$ в соответствие поставлены максимальные объемы грузов, которые могут быть выгружены в пунктах выгрузки $b_k > 0$ ($k = \overline{1; K}$). Кроме того, вершинам v_{sj} и v_{dk} в соответствие поставлены стоимости грузов в пунктах погрузки P_{sj} и выгрузки P_{dk} ($j = \overline{1; J}$, $k = \overline{1; K}$).

Стоимости перевозок по транспортной сети, представленной оргграфом $G(V, E)$, заданы на каждой дуге $e_{gq} \in E$ и обозначаются через c_{gq} (здесь g и q – соответственно, начальная и конечные вершины дуги). Кроме того дугам графа в соответствие может быть поставлена пропускная способность d_{gq} . Направление дуг определяет направление перевозок между вершинами.

Стоимости перевозок на отдельных (управляемых) дугах устанавливаются перевозчиками и могут быть выбраны ими из дискретного множества C_{gq} – допустимых стоимостей, т.е. $c_{gq} \in C_{gq}$ ($e_{gq} \in E$), стоимости перевозок на прочих (неуправляемых) дугах фиксированы. При этом минимальная стоимость перевозки определяется себестоимостью услуги и минимальной ее рентабельностью, а максимальная стоимость перевозки определяется в соответствии с Договором о Международном железнодорожном транзитном тарифе [2].

Пример оргграфа, описывающего транспортную систему, представлен на рис. 1.

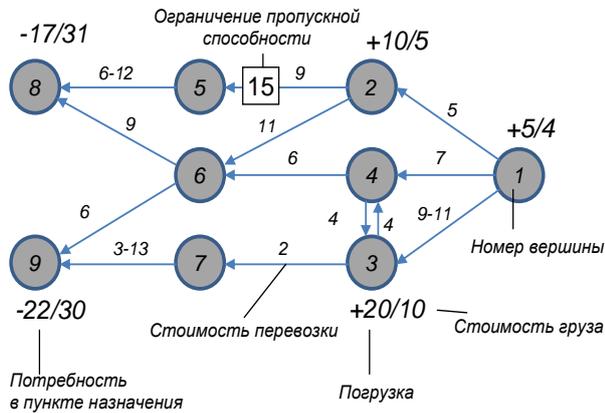


Рис. 1. Орграф транспортной сети с указанием числовых параметров для перевозок

В процессе организации перевозок грузов принимают участие активные субъекты двух типов: грузоотправители и грузоперевозчики.

Каждый грузоотправитель выбирает маршруты на транспортной сети из своего пункта погрузки в пункты выгрузки исходя из величины прибыли, которая для единицы груза определяется разницей между стоимостью груза в пункте назначения с одной стороны и стоимостью груза в пункте отправления и расходов на доставку – с другой. При этом маршрутом перевозок называется цепь дуг, соединяющая некоторую вершину v_{sj} отправления и вершину назначения v_{dk} . Между вершинами v_{sj} и v_{dk} может быть несколько маршрутов перевозок E_{jkm} , отличающихся перечнем дуг, входящих в их состав. Маршруты перевозки характеризуются стоимостью перевозки, которая определяется как общая стоимость перевозки всех дуг, входящих в маршрут

$$C_{jkm} = \sum_{e_{gq} \in E_{jkm}} c_{gq}.$$

В результате доставки грузов в пункты назначения грузоотправители получают прибыль, которая при перевозке единицы груза составляет

$$P_{jkm} = P_{dk} - P_{sj} - C_{jkm}. \quad (1)$$

Грузоотправитель отправляет грузы в пункты назначения в порядке уменьшения величины прибыли. Если прибыль принимает отрицательное значение, то груз в данный пункт отправления не перевозится.

В процессе распределения провозной способности перевозчиков и выгрузочной способности грузополучателей между грузоотправителями возможно возникновение дефицита.

