

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

УДК [UDC] 656.2 + 06

DOI 10.17816/transsyst202391108-121

© В.А. Богачев¹, А.С. Кравец¹, Т.В. Богачев²

¹Ростовский государственный университет путей сообщения

²Ростовский государственный экономический университет

(Ростов-на-Дону, Россия)

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ЛОГИСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК С ВРЕМЕННЫМИ И СТОИМОСТНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

Цель: Разработка нового подхода к оптимизации процесса распределения грузопотоков на транспортном полигоне. Построение математической модели процесса грузоперевозок, учитывающей в равной степени интересы различных участников перевозочного процесса.

Материалы и методы: Строится математическая модель процесса грузоперевозок, которая опирается на инфраструктурные показатели рассматриваемой части железнодорожного полигона и представляет собой многокритериальную оптимизационную задачу целочисленного программирования. Алгоритм решения задачи является общим для наземного транспорта и реализован в среде системы компьютерной алгебры. В качестве проекта, представляющего собой пример приложения разработанного транспортно-логистического метода, рассматривается часть Северо-Кавказской железной дороги, примыкающая к основным грузовым портам Азово-Черноморского бассейна. Рассматриваемый железнодорожный полигон является транзитной составляющей, активно эксплуатируемой при российском экспорте, в частности, зерновых грузов.

Результаты: Изучаются вопросы организации железнодорожных грузоперевозок в мультимодальных транспортно-технологических системах на основе эгалитарного и утилитарного подходов в теории благосостояния. Указанные подходы рассматриваются в отношении участников перевозочного процесса (агентов) в рамках временных и стоимостных показателей этого процесса. Вычислительные процедуры нахождения оптимальных распределений грузопотоков доведены до конкретных результатов.

Заключение: Математический эксперимент, используемый как инструмент имитационного моделирования, позволяет разносторонне и целенаправленно манипулировать показателями перевозочного процесса и ограничениями, накладываемыми на планы перевозок. Полученные в результате оптимизации по Парето распределения грузопотоков в адрес припортовых станций выгрузки, анализируются с точки зрения их рациональности и полезности в отношении агентов.

Ключевые слова: железнодорожные грузоперевозки, мультимодальные транспортно-технологические системы, распределения экспортных грузопотоков, моделирование перевозочного процесса, оптимизация по Парето, зеленая логистика.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Ground transport and logistics facilities and complexes

© V.A. Bogachev¹, A.S. Kravets¹, T.V. Bogachev²

¹Rostov State Transport University

²Rostov State University of Economics

(Rostov-on-Don, Russia)

MATHEMATICAL EXPERIMENT IN LOGISTICS RESEARCH OF MULTIMODAL FREIGHT TRANSPORTATION WITH TIME AND COST INDICATORS

Aim: Development of a new approach to optimizing the process of cargo flows distribution at the transport loop. Construction of a mathematical model of the freight transportation process, which equally takes into account the interests of various participants in the transportation process.

Materials and Methods: A mathematical model of the freight transportation process is built, which is based on the infrastructure indicators of the considered part of the railway loop and is a multicriteria optimization problem of integer programming. The algorithm for solving the problem is common for land transport and is implemented in the environment of a computer algebra system. As a project, which is an example of the application of the developed transport and logistics method, a part of the North-Caucasian railway, adjacent to the main cargo ports of the Azov-Black Sea basin, is considered. The considered railway loop is a transit component, actively exploited for Russian exports, in particular, grain cargoes.

Results: The issues of organizing rail freight transportation in multimodal transport and technological systems are researched on the basis of egalitarian and utilitarian approaches in welfare theory. These approaches are considered in relation to the participants in the transportation process (agents) within the framework of the time and cost indicators of this process. Computational procedures for finding optimal distributions of cargo flows have been brought to concrete results.

Conclusion: A mathematical experiment used as a simulation modeling tool allows versatile and purposeful manipulation of the indicators of the transportation process and the restrictions imposed on transportation plans. The cargo flows distributions to port unloading stations obtained as a result of Pareto optimization are analyzed from the point of view of their rationality and usefulness in relation to agents.

