

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗЕРНОВЫХ ГРУЗОПОТОКОВ, НАПРАВЛЕННЫХ В АДРЕС МАЛЫХ ПОРТОВ АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА



В.А. Богачев



А.С. Кравец

В рамках эгалитарной концепции в теории благосостояния разработан комплексный подход в нахождении рациональных схем распределения грузопотоков в мультимодальной транспортно-технологической системе. Предлагается оптимизационная модель регионального процесса грузоперевозок, математическая реализация которой представляет собой задачу целочисленного программирования, решенную с помощью системы компьютерной алгебры.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, грузовые перевозки, мультиагентность, распределение грузопотоков, критерий Парето

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_56

Значительная часть проводившихся в последнее время транспортно-логистических исследований посвящена вопросам оптимизации распределения грузопотоков, рассматриваемых в рамках мультимодальных систем транспортировки [1–5].

В статье [1] разработана модель поддержки принятия решений при рассмотрении устойчивой цепочки поставок продовольственного зерна с учетом всей сети центров закупок. Приводятся примеры функционирования модели на основе двух многоцелевых алгоритмов, в которых используется критерий Парето. Методы математического программирования используются в

[2]. При этом решается транспортная задача, в которой параметры спроса и предложения имеют стохастический характер, а стоимость зависит от их величины. В статье [3] представлены возможности совместного использования двух различных математических методов в транспортно-логистических исследованиях, при котором для рассматриваемого полигона строится ГЕМ олигополистического рынка грузовых перевозок. В [4;5] разработана функционирующая в программной среде оптимизационная модель мультимодальных грузовых перевозок, осуществляемых на транспортном полигоне согласно временным критериям.

Богачев Виктор Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС). Область научных интересов: нечеткие множества и их применение в анализе систем и процессов, оптимизация функционирования транспортно-технологических систем, системы аналитических вычислений в математическом моделировании, линейные операторы в пространствах аналитических функций. Автор 60 научных работ, в том числе одной монографии.

Кравец Александра Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС). Область научных интересов: взаимодействие в транспортно-технологических системах, управление грузопотоками, моделирование процессов перевозок. Автор 53 научных работ.

Игнатьева Олеся Владимировна, кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Вычислительная техника и автоматизированные системы управления» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС). Область научных интересов: информационные системы, информационные технологии, программирование, базы данных. Автор 51 научной работы, в том числе четырех учебников. Имеет три патента на изобретения.

Богачев Тарас Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Фундаментальной и прикладной математики» Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). Область научных интересов: нечеткие множества и их применение в анализе экономических систем, интеллектуальный анализ данных, оптимизация функционирования транспортно-технологических систем, системы аналитических вычислений в математическом моделировании, колебания пологих оболочек. Автор 88 научных работ, в том числе пяти монографий.

Об актуальности разработки комплексных подходов в изучении мультимодальных перевозок грузов

Приведенный выше анализ исследований, посвященных мультимодальным грузовым перевозкам, дает представление об актуальности рассматриваемых вопросов и разнообразии методов, которые применяются при изучении процессов, протекающих в различных транспортно-технологических системах.

Ввиду объемности и относительно низкой стоимости экспортируемых из России сырьевых товаров несомненный практический интерес представляет изучение мультимодальных перевозок, осуществляемых железнодорожным и морским видами транспорта. Из-за разветвленности путей сообщения в направлении портов Азово-Черноморского бассейна (АЧБ), а также присутствия на рынке перевозок значительного количества активно занимающихся указанным экспортом компаний, юго-западная часть полигона Северо-Кавказской железной дороги (СКЖД) выступает в качестве платформы, обеспечивающей развитой рынок транспортных услуг. В результате для клиентов открываются широкие возможности для выбора среди большого разнообразия схем грузоперевозок таких, которые оказываются предпочтительными с точки зрения рационализации всей транспортно-логистической цепочки.