Перевозчик устанавливает стоимость пере-

возок на участках в пределах от минимального до максимального значения, стремясь получить максимально возможную прибыль исходя из принятой им стоимости, а также возможных стоимостей перевозок у других перевозчиков. Принято, что преимущество использования дефицитных ресурсов имеют грузоотправители, получающие большую прибыль. При равной величине прибыли для разных грузоотправителей дефицитный ресурс распределяется между ними поровну.

Необходимо установить ценовую стратегию перевозчиков.

В начальном графе стоимости поставлены в соответствие как вершинам, так и дугам. Для упрощения дальнейших расчетов необходимо выполнить преобразование графа таким образом, чтобы стоимости были поставлены в соответствие только его дугам. С этой целью среди всех вершин v_s нужно выбрать вершину с минимальной стоимостью груза в пункте отправления P_{smin} . Для всех остальных вершин отправления добавить дуги со стоимостью перевозки $P_{sj} - P_{smin}$. Для вершин v_d необходимо определить вершину с максимальной стоимостью груза P_{dmax} . Для всех остальных вершин назначения добавить дуги со стоимостью перевозки $P_{dmax} - P_{dk}$.

Прибыли перевозчиков на преобразованном графе определяются как

$$P_{jkm} = P_{dmax} - P_{smin} - C_{jkm},$$

что эквивалентно выражению (1).

Транзитные вершины, которым инцидентны только два ребра, исключаются из сети. Стоимости перевозок объединяемых ребер суммируются. Необходимо отметить, что такой шаг соответствует согласованным действиям перевозчиков на некотором участке маршрута и несколько искажает решение, однако на данном этапе исследования данным фактом пренебрегаем. Преобразованный граф представлен на рис. 2.

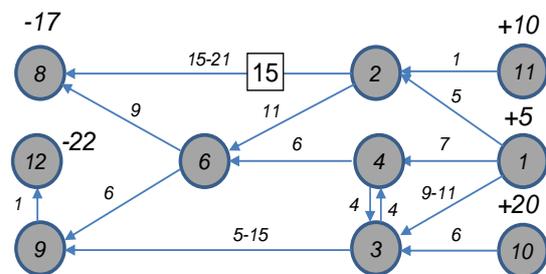


Рис. 2. Орграф транспортной сети после преобразования

Обозначим через x_{gq}^j количество груза, направляемого на участок сети представленный дугой e_{gq} из вершины j . Величины потоков на ребрах могут иметь только неотрицательные значения $x_{gq}^j \geq 0$.

Распределение грузопотоков на сети имеет ряд ограничений.

Количество груза, вывозимого из вершины j по всем инцидентным ей дугам e_{jq} , не должно превышать величину запаса грузов в данной вершине

$$a_j - \sum x_{gq}^j \geq 0, \quad j = \overline{1; J}$$

где $\sum x_{gq}^j$ – общий объем грузов, вывозимых из вершины j .

Количество груза, выгружаемого в вершине назначения, не должно превышать ее выгрузочной способности

$$b_k - \sum_{j=1}^J \sum x_{gk}^j + \sum_{j=1}^J \sum x_{kq}^j \geq 0, \quad \sum x_{gk}^j \geq \sum x_{kq}^j, \\ j = \overline{1; J}, \quad k = \overline{1; K}$$

где $\sum x_{gk}^j, \sum x_{kq}^j$ – соответственно, общий объем грузов отправленных из вершины j , ввозимых и вывозимых из вершины k .

Количество груза поступающего в промежуточную вершину t из вершины отправления j по всем инцидентным дугам e_{jt} должно быть равно количеству вывозимого из нее груза. Вершины отправления для грузопотоков из других вершин рассматриваются как транзитные

$$\sum x_{jt}^j - \sum x_{tq}^j = 0, \quad j = \overline{1; J}.$$

Количество груза, перевозимого по ребрам с ограниченной пропускной способности, не должно превышать величины этой пропускной способности

$$\sum_{j=1}^J \sum x_{gq}^j \leq d_{gq}.$$

Грузоотправители выбирают маршруты перевозок исходя из задачи получения максимальной прибыли, которая определяется выражением

$$\sum P_j = \sum_{m=1}^M \left(P_{d \max} - P_{s \min} - C_{jkm} \right) x_{jkm} \rightarrow \max$$

где $\sum C_{jkm}, x_{jkm}$ – соответственно, общая стои-

мость и объем перевозки груза между вершинами v_{sj} и v_{dk} по маршруту m .