Key words: rail freight transportation, multimodal transport and technological systems, distribution of export cargo flows, modeling of the transportation process, Pareto optimization, green logistics.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам исследования эффективности мультимодальных грузовых перевозок, включающих в себя перевалку в морских портах, посвящено большое количество исследований, проводившихся в последнее время. Глобализация транспортных процессов, сопровождаемая их цифровизацией, а также различия в целях и задачах участников перевозки

приводят к необходимости более глубокого и разностороннего их изучения.

В настоящей работе представлен подход в исследовании эффективности процесса грузовых перевозок, при котором практическая реализация разработанных алгоритмов выполняется в среде системы аналитических вычислений.

В качестве перевозимого груза рассматривается один из стратегически важных экспортируемых из России сырьевых товаров – зерновые. Характерные для зерновых грузов массовость и относительно низкая стоимость во многом способствуют при их транспортировке комплексному использованию железнодорожного и морского видов транспорта. Отметим, что разработанная в статье методика исследований является весьма общей и применима к перевозкам других видов грузов.

При выборе схем мультимодальных перевозок грузов, экспортируемых через морские порты, естественно учитывать факторы, объективно влияющие на активность функционирования этих портов. Среди таких факторов следует выделить, в первую очередь, их географическое положение (в том числе, относительно инфраструктуры железнодорожного транспорта) и техническую оснащенность. При этом возрастающий уровень конкуренции между железнодорожным и автомобильным видами транспорта является внешним фактором, который стимулирует нахождение оптимальных схем грузоперевозок в отношении железнодорожного транспорта, особенно при условии его участия в мультимодальных перевозках. Следует обратить еще внимание на распыленность станций погрузки зерна на юге России, разветвленность путей сообщения (в том числе, в направлении портов), а также присутствие на рынке большого количества транспортных компаний. Таким образом, для грузоотправителей является весьма актуальной задача, состоящая в том, чтобы в соответствии с интересующими их показателями перевозочного процесса среди возможных схем грузоперевозок иметь возможность выбирать те, которые оказываются рациональными с точки зрения организации всей транспортно-логистической цепочки.

Сложность структуры субъектов перевозочного процесса, а также разнообразие возможных элементов логистической цепочки предполагает всестороннее изучение возможных вариантов схем перевозки и выбор оптимального среди них. Вопросы необходимости цифровизации транспортных процессов представлены в [1–15]. Разница в интересах участников перевозок отмечается в [5]. Различия в их целях и задачах определяет сложности в выработке единой транспортной стратегии и делает необходимым более глубокое изучение транспортных технологий с целью поиска новых методов, которые позволят найти результат выгодный одновременно для всех участников. В [7] предлагается математическая модель распределения экспортных грузопотоков, построенная на основе

теории игр и теории графов. В результате проведенного моделирования оказывается возможным привлечение дополнительных объемов грузов за счет оптимизации стоимости перевозки на конкретном маршруте. В [9] представлена модель, основанная на прогнозе транспортных потоков с учетом инфраструктурных ограничений, что позволяет минимизировать затруднения в движении транспорта.

Проведенный выше анализ работ позволяет сделать вывод об актуальности исследований, имеющих целью нахождение рациональных схем мультимодальных перевозок грузов и выполняемых на основе синергетических подходов, при которых осуществляется синтез использованных ранее идей. Отметим, что любой из подходов наиболее рационально применять с помощью использования цифровых логистических технологий, позволяющих вырабатывать решения на основе заданных критериев.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Математическая модель процесса грузоперевозок с временными показателями. Рассматривается m станций погрузки и n станций выгрузки. Пусть a_i – число отправительских маршрутов с некоторым грузом, запланированных к вывозу с i -й станции погрузки ($i = 1, 2, \dots, m$), и x_{ij} – число отправительских маршрутов, которые могут быть отправлены с i -й станции погрузки в адрес j -й станции выгрузки ($j = 1, 2, \dots, n$). Сначала в отношении множества D допустимых планов перевозок (x_{ij}) будем предполагать лишь выполнение условия:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i (i = 1, 2, \dots, m). \quad (1)$$

Равенства (1) означают, что каждый маршрут, запланированный к вывозу с каждой из станций погрузки, должен быть отправлен в адрес какой-либо из станций выгрузки. В процессе разработки модели изначальная открытость транспортной задачи в отношении станций выгрузки будет дополняться рядом ограничений. Они будут накладываться на множество D с учетом специфики транспортно-логистической ситуации на рассматриваемой части полигона.