Объектом проводимых в настоящей работе исследований являются схемы организации региональных мультимодальных грузоперевозок, которые позволяют оптимизировать перевозочный процесс на качественно новой основе по сравнению исследованиями, проводившимися ранее. Основная идея предлагаемого подхода состоит в комбинировании разработанных ранее в статьях [3–5] различных по своей математической природе методов с целью повышения достоверности получаемых результатов.

В работе рассматривается система транспортировки зерновых в адрес портов АЧБ. Реализация разработанного алгоритма оптимизации доведена до численных результатов в предположении, что предназначенный для перевозки зерновой груз находится на станциях погрузки Тагинская, Ремонтная, Сальск и Тихорецкая, а станциями выгрузки являются припортовые станции Ейск, Азов, Заречная, Таганрог и Усть-Донецкая (рис. 1).

Математическая модель перевозочного процесса

Целевые функции в оптимизационной задаче

В концептуальном отношении проводимые в настоящей работе исследования соответствуют эгалитарному подходу в теории благосостояния [6]. Это нахо-

дит выражение в выборе целевых функций и ограничений в оптимизационной задаче, который направлен на то, чтобы в той или иной форме учесть экономические и другие интересы рассматриваемых участников перевозочного процесса (согласно работе [6] для них используется термин «агенты»).

Приведем краткие пояснения к общим предположениям в рассматриваемой оптимизационной задаче. Имеется m станций погрузки и n станций выгрузки. Пусть a_i — число отправительских маршрутов, запланированных к вывозу с i -й станции погрузки ($i=1, 2, \dots, m$) и x_{ij} — число отправительских маршрутов, которые можно направить с i -й станции погрузки в адрес j -й станции выгрузки ($j=1, 2, \dots, n$). На первом этапе исследований в отношении множества D допустимых планов перевозок (x_{ij}) будем предполагать лишь, что все запланированное к вывозу зерно на станциях погрузки должно быть вывезено на рассматриваемые станции выгрузки. То есть предполагается выполнение равенств:

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

Таким образом, изначально ситуацию можно отнести к открытой модели. По мере развития оптимизационной модели выбор множества D будет корректироваться в зависимости от оперативных условий, в рамках которых изучается перевозочный процесс.

В качестве характеристик экономической целесообразности и уровня организации перевозочного процесса будем рассматривать стоимостной и временной показатели.



Рис. 1. Фрагмент полигона СКЖД

Стоимостной показатель в рассматриваемой оптимизационной задаче задается целевой функцией вида:

$$c = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}. \quad (2)$$

Здесь c_{ij} — стоимость перевозки одного отправительского маршрута (тыс. руб.) на участке между i -й станцией погрузки и j -й станцией выгрузки.

Величина c представляет собой суммарную стоимость перевозок всех отправительских маршрутов, которые участвуют в реализации плана перевозок (x_{ij}). Стоимость перевозки грузов является комплексным и разносторонним показателем процесса перевозки с точки зрения учета интересов различных участников этого процесса. Посредством показателя c выражаются не только экономические параметры перевозки, такие как транспортная составляющая в стоимости перевозимых товаров, затраты клиента, конкурентоспособность используемого вида транспорта.

Временной показатель в рассматриваемой оптимизационной задаче задается целевой функцией вида:

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

Здесь t_{ij} — время нахождения отправительского маршрута на участке между i -й станцией погрузки и j -й станцией выгрузки.

Показатель τ представляет собой суммарное время нахождения на полигоне всех отправительских маршрутов, которые участвуют в реализации плана перевозок (x_{ij}). Будем называть этот показатель суммарным временем плана перевозок (x_{ij}).

Ввиду того, что время τ является выражением степени занятости путевой инфраструктуры полигона при реализации плана перевозок (x_{ij}) (а, следовательно, и степени ее эксплуатации), к величине этого показателя со стороны компании ОАО «РЖД» (которая в России от лица государства выступает собственником этой инфраструктуры) естественно предположить двойственное отношение. С одной стороны, экономическая выгода указанного агента проистекает из эксплуатации путевой инфраструктуры. С другой стороны, интенсификация эксплуатации объектов этой инфраструктуры влечет за собой увеличение расходов, требуемых на их амортизацию.