Поскольку в пунктах выгрузки заданы конечные величины потребностей грузов b_k , то грузоотправители не могут определять маршруты своих перевозок независимо один от другого. Кроме того ограниченность пропускной способности не позволяет использовать выгодные для перевозки участки одновременно всем желающим. При этом может возникнуть конфликт интересов. Принято, что преимущество имеет пропуск той единицы груза, перевозка которой обеспечивает большую прибыль. В случае, если для некоторых пунктов назначения или дуг имеется несколько грузоотправителей с одинаковой величиной прибыли, выгрузочные и провозные способности распределяются между грузоотправителями в равных частях. Поиск оптимального маршрута перевозки для каждого грузоотправителя осуществляется с помощью метода поиска кратчайших путей на графе [5], модифицированного с целью учета ограничений выгрузочной способности вершин и пропускной способности дуг.

Перевозчики конкурируют между собой за перевозки с целью получить наибольшую возможную прибыль. Некоторые из них имеют возможность предложить разные стоимости перевозок. Пусть в сети имеется n таких перевозчиков. Изменим их сетевые обозначения тождественные дугам с двумя индексами, которые соответствуют номерам вершин начала и конца дуги, на порядковые обозначения h_i ($i = \overline{1; n}$). Таким образом, каждому перевозчику h_i в соответствии ставятся стоимости перевозок из множества $C_i \equiv \{c_1, c_2, \dots, c_{u_i}\}$. После выбора грузоотправителями маршрутов перевозки оценивается прибыль перевозчиков. В частности перевозчик h_i , обслуживающий участок представленный дугой e_{gq} , рассчитывает на прибыль

$$\Lambda_i^* = c_{gq}^* x_{gq}^*, \quad h_i \sim e_{gq}. \quad (5)$$

Всевозможные ценовые ситуации, которые возникают в сети, образуют множество $C = C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n$, где C декартово произведение множеств C_i , состоящих из u_i стратегий перевозчиков. Грузоотправители оценивают каждую ценовую ситуацию из множества C и выбирают маршруты перевозок. Поэтому каждая ценовая ситуация дает определенный выигрыш перевозчику – прибыль. Следовательно

выигрыш i -го игрока зависит от c , а определить его будем по формуле (5), т.е. $\Lambda_i(c) = \Lambda_i^*$.

Множество возможных выигрышей каждого игрока (перевозчика) в зависимости от ценовой ситуации $c = (c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n) \in C$ можно описать матрицей размерности n . Примеры указанных матриц для игроков 2 (дуга 5-8) и 3 (дуга 7-7), соответствующие рис. 1, при условии, что игрок 1 (дуга 1-3) установил стоимость перевозок равной 9 представлен в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Матрица выигрышей игрока 2

		Игрок 2							
		6	7	8	9	10	11	12	
Игрок 3	3	78	91	92	90	100	55	0	
	4	78	91	92	90	100	55	0	
	5	78	91	92	90	100	55	0	
	6	78	91	92	90	100	55	0	
	7	78	91	92	90	90	49,5	0	
	8	78	91	92	72	80	44	0	
	9	78	91	92	72	80	44	0	
	10	78	91	92	45	0	0	0	
	11	75	70	80	45	0	0	0	
	12	75	70	80	45	0	0	0	
	13	75	70	80	45	0	0	0	