Следуя предложенному в [15] подходу в изучении процесса грузоперевозок, введем временные показатели, которые в своей совокупности позволяют учитывать уровень организации этого процесса, а также интересы зеленой логистики.

Начнем с набора показателей, выражаемых целевыми функциями вида:

$$\tau^{(j)} = \sum_{i=1}^m t_{ij} x_{ij} \quad (j = 1, \dots, n), \quad (2)$$

где t_{ij} – среднее статистическое время следования отправительского маршрута на участке между i -й станцией погрузки ($i = 1, 2, \dots, m$) и j -й станцией выгрузки ($j = 1, 2, \dots, n$). Каждый из показателей $\tau^{(j)}$ называется *суммарным временем* плана перевозок (x_{ij}) в направлении j -й станции выгрузки.

Показателем $\tau^{(j)}$ ($j = 1, \dots, n$) выражается время нахождения на полигоне всех тех отправительских маршрутов из данного плана перевозок (x_{ij}), которые оказываются направленными в адрес j -й станции выгрузки. Указанные показатели предоставляют возможность выделять станции выгрузки, принимая во внимание причины и последствия загруженности частей полигона, расположенных в соответствующих направлениях. Являясь объективными оценками степени загруженности, показатели $\tau^{(j)}$ позволяют, в частности, контролировать и регулировать соблюдение принципов зеленой логистики на рассматриваемой части полигона. Сказанное весьма актуально для направлений в сторону Черноморского побережья, поскольку они традиционно относятся к курортным.

Следующий временной показатель характеризует изучаемую транспортно-логистическую конструкцию в целом и выражается целевой функцией вида:

$$T = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m t_{ij} x_{ij}. \quad (3)$$

Показатель T будем называть *суммарным временем* плана перевозок (x_{ij}). Этим показателем выражается суммарное время нахождения на полигоне всех отправительских маршрутов, которые участвуют в реализации плана перевозок (x_{ij}). В минимизации показателя T (возможно, в «скрытом» от других агентов виде) заинтересован, например, такой агент как владелец инфраструктуры.

В качестве агентов будем рассматривать также перевозчика, операторскую компанию (владельца подвижного состава), логистическую компанию и клиентов (грузоотправителей, грузовладельцев). Под рациональными схемами распределения грузопотоков будем понимать такие, что при их реализации оказывается учтенным ряд интересов рассматриваемых агентов.

2. Исходные характеристики транспортного потока. В качестве объекта приложения разработанных в статье оптимизационных алгоритмов рассматривается конкретный транспортно-логистический проект. Предполагается, что предназначенное для перевозки зерно находится на станциях погрузки Целина, Белоглинская и Изобильная. Станциями выгрузки являются припортовые станции: Азов, Таганрог и Ейск (относящиеся к малым портам), а также – Туапсе и Тамань (относящиеся к глубоководным портам).

Реализованные в среде системы компьютерной алгебры (Free Ware) вычислительные процедуры выполняются для численных данных, приведенных в Табл. 1 (временные характеристики транспортного потока найдены с учетом его маршрутной скорости).

Таблица 1. Характеристики исследуемых поездопотоков

Припортовые станции	Станции погрузки					
	Целина		Белоглинская		Изобильная	
	<i>t</i> , сут.	<i>c</i> , тыс.руб.	<i>t</i> , сут.	<i>c</i> , тыс.руб.	<i>t</i> , сут.	<i>c</i> , тыс.руб.
Азов	0,51	980,58	0,84	1183,5	1,13	1391,22
Таганрог	0,92	1064,34	0,99	1272,84	1,29	1448,88
Ейск	0,68	1222,92	0,78	1448,88	1,07	1623,84
Туапсе	1,43	1569,36	1,34	1332,72	1,25	1391,22
Тамань	1,47	1691,10	1,28	1448,88	1,38	1513,86

3. Оптимизационная задача без дополнительных ограничений.