Комплексность рассматриваемых критериев оптимизации позволяет предполагать наличие выгод в отношении каждого из агентов, причем как экономического, так и неэкономического характера (экологичность, ресурсосбережение, возможность обеспечения ритмичности перевозок и др.). Выгоду от минимизации показателя c получает такой агент перевозочного

процесса как клиент (грузовладелец), а также другие агенты в том случае, когда это снижение происходит не в результате демпинга цен на предоставляемые ими услуги, а вследствие использования ресурсосберегающих технологий.

Эгалитарный подход в двухкритериальной оптимизации

По своему аналитическому выражению (2) и (3) целевые функции c и τ не являются конфликтующими между собой (по крайней мере, в экономическом смысле) как это, вообще говоря, позиционируется в теории благосостояния в отношении полезностей рассматриваемых агентов [6].

Мы будем рассматривать оптимизационную задачу с целевыми функциями c и τ и множеством D допустимых планов перевозок, относительно которого будет происходить последовательное уточнение по мере того, как будут более полно учитываться обстоятельства рассматриваемой транспортно-логистической ситуации. Каждому плану перевозок (x_{ij}) $\in D$ поставим в соответствие вектор $\{c, \tau\}$, называемый вектором полезностей. Оптимальным назовем план перевозок (x_{ij}) $\in D$ с вектором полезности $\{c', \tau'\}$, для которого не существует плана перевозок (x_{ij}) $\in D$ такого, что координаты его вектора полезностей $\{c, \tau\}$ удовлетворяют условию ($c < c'$ и $\tau \leq \tau'$) или условию ($c \leq c'$ и $\tau < \tau'$).

Вспомогательные результаты

ГЕМ как источник ограничений в оптимизационной задаче

В этом разделе будут найдены ограничения на множество D допустимых планов перевозок (x_{ij}) (наряду с теми, что выражаются равенствами (1)) для того, чтобы более полно учесть специфику расположения железнодорожной сети в рассматриваемом регионе. При этом мы обратимся к разработанной ранее геометрической евклидовой модели (ГЕМ) территориального олигополистического рынка грузовых перевозок, создаваемого рассматриваемыми станциями погрузки. Полное изложение соответствующих транспортно-логистических построений содержится, например, в статьях [3;4]. В настоящей работе приводятся только результаты, полученные на промежуточных этапах построения указанной модели в рассматриваемой ситуации.

Территориальная картина грузоперевозок в регионе

Пользуясь экономико-географическим методом разграничения «областей влияния» станций погрузки [4;5], найдем алгебраические кривые 4-го порядка, которые осуществляют указанное разграничение в рассматриваемой ситуации. В результате будет получена территориальная картина олигополистического

рынка грузовых перевозок, о которой сказано во введении. Напомним, что разграничение «областей влияния» станций погрузки осуществляется в соответствии со стоимостью перевозки грузов от этих станций до пунктов назначения.

Первый этап построения ГЕМ состоит в нахождении для каждой из рассматриваемых станций погрузки соответствующего выражения зависимости стоимости c (тыс. руб.) перевозки одного отправительского маршрута от длины l (км) пройденного пути. После обработки методом наименьших квадратов числовых данных, представляющих собой характеристику транспортного потока зерновых грузов, получаем, что для каждой станции искомая зависимость имеет вид: $c = p + ql$. Здесь p и q – стоимостные показатели, которыми выражаются затраты на начально-конечные и движущие операции (на 1 км пути), приходящиеся на один отправительский маршрут. Найденные для каждой станции погрузки выражения зависимости приведены в табл. 1.

Указанные выше выражения позволяют построить ГЕМ территориального олигополистического рынка перевозок зерновых, создаваемого на данном транспортном полигоне рассматриваемыми станциями погрузки. Простейшей формой функционирования такого рынка является процесс грузоперевозок, осуществляемый в рамках какой-либо операторской компании.