Таблица 2

Матрица выигрышей игрока 3

		Игрок 2							
		6	7	8	9	10	11	12	
Игрок 3	3	66	66	66	66	66	66	66	
	4	88	88	88	88	88	88	88	
	5	110	110	110	110	110	110	110	
	6	132	132	132	132	132	132	132	
	7	154	154	154	147	147	147	147	
	8	168	168	168	160	160	160	160	
	9	180	180	180	180	180	180	180	
	10	200	200	200	170	120	120	120	
	11	214,5	187	187	132	77	77	77	
	12	234	204	204	144	84	84	84	
	13	253,5	221	221	156	91	91	91	

Рассмотрим случай, когда конфликт интересов n перевозчиков не предусматривает совместные действия отдельных групп. Такой конфликт может моделироваться бескоалиционной игрой при следующих условиях: участники не могут заключать взаимно обязывающие соглашения, их взаимодействия неантагонистические, каждый игрок предпринимает свои действия независимо от остальных, стороны конфликта знают для себя и остальных полезность каждой сложившейся ситуации при выборе действий. Заметим, что рассмотренный конфликт перевозчиков можно представить как

распределение между участниками некоторого постоянного количества, причем сумма выигрышей всех игроков вида (5) в различных ситуациях неодинакова. Таким образом, для моделирования конфликта должна быть построена бескоалиционная игра с ненулевой суммой. Анализ таких игровых моделей отличается от анализа антагонистических игр.

Представим один из подходов к решению бескоалиционных игр, основанный на принципе равновесия [6, 7]. Сохраняя введенные обозначения, представим бескоалиционную игру в виде системы

$$G(c) = \{I, \{C_i\}_{i \in I}, \{h_i\}_{i \in I}\} \quad (6)$$

в которой $I = 1, 2, \dots, n$; $C = C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n$, $C_i \equiv \{c_1, c_2, \dots, c_{i_i}\}$, $h_i(c)$ – вещественные функции. Для формирования оптимального решения игры (6) вводят понятия приемлемой ситуации и ситуации равновесия. Пусть набор возможных стратегий игроков, игровая ситуация, $c = (c_1, c_2, \dots, c_{i-1}, c_i, c_{i+1}, \dots, c_n) \in C$ в (6), а c_i^j произвольная стратегия игрока « i ». Далее $c // c_i^j = (c_1, c_2, \dots, c_{i-1}, c_i^j, c_{i+1}, \dots, c_n)$. Ситуацию $c \in C$ называют приемлемой для игрока « i », если для любой стратегии c_i^j выполнено

$$h_i(c // c_i^j) \leq h_i(c). \quad (7)$$

То есть выигрыш в приемлемой ситуации не меньше, чем при других ситуациях, полученных из нее путем замены стратегии c_i на любую c_i^j . Если неравенства (7) выполняются для всех $i = 1, \dots, n$; тогда $c \in C$ является равновесием для игры (6). Решения (6) в форме ситуаций равновесия в чистых стратегиях $c \in C$ редки.

Для нахождения ситуаций равновесия вводятся смешанные стратегии, устанавливающие вероятности применения игроком « i » своих чистых стратегий « j »: $\sigma_i(c_j)$. Вероятность $\sigma(c)$ называют ситуацией игры (6) в смешанных стратегиях – $G^*(\sigma(c))$:

$$\sigma(c) = \sigma(c_1, c_2, \dots, c_n) = \prod_i \sigma_i(c_i). \quad (8)$$

При этом выигрыш игрока « i » в $G^*(\sigma(c))$ понимается как средний выигрыш в зависимости от вероятностных распределений (8). Ситуацией равновесия смешанного расширения

$G^*(\sigma(c))$ игры (6) называют ситуацией $\sigma^*(c)$, если для любого игрока $i = 1, \dots, n$; и любой ее смешанной стратегии $\sigma_i(c_j)$ выполняется

$$h_i(\sigma^* // \sigma_i) \leq h_i(\sigma^*). \quad (9)$$

На вопросы существования и нахождения решения бескоалиционных игр отвечают следующие утверждения [6].

1. В каждой бескоалиционной игре существует хотя бы одна точка равновесия в смешанных или чистых стратегиях.