Рассматривается оптимизационная задача транспортного типа, которая с точки зрения математической классификации является многокритериальной задачей целочисленного программирования. При составлении алгоритма ее решения мы опираемся на принципы эгалитарного и утилитарного подходов в теории благосостояния. Концепция эгалитаризма подразумевает реализацию принципа единогласия (в том или ином его виде). При этом естественно обратиться к понятию оптимального по Парето решения задачи. В результате для рассматриваемых агентов достигается определенный баланс интересов. Концепция утилитаризма подразумевает максимизацию суммы индивидуальных полезностей агентов. В проводимых исследованиях указанные принципы используются каждый в отдельности, а также в сочетании.

В отношении специфики ситуации на рассматриваемой части полигона СКЖД будем учитывать следующие обстоятельства. Во-первых, обратим внимание на весьма низкую пропускную способность железнодорожных подходов к станциям Азов, Таганрог и Ейск (напомним, эти станции относятся к малым портам). Ситуация усугубляется тем, что на указанных станциях отсутствуют склады достаточно большой емкости. Таким образом, использование соответствующей транспортной инфраструктуры жестко регламентировано по времени. Другим обстоятельством, которое имеет не транспортный характер и напрямую относится к области «зеленой» логистики, является то, что участки полигона, примыкающие к припортовым станциям Туапсе и Тамань, расположены в курортной зоне.

Предварительные исследования будем проводить в рамках трех временных показателей:

$$T_1 = \sum_{j=1}^3 \tau^{(j)}, \quad T_2 = \sum_{j=4}^5 \tau^{(j)} \quad \text{и} \quad T. \quad (4)$$

В силу выражений (2) и (3) эти показатели связаны между собой равенством $T_1 + T_2 = T$.

Сначала будем предполагать, что на каждой из трех станций погрузки находится по 5 отправительских маршрутов с зерном. Чтобы иметь представление об объемах вычислений, выполняемых в процессе решения рассматриваемых оптимизационных задач, сделаем замечание комбинаторного характера. Именно, множество D всех допустимых планов перевозок (x_{ij}) , удовлетворяющих равенствам (1), в указанном случае состоит из $(n^m)^2 = (5^3)^5 = 5^{15} = 30517578125$ планов. Соответственно в случае, когда на каждой из станций погрузки находится по 6 отправительских маршрутов, число всех допустимых планов перевозок равно $5^{18} = 3814697265625$.

Начнем с оптимизации процесса грузоперевозок с рассмотрением одного – «объединенного» показателя T . То есть с точки зрения теории благосостояния обратимся к утилитарному подходу. В Табл. 2 приведены 5 планов перевозок из 92 планов, полученных программой в процессе минимизации целевой функции T . Содержащийся в последней строке Табл. 2 оптимальный план перевозок показывает, насколько неравномерным оказывается распределение маршрутов по припортовым станциям выгрузки. На станцию Таганрог, а также на станции Туапсе и Тамань (напомним, что этими двумя станциями в рассматриваемом проекте представлены все глубоководные порты) не попадает ни одного маршрута.

Таблица 2. Распределение маршрутов по станциям и значения показателей

№	Планы транспортировки	Число отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					T_1	T_2	T
		<i>Азов</i>	<i>Таганрог</i>	<i>Ейск</i>	<i>Туапсе</i>	<i>Тамань</i>			
1	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,0,5	0	0	0	0	15	0,00	20,65	20,65
2	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,0,1,4	0	0	0	1	14	0,00	20,52	20,52
3	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,0,2,3	0	0	0	2	13	0,00	20,39	20,39
...
91	4,0,1,0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0	4	0	11	0	0	11,97	0,00	11,97
92	5,0,0,0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0	5	0	10	0	0	11,80	0,00	11,80

Перейдем к оптимизации процесса грузоперевозок с рассмотрением двух временных показателей T_1 и T_2 . С точки зрения теории благосостояния это будет соответствовать тому, что мы обратимся к

эгалитарному подходу. Указанными показателями выражаются интересы агентов, относящиеся соответственно к малым и глубоководным портам. Кроме того, поскольку показателем T_2 выражается время нахождения на полигоне всех отправительских маршрутов (из данного плана перевозок (x_{ij})), направленных в адрес станций Туапсе и Тамань, минимизация показателя T_2 соответствует принципам «зеленой» логистики.