Полученная в результате исследования территориальная картина рынка грузоперевозок, создаваемого рассматриваемыми в настоящей работе четырьмя станциями погрузки, приведена на рис. 2.

Формулировка предварительных ограничений в оптимизационной задаче

В «область влияния» станции погрузки Тацинская попадает припортовая станция Усть-Донецкая, а в «область влияния» станции погрузки Тихорецкая – остальные четыре припортовых станции: Ейск, Азов, Заречная и Таганрог. Таким образом, в «области влияния» станций погрузки Ремонтная и Сальск не попадает ни одна из рассматриваемых в настоящей работе припортовых станций. Заметим, что этот



Рис. 2. Территориальная картина рынка грузоперевозок

результат не получается непосредственно, то есть если руководствоваться лишь какими-то географическими «соображениями».

Выполненное в настоящих исследованиях комбинирование различных математических методов, с одной стороны, позволяет повысить степень достоверности результатов, которые получают далее в процессе решения поставленной задачи. С другой, удастся сократить объем вычислительных процедур, требуемых для реализации разработанного в статье соответствующего оптимизационного алгоритма.

Итак, относительно ограничений на множество допустимых планов перевозок в оптимизационной задаче далее будем предполагать следующее. Маршруты со станций Тацинская и Ремонтная могут направляться в адрес всех припортовых станций, за исключением станции Ейск. При этом со станции Тацинская хотя бы один маршрут должен быть направлен в адрес станции Усть-Донецкая. Маршруты со станции Сальск могут направляться в адрес всех припортовых станций, за исключением станции Таганрог. Наконец, маршруты со станции Тихорецкая могут быть направлены в адрес всех припортовых станций, за исключением станции Усть-Донецкая.

Таблица 1

Выражения зависимости стоимости перевозки вагона со станций погрузки

№ п/п	Станция погрузки	$c = p + ql$
1	Тацинская	$c = 645,11 + 1,8421l$
2	Ремонтная	$c = 664,96 + 1,8286l$
3	Сальск	$c = 616,62 + 1,9996l$
4	Тихорецкая	$c = 548,58 + 2,2171l$

Предварительные результаты

Приведем предварительные (имеющие пробный характер) результаты решения поставленной в разделе «Математическая модель перевозочного процесса» оптимизационной задачи, которые получаются при некоторых дополнительных предположениях относительно числа рассматриваемых отправительских маршрутов. Здесь и далее вычислительные процедуры выполнены в среде Maxima (Free Ware).

Для определенности начнем с предположения, когда на каждой из четырех рассматриваемых станций погрузки находятся по 2 отправительских маршрута с зерном.

В отношении множества D допустимых планов перевозок (x_{ij}) сначала предполагаем лишь выполнение равенств (1). В табл. 2 приведены 15 планов перевозок, представляющих собой «ступеньки» в «оптимизационной лестнице», получаемой в процессе улучшения допустимых планов согласно критерию Парето. Эти планы выбраны из многих сотен тысяч планов (которые на данном этапе исследования составляют множество D), проанализированных системой компьютерной алгебры в соответствии с разработанным алгоритмом оптимизации. Из содержащегося в последней строке таблицы оптимального плана перевозок видно, что в адрес припортовой станции Таганрог должны быть направлены 6 маршрутов, а в адрес станции Усть-Донецкая — 2 маршрута. В адрес остальных трех припортовых станций поступления отсутствуют.

Итак, все отправительские маршруты распределены между двумя указанными припортовыми

станциями. Заметим, что если исходить лишь из географических соображений, то полученное распределение грузопотока выглядит естественно (рис. 1), хотя не является очевидным с количественной точки зрения.

Воспользуемся теперь теми предварительными ограничениями на число маршрутов, отправляемых со станций погрузки, которые были получены выше с помощью ГЕМ и сформулированы в подразделе «Формулировка предварительных ограничений в оптимизационной задаче». В табл. 3 приведены 7 планов перевозок, представляющих собой «ступеньки» в соответствующей «оптимизационной лестнице».