2. Для того чтобы ситуация σ^0 была ситуацией равновесия игры (в смешанных стратегиях) необходимо и достаточно чтобы для любого « i » и чистой стратегии c_i выполнялось неравенство

$$h_i(\sigma^0 // \sigma_i) \leq h_i(\sigma^0). \quad (10)$$

Согласно (10) при замене в ситуации равновесия σ^0 смешанной стратегии на чистую средний выигрыш игрока не увеличится. Наоборот, если для некоторой ситуации σ^0 средний выигрыш каждого игрока будет не меньше, чем средний выигрыш для ситуации σ^0 , у которого сделана замена смешанной стратегии каждого игрока, входящего в σ^0 на его любую чистую стратегию, то σ^0 является ситуацией равновесия.

Исследование рассматриваемого примера показывает, что оптимальная стратегия игрока 2 не зависит от действий игроков 1 и 3 и для получения максимального выигрыша он всегда должен устанавливать стоимость перевозок равную 8. В этих условиях задача может быть сведена к игре двух игроков и решена классическими методами [6]. Итоговое распределение потоков на сети приведено на рис. 3.

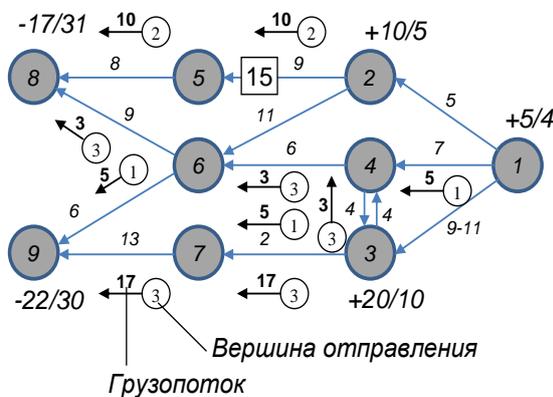


Рис. 3. Распределение потоков на сети

В настоящее время отсутствуют общие математические методы решения бескоалиционных игр с числом игроков (здесь перевозчиков) больше двух, имеющих более двух стратегий [6]. Вместе с тем разрабатываются специализированные модели и алгоритмы, позволяющие численно реализовать такого рода игровые задачи [7]. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

В играх вида (6) может быть несколько ситуаций равновесия. Именно указанные конструктивные свойства ситуаций равновесия были использованы для разработки переборных вычислительных алгоритмов решения дискретных бескоалиционных игр n лиц [7] общего вида.

Приведем обобщенную схему процедуры вычисления ситуаций равновесия в играх (6). Обозначим искомый вектор вероятностей смешанных стратегий игроков через

$$\bar{x}_\sigma = (\sigma_1^1, \dots, \sigma_{n1}^1, \dots, \sigma_1^n, \dots, \sigma_{mn}^n), \quad (11)$$

где n_j - число чистых стратегий у игрока « j ».

1. Имея вектор (11) с учетом (8) вычисляют математическое ожидание выигрышей каждого из игроков « i »

$$M[h_i(\bar{x}_\sigma)], \quad \forall (i \in n)$$

2. Вычисляются параметры условия ситуации равновесия игры (6) для (11) согласно

$$\Delta_{ij}^k = M[h_i(\bar{x}_\sigma)] - M[h_{ij}^k]. \quad (12)$$

$$\Delta_i = \min_j \min_{k \in n_j} \{\Delta_{ij}^k\}. \quad (13)$$

где $M[h_{ij}^k]$ - математическое ожидание выигрыша игрока « i » в случае применения игроком « j » своей чистой стратегии номер « k », а величина (13) является худшей оценкой выигрыша.

3. Если имеет место отношение

$$\exists (i \in n) \Delta_i < 0, \quad (14)$$

тогда вектор (11) не является ситуацией равновесия. В случае невыполнения (14) вектор (11) представляет ситуацию равновесия игры (6).