Каждому плану перевозок $(x_{ij}) \in D$ поставим в соответствие вектор $\{T_1, T_2\}$, называемый вектором полезностей. Оптимальным назовем такой план перевозок $(x_{ij}^*) \in D$ с вектором полезностей $\{T_1^*, T_2^*\}$, для которого не существует плана перевозок $(x_{ij}) \in D$ такого, что координаты его вектора полезностей $\{T_1, T_2\}$ удовлетворяют условию

$$(T_1 < T_1^* \wedge T_2 \leq T_2^*) \vee (T_1 \leq T_1^* \wedge T_2 < T_2^*). \quad (5)$$

В Табл. 3 приведены 5 планов перевозок из 11 планов, полученных в качестве «ступенек» в «оптимизационной лестнице», отражающей процесс улучшения допустимых планов согласно логической связке (5).

Таблица 3. Распределение маршрутов по станциям и значения показателей

№	Планы транспортировки	Число отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					T_1	T_2	T
		Азов	Таганрог	Ейск	Туапсе	Тамань			
1	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,0,5	0	0	0	0	15	0,00	20,65	20,65
2	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,0,1,4	0	0	0	1	14	0,00	20,52	20,52
3	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,0,2,3	0	0	0	2	13	0,00	20,39	20,39
...
10	0,0,0,4,1,0,0,0,0,5,0,0,0,5,0	0	0	0	9	6	0,00	19,84	19,84
11	0,0,0,5,0,0,0,0,0,5,0,0,0,5,0	0	0	0	10	5	0,00	19,80	19,80

Оптимальный план перевозок (см. последнюю строку Табл. 3) радикально отличается от оптимального плана, полученного выше на основе утилитарного подхода к процессу оптимизации. Теперь все три станции выгрузки, относящиеся к малым портам (то есть Азов, Таганрог и Ейск), оказываются лишенными маршрутных поступлений в свой адрес. Значение суммарного времени перевозки оказалось существенно больше, чем в предыдущем случае. Несмотря на то, что согласно выражению логической связки (5) минимизация значений показателей T_1 и T_2 должна была осуществляться равноправно, в отношении показателя T_2 получен

крайне неудовлетворительный результат (сравните с другой «крайностью», достигнутой ранее в рамках утилитарного подхода).

4. Оптимизация с минимальными дополнительными ограничениями. На основании анализа полученных выше (весьма предварительных) результатов остановимся на утилитарном подходе в отношении временных характеристик перевозочного процесса. То есть дальнейшие исследования будем проводить с рассмотрением показателя T . Вводимые далее дополнительные ограничения на множество D допустимых планов перевозок будут нежесткими и вполне естественными с точки зрения рассматриваемой транспортно-логистической ситуации. Начнем с самого «мягкого» ограничения, которое будет состоять в том, чтобы в адрес (всех в совокупности) станций выгрузки, относящихся к малым портам, а также в адрес (всех в совокупности) станций выгрузки, относящихся к глубоководным портам, направлялся хотя бы один маршрут. В Табл. 4 приведены 5 планов перевозок из 93 планов, полученных в процессе минимизации целевой функции T .