4. При выполнении (14) формируется некоторый показатель отклонения (11) от ситуации равновесия, по значениям которого решается оптимизационная задача вида

$$\min \{0, V(\Delta_i)\} \Rightarrow \max, \quad \forall (\Delta_i < 0), \quad (15)$$

где тем или другим способом формируются векторы (11).

В работе [7] для реализации (15) использован алгоритм случайного поиска. При заданной точности нахождения решения (11) возможен алгоритм перебора по сетке.

Результаты

Разработанная модель может использоваться как для исследования ценовой игры перевозчиков, так и для оценки различных мероприятий по развитию погрузочных и выгрузочных способностей пунктов отправления и назначения и провозных способностей элементов транспортной сети.

В качестве примера на рис. 4 представлены зависимости доходов перевозчиков от объемов погрузки в вершине 3.

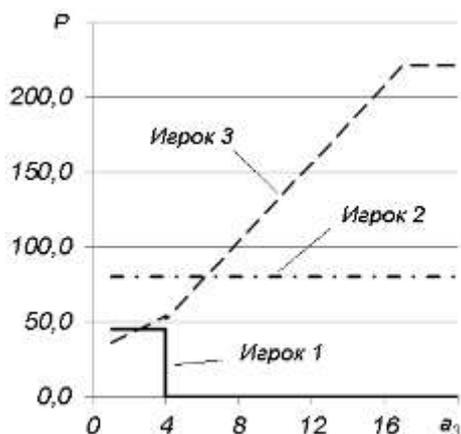


Рис.4. Зависимость прибылей перевозчиков от запасов в пункте 3

Анализ полученных зависимостей показывает, что при объеме погрузки в вершине 3 менее 5 единиц игрок 3 заинтересован в выборе такой стратегии, которая обеспечивает привлечение грузопотока из вершины 1 на дугу 7-9. В этом случае дуга 1-3 перевозчика 1 используется для пропуска грузопотоков. При увеличении объемов погрузки в вершине 3 до 5 и более единиц перевозчик 3 устанавливает стоимость своих услуг исходя из целей получения максимальной прибыли при обслуживании вершины 3. В результате маршруты с использованием дуги 1-3 (перевозчик 1) становятся неконкурентоспособными.

Научная новизна и практическая ценность

Научная новизна работы состоит в усовершенствовании методов оценки распределения грузопотоков по железнодорожной сети на ос-

новании использования методов теории игр.

Результаты работы могут использоваться для создания системы поддержки решений для оценки тарифов, технических и технологических решений, принимаемых в сфере международных транзитных перевозок железнодорожным транспортом.

Выводы

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Условия выполнения транзитных железнодорожных перевозок в международном сообщении имеют существенные отличия от перевозок во внутреннем сообщении в связи с наличием конкуренции за грузопотоки между отдельными элементами железнодорожной сети.
2. Задача распределения грузопотоков на железнодорожной транспортной сети в условиях, когда имеет место конкуренция между отдельными их элементами за грузопотоки, может быть сведена к модели бескоалиционных игр с ненулевой суммой. В работе представлены методы формализации соответствующей задачи, приведены процедуры и примеры ее решения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Альошинський, Є. С. Дослідження можливих варіантів доставки міжнародних вантажопотоків при змішаних перевезеннях у межах транспортної системи України /Є. С. Альошинський, С. О. Світлична, А. М. Багно // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2014. – Вип. 144. – С. 45–49.
2. Договор о Международном железнодорожном транзитном тарифе: офіц. текст: [прийнятий зі змінами та доповненнями : станом на 1 січ. 2011 р.]. – Режим доступу: http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/998_229.
3. Козаченко Д. М. Математична модель для дослідження перевезення вантажів у міжнародному сполученні / Д. М. Козаченко, Ю. М. Германюк // Транспортні системи та технології перевезень. – 2013. – Вип. 5. – С. 28-32..
4. Козаченко, Д. М. Удосконалення методів оцінки роботи залізничного транспорту у сфері міжнародних транзитних перевезень / Д. М. Козаченко, А. І. Верлан, Ю.М. Германюк // Залізничний транспорт України. – 2013. – Вип. 2(99). – С. 40–42.
5. Кристофидес, Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес – Москва: Мир, 1978. – 432 с.