Таблица 4. Распределение маршрутов по станциям и значения показателей

№	Планы транспортировки	Количество отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					T_1	T_2	T
		<i>Азов</i>	<i>Таганрог</i>	<i>Ейск</i>	<i>Туапсе</i>	<i>Тамань</i>			
1	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,1,0,4	0	0	1	0	14	1,07	19,27	20,34
2	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,0,1,1,3	0	0	1	1	13	1,07	19,14	20,21
...
91	4,0,1,0,0,0,0,5,0,0,0,0,4,1,0	4	0	10	1	0	10,90	1,25	12,15
92	5,0,0,0,0,0,0,5,0,0,0,0,4,0,1	5	0	9	0	1	10,73	1,38	12,11
93	5,0,0,0,0,0,0,5,0,0,0,0,4,1,0	5	0	9	1	0	10,73	1,25	11,98

Оптимальный план перевозок (см. последнюю строку Табл. 4), а также значения показателей T_1 и T_2 стали несколько более сбалансированными, чем полученные в двух предыдущих случаях.

Далее несколько «ужесточим» ограничения на множество D , потребовав, чтобы в адрес каждой из пяти рассматриваемых припортовых станций был направлен хотя бы один маршрут. В Табл. 5 приведены 5 планов перевозок из 96 планов, полученных в процессе минимизации целевой функции T .

Таблица 5. Распределение маршрутов по станциям и значения показателей

№	Планы транспортировки	Количество отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					T_1	T_2	T
		Азов	Таганрог	Ейск	Туапсе	Тамань			
1	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,1,1,1,1,1	1	1	1	1	11	3,49	16,38	19,87
2	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,1,1,1,2,0	1	1	1	2	10	3,49	16,25	19,74
3	0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,1,1,2,1,0	1	1	2	1	10	4,56	15,00	19,56
...
95	5,0,0,0,0,0,0,5,0,0,0,1,2,1,1	5	1	7	1	1	9,88	2,63	12,51
96	5,0,0,0,0,0,1,4,0,0,0,0,3,1,1	5	1	7	1	1	9,87	2,63	12,50

Оптимальный план перевозок (см. последнюю строку Табл. 5) и значения показателей T_1 и T_2 оказались еще более сбалансированными. Отметим, что в данном случае множество D существенно уже, чем в предыдущем случае. Поэтому минимальное значение временного показателя T равно 12,50 (суток) оказалось больше, чем полученное ранее и равно 11,98 (суток).

5. Оптимизация с временным и стоимостным показателями. Наряду с временными показателями перевозочного процесса рассмотрим классический стоимостный показатель, выражаемый целевой функцией вида:

$$c = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}. \quad (6)$$

Здесь c_{ij} – стоимость перевозки одного отправительского маршрута на участке между i -й станцией погрузки ($i = 1, 2, \dots, m$) и j -й станцией выгрузки ($j = 1, 2, \dots, n$).

Показателем c выражается суммарная стоимость перевозки всех отправительских маршрутов, которые участвуют в реализации плана перевозок (x_{ij}). Этот показатель допускает различные подходы и толкования с точки зрения рассматриваемых агентов и тесно связан не только с экономическими параметрами перевозки (транспортной составляющей в стоимости перевозимых товаров, затратами клиента, конкурентоспособностью используемого вида транспорта). Здесь также можно обратить внимание на использование агентами технологий ресурсосбережения.

Заметим, что разнородность показателей, рассматриваемых в рамках оптимизационной задачи, позволяет расширить спектр интересов, которые могут преследоваться агентами. Эти интересы могут носить организационный характер (например, в смысле достижения высокой степени ритмичности перевозок), а также относиться к экологической безопасности.

Каждому плану перевозок $(x_{ij}) \in D$ поставим в соответствие вектор $\{T, c\}$, называемый вектором полезностей. Оптимальным назовем план перевозок $(x_{ij}^*) \in D$ с вектором полезностей $\{T^*, c^*\}$, для которого не существует плана перевозок $(x_{ij}) \in D$ такого, что координаты его вектора полезностей $\{T, c\}$ удовлетворяют условию

$$(T < T^* \wedge c \leq c^*) \vee (T \leq T^* \wedge c < c^*). \quad (7)$$

Из выражения логической связки (7) видно, что в процессе оптимизации планов перевозок не происходит потери полезностей в отношении агентов, интересы которых выражаются показателями T и c .