6. Крушевский, А. В. Теория игр / А. В. Крушевский. – Киев: Высшая школа, 1977. – 216 с.

7. Скалозуб, В. В. Исследование конкурирующих транспортных потоков на основе бескоалиционных игровых процедур равновесия / В. В. Скалозуб, М. В. Скалозуб, В. В. Кузнецов // Проблемы та перспективи розвитку залізничного транспорту: тези 76 міжнар. наук. - практ. конф. – Дніпропетровськ: 2016. – С. 99–100.

8. Anderson, C. M. Game theoretic analysis of competition among container port hubs: the case of Busan and Shanghai / C. M. Anderson, Y. A. Park, Y. T. Chang, C. H. Yang, T. W. Lee, M. A. Luo // Maritime Policy & Management. – 2008. – Vol. 35, Issue № 1. – pp. 5–26.

9. Fisk, S.C. Game Theory and Transportation Systems Modelling / S.C. Fisk // Transportation Research Part B: Methodological – 1984. – Vol. 18, Issues 4-5. – pp. 301–313. doi:10.1016/0191-2615(84)90013-4.

10. Grabara, J. The role of information systems in transport logistics / J. Grabara, M. Kolcun, S. Kot // International Journal of Education and Research. – 2014. – Vol. 2. – №. 2. – pp. 101-108.

11. Hollander, Y. The applicability of non-cooperative game theory in transport analysis / Y. Hollander, J. N. Prashker // Transportation. – 2006. – Vol. 33, – Issue 5. – pp. 481–496. doi: 10.1007/s11116-006-0009-1.

12. Ishii, M. A game theoretical analysis of port competition / M. Ishii, P. T-W Paul Tae-Woo Lee, K. Tezuka, Y-T Chang // A Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2013. – Vol. 49, – Issue 1. – pp. 92–106. doi:10.1016/j.tre.2012.07.007.

13. Kaselmi, E. N. A game theoretical approach to competition between multi-user terminals: the impact of dedicated terminals / E. N. Kaselmi, T. Notteboom,

B. De Borger // Maritime Policy & Management. – 2011. – Vol. 38, Issue 4. – pp. 395–414. DOI: 10.1080/03088839.2011.588260.

14. Menéndez, M. Development of a Smart Framework Based on Knowledge to Support Infrastructure Maintenance Decisions in Railway Corridors Transportation Research Procedia / M. Menéndez, C. Martínez, Gr. Sanz, J. Manuel Benitez // Transport Research Arena. – 2016. – vol. 14. – pp. 1987–1995. doi:10.1016/j.trpro.2016.05.166.

15. Baklanov, P. Projects of Development of Transcontinental Transport-Economic Belts in Northern Eurasia / P. Baklanov, M. Romanov, Vl. Karakin, Al. Lankin // Journal of Resources and Ecology. – 2015. – Vol. 6, Issue 2. – pp. 110-113. doi: 10.5814/j.issn.1674-764x.2015.02.008.

16. Śladkowski, A. Influence of a potential railway line connecting the Caspian Sea with the Black Sea on the development of Eurasian trade / A. Śladkowski, M. Cieśla – 2015. – Vol. 62, Issue 4. – pp. 264-271. doi 10.17818/NM/2015/4.4.

17. Kim, T-G. An Analysis of Price Competition between Two Ports using Game Model / T-G. Kim, G. Park // Journal of Korea Port Economic Association. – 2009. - Vol. 25(3). – pp. 251-268.

18. Tang, Z. Optimal decisions of sharing rate and ticket price of different transportation modes in inter-city transportation corridor / Z. Tang, J. Qin1, H. Liu, X. Du, J. Sun // Journal of Industrial Engineering and Management. –2015. – vol. 8, № 5. – pp. 1731-1745. doi: <http://dx.doi.org/10.3926/jiem.1669>.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Алешинским Е. С. (Украина)

Поступила в редколлегию 18.05.2016.

Принята к печати 19.05.2016.

Д. М. КОЗАЧЕНКО, Б. В. ГЕРА, В. В. СКАЛОЗУБ, Ю. М. ГЕРМАНЮК

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ВАНТАЖОПОТОКІВ НА НАПРЯМКАХ ТРАНЗИТНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЗАЛІЗНИЧНИМ ТРАНСПОРТОМ У МІЖНАРОДНОМУ СПОЛУЧЕННІ

Мета. Метою дослідження є побудова математичної моделі розподілу вантажопотоків на залізничних мережах в умовах, коли має місце конкуренція між окремими елементами мережі за вантажопотоки. **Методика.** Вирішення задачі виконано з використанням методів теорії графів і теорії ігор. **Результати.** В якості моделі залізничної мережі використаний орієнтований параметричний граф, вершинам якого у відповідність поставлені пункти навантаження і вивантаження, а також транзитні пункти; дугам у відповідність поставлені залізничні ділянки між вершинами. На графі задаються обсяги навантаження, вивантаження, вантажувальні здатності, вартості вантажів в початкових і кінцевих пунктах, вартості перевезення та пропускні спроможності дуг. У процесі організації перевезень вантажів беруть участь активні суб'єкти двох типів: вантажовідправники і вантажоперевізники. Вибір маршруту перевезення окремим вантажовідправником здійснюється з умови отримання максимального прибутку на підставі рішення задачі пошуку найкоротших відстаней. Вибір вартостей перевезення окремими перевізниками здійснюється з урахуванням конкуруючих пропозицій інших перевізників шляхом вирішення задачі безкоаліційних матричних ігор. **Наукова новизна.** Наукова новизна роботи полягає в тому, що в ній, за рахунок врахування інтересів окремих учасників перевізного процесу, вдосконалені методи розподілу вантажопотоків по залізничній мережі на підставі використання методів теорії ігор.

Практична значимість. Результати роботи можуть використовуватися для створення системи підтримки рішень для оцінки тарифів, технічних і технологічних рішень, що приймаються в сфері міжнародних транзитних перевезень залізничним транспортом.

Ключові слова: залізничний транспорт; міжнародні перевезення; теорія ігор; транспортні потоки, конкуренція

D. M. KOZACHENKO , B. V. GERA , V. V. SKALOZUB , YU. M. HERMANYUK

SIMULATION OF DISTRIBUTION OF CARGO FLOWS FOR DIRECTIONS OF TRANSIT TRANSPORTATION BY RAILWAY IN INTERNATIONAL TRAFFIC

Purpose. The goal of the research is to construct a mathematical model of the distribution of cargo flows on railway transport in an environment in the conditions of carriers' competition. **Methods.** Solving the task was made by using the methods of graph theory and game theory. **Results.** Mathematical model cargo in international traffic is parametric directed graph. Vertices of the graph are points of loading and unloading and transit points; arcs of the graph is the railway area between vertices. Volume loading, unloading capacity, cost of goods in the initial and end-points, transportation cost and throughput of arcs set in the graph. During the transport of goods involved shippers and cargo carriers. The choice of route transportation by specific shipper carried out subject to the maximum profit on the basis of solution finding the shortest distances. The choice of fare transportation by specific carriers was made considering competing offers by other carriers by using non-cooperative solving matrix games. **Scientific novelty.** Scientific novelty lies in the fact that it, by taking into account the interests of individual members of the transportation process improved methods of distribution of cargo on railway network that is based on the use of methods of game theory. **The practical significance.** The results can be used to create a decision support system for assessing tariffs, technical and technological decisions made in international transit rail transportations.

Keywords: railway transport; international transport; game theory; traffic flows, competition.