Будем теперь предполагать, что на каждой из трех станций погрузки находится по 6 отправительских маршрутов с зерном. В Табл. 6 приведены 5 планов перевозок из 149 планов, представляющих собой «ступеньки» в «оптимизационной лестнице», приводящей к одному из оптимальных по Парето планов перевозок, получаемых в результате применения разработанного алгоритма.

Таблица 6. Распределение маршрутов по станциям и значения показателей

№	Планы транспортировки	Количество отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					T_1	T_2	T	c
		Азов	Таганрог	Ейск	Туапсе	Тамань				
1	0,0,0,0,6,0,0,0,0,6,1,1,1,1,2	1	1	1	1	14	3,49	20,51	24,00	27722,76
2	0,0,0,0,6,0,0,0,0,6,1,1,1,2,1	1	1	1	2	13	3,49	20,38	23,87	27600,12
...
147	6,0,0,0,0,5,0,1,0,0,2,1,0,2,1	13	1	1	2	1	11,59	3,88	15,47	21777,48
148	6,0,0,0,0,5,0,1,0,0,3,1,0,1,1	14	1	1	1	1	12,72	2,63	15,35	21777,48
149	6,0,0,0,0,5,1,0,0,0,3,0,1,1,1	14	1	1	1	1	12,71	2,63	15,34	21776,40

Содержащийся в последней строке Табл. 6 план перевозок представляет рациональную схему распределения грузопотоков, в которой (в той или иной степени) учитываются интересы таких агентов, как

владелец инфраструктуры, перевозчик, операторская и логистическая компании, клиент, а также интересы «зеленой» логистики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан подход в математическом моделировании распределений грузопотоков на железнодорожном полигоне, которые функционируют в рамках мультимодальных транспортно-технологических систем. Исходя из эгалитарной и утилитарной концепций в теории благосостояния, являющихся в проводимых исследованиях общей методологической основой, построена оптимизационная модель процесса грузоперевозок с временными и стоимостным показателями. Указанная модель представляет собой многокритериальную задачу транспортного типа, алгоритм решения которой в виде задачи целочисленного программирования реализован в программной среде системы аналитических вычислений. Разнородный характер целевых функций позволяет учитывать различные интересы, преследуемые агентами в процессе грузоперевозок. В качестве объекта применения разработанной методики исследования рассматривается система экспортных перевозок зерновых грузов в адрес портов Азово-Черноморского бассейна.

Проведена серия математических экспериментов, позволяющих провести сравнительный анализ результатов, полученных на основе эгалитарной и утилитарной концепций. Алгоритм решения оптимизационной задачи по своей конструкции вариативен и допускает рассмотрение дополнительных показателей другой природы, а также расширение спектра накладываемых ограничений. Предложенный подход в нахождении рациональных схем распределения грузопотоков, изучаемых в рамках регионального рынка транспортных услуг, имеет общий характер и, с учетом соответствующей специфики, применим к другим наземным видам транспорта.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Aulin V, Lyashuk O, Pavlenko O, et al. Realization of the Logistic Approach in the International Cargo Delivery System. *Communications - Scientific letters of the University of Zilina*. 2019;21(2):3-12. doi: 10.26552/com.C.2019.2.3-12
2. Krajcovic M, Grznar P, Fusko M, et al. Intelligent Logistics for Intelligent Production Systems. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*. 2018;20(4):16–23. doi: 10.26552/com.C.2018.4.16-23
3. Shramenko NY, Shramenko VO. Mathematical model of the logistics chain for the

- delivery of bulk cargo by rail transport. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018;5(167):136–141. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/15
4. Prachi A, Talari G. Multi-choice stochastic transportation problem involving logistic distribution. *Advances and Applications in Mathematical Sciences*. 2018;18(1):45-58. Доступно по: <https://www.proquest.com/docview/2195081117> Ссылка активна на: 08.03.2023.
 5. Pronello C, Camusso C and Valentina R. Last mile freight distribution and transport operators' needs: which targets and challenges? *Transportation Research Procedia*. 2017;25(0):888-899. doi:10.1016/j.trpro.2017.05.464
 6. Elbert R, Müller JP, Rentschler J. Tactical network planning and design in multimodal transportation – A systematic literature review. *Research in Transportation Business & Management*, 2020;35:100462. doi: 10.1016/j.rtbm.2020.100462
 7. Копытов Е, Abramov D. Multiple-criteria analysis and choice of transportation alternatives in multimodal freight transport system. *Transport and Telecommunication Journal*. 2012;13(2):148-158. doi:10.2478/v10244-012-0012-x
 8. Yannis G, Kopsacheili A, Dragomanovits A, et al. State-of-the-art review on multi-criteria decision-making in the transport sector. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2020;7:413–431. doi:10.1016/j.jtte.2020.05.005
 9. Kabashkin I. Heuristic Based Decision Support System for Choice of Alternative Routes in the Large-Scale Transportation Transit System on the Base of Petri Net Model. *Procedia Engineering*. 2016;134:359-364. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.020
 10. Чеченова Л.М. Обоснование решений в области цифровизации контейнерных сервисов Октябрьской железной дороги // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 126–139. [Chechenova LM. Substantiation of solutions in the field of digitalization of container services of the Oktyabrskaya railway. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):126-139. (In Russ.). doi: 10.17816/transsyst202284126-139
 11. Yee H, Gijbrecchts J, Boute R. Synchronodal transportation planning using travel time information. *Computers in Industry*. 2021;125:103367. doi: 10.1016/j.compind.2020.103367.
 12. Jarašūnienė A, Batarlienė N, Vaičiūtė K. Application and Management of Information Technologies in Multimodal Transportation. *Procedia Engineering*. 2016;134:309-315. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.012
 13. Guimarães AG, Gonçalves AD. Maia Challenges and Innovation Opportunities in Load Multimodal Transport - LMT in Brazil: cluster technique application as a support tool for Decision Making. *Transportation Research Procedia*. 2017;25:870–887. doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.463
 14. Koohathongsumrit N, Meethom W. An integrated approach of fuzzy risk assessment model and data envelopment analysis for route selection in multimodal transportation networks. *Expert Systems with Applications*. 2021;171:114342. doi: 10.1016/j.eswa.2020.114342
 15. Bogachev VA, Kravets AS, Bogachev TV. Mathematical experiment as a tool for modeling the freight transportation process. *Journal of Physics: Conference series*. 2021;2131(2):022094. doi: 10.1088/1742-6596/2131/2/022094

Сведения об авторах:

Богачев Виктор Алексеевич, к.ф.-м.н. доцент;
eLibrary SPIN:2125-5198; ORCID: 0000-0003-1202-7318;
E-mail: bogachev-va@yandex.ru

Кравец Александра Сергеевна, к.т.н.;
eLibrary SPIN:9591-3729; ORCID: 0000-0001-7371-7158;
E-mail: kravec_as@mail.ru

Богачев Тарас Викторович, к.ф.-м.н., доцент;
eLibrary SPIN:2262-0080; ORCID: 0000-0001-9641-0116;
E-mail: bogachev73@yandex.ru

Information about the authors:

Viktor A. Bogachev, candidate of Physical and Mathematical Sciences, assistant professor;
eLibrary SPIN:2125-5198; ORCID: 0000-0003-1202-7318;
E-mail: bogachev-va@yandex.ru

Aleksandra S. Kravets, candidate of technical sciences;
eLibrary SPIN:9591-3729; ORCID: 0000-0001-7371-7158;
E-mail: kravec_as@mail.ru

Taras V. Bogachev, candidate of Physical and Mathematical Sciences, assistant professor;
eLibrary SPIN:2262-0080; ORCID: 0000-0001-9641-0116;
E-mail: bogachev73@yandex.ru

Цитировать:

Богачев В.А., Кравец А.С., Богачев Т.В. Математический эксперимент в логистических исследованиях мультимодальных грузоперевозок с временными и стоимостными показателями // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 1. – С. 108–121. doi: 10.17816/transsyst202391108-121

To cite this article:

Bogachev VA, Kravets AS, Bogachev TV. Mathematical experiment in logistics research of multimodal freight transportation with time and cost indicators. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):108-121. doi: 10.17816/transsyst202391108-121