Найденный оптимальный план перевозок совпал с тем, что был получен выше. Однако, «оптимизационная лестница» оказалась существенно короче и быстрее был реализован объем необходимых вычислительных процедур.

Далее изложение предварительных результатов продолжим в предположении, что в адрес каждой из припортовых станций должен поступить хотя бы один отправительский маршрут с зерном.

В отношении множества D допустимых планов перевозок (x_{ij}) также сначала будем предполагать лишь выполнение равенств (1). В табл. 4 приведены 7 планов перевозок, представляющие собой «ступеньки» «оптимизационной лестницы» в указанной ситуации. Отметим, что станции Заречная и Усть-Донецкая по-прежнему доминируют среди других припортовых станций.

Обратимся и в этом случае к предварительным ограничениям на число маршрутов, которые были

Таблица 2

Допустимые планы перевозок в задаче без дополнительных ограничений

№	Допустимые планы перевозок	Число отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					с	τ
		Ейск	Азов	Заречная	Таганрог	Усть-Донецкая		
1	0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,0,0,2	0	0	0	0	8	10325,16	8,62
2	0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,0,1,1	0	0	0	1	7	10142,46	8,37
...	...	...	...	...	...	...	...	...
14	0,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0	0	0	5	1	2	8595,54	5,96
15	0,0,0,0,2,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0	0	0	6	0	2	8483,52	5,74

Таблица 3

Допустимые планы перевозок в задаче с ограничениями, даваемыми ГЕМ

№	Допустимые планы перевозок	Число отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					с	τ
		Ейск	Азов	Заречная	Таганрог	Усть-Донецкая		
1	0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,0,2,0,0,2,0,0	0	0	2	0	6	9646,08	7,66
2	0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,1,0,1,0,0,2,0,0	0	0	3	0	5	9345,60	7,18
...	...	...	...	...	...	...	...	...
6	0,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0	0	0	5	1	2	8595,54	5,96
7	0,0,0,0,2,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0	0	0	6	0	2	8483,52	5,74

Таблица 4

Допустимые планы перевозок в задаче без дополнительных ограничений

№	Допустимые планы перевозок	Число отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					с	τ
		Ейск	Азов	Заречная	Таганрог	Усть-Донецкая		
1	0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,1,1,0,1,1,0,0,0	1	1	1	1	4	9580,32	7,01
2	0,0,0,0,2,0,0,0,1,1,0,0,1,0,1,1,1,0,0,0	1	1	1	1	4	9555,42	7,01
3	0,0,0,0,2,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0,1,1,0,0,0	1	1	1	2	3	9411,54	6,75
4	0,0,0,0,2,0,0,0,1,1,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0	1	1	2	1	3	9254,94	6,53
5	0,0,0,0,2,0,0,0,2,0,0,0,1,1,0,1,1,0,0,0	1	1	1	3	2	9242,76	6,49
6	0,0,0,0,2,0,0,0,2,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0	1	1	2	2	2	9086,16	6,27
7	0,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0	1	1	3	1	2	8974,14	6,05

получены выше с помощью ГЕМ. В результате оказывается, что «оптимизационная лестница» сокращается до четырех «ступенек» (табл. 5).

Итак, в результате проведенных предварительных исследований можно сделать вывод об адекватности ограничений, даваемых ГЕМ, с точки зрения применения их при решении рассматриваемой оптимизационной задачи, а также их эффективности с точки зрения рационализации оптимизационного процесса.

Основные результаты

К факторам, которые оказывают объективное влияние на распределение грузопотоков в адрес рассматриваемых в статье припортовых станций, следует отнести их географическое расположение и экспортный потенциал.

Высокая грузонапряженность железнодорожных подходов во все указанные порты и отсутствие складов достаточно большой емкости создают необходи-

Таблица 5

Допустимые планы перевозок в задаче с ограничениями, даваемыми ГЕМ

№	Допустимые планы перевозок	Число отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					с	τ
		Ейск	Азов	Заречная	Таганрог	Усть-Донецкая		
1	0,0,0,0,2,0,0,0,1,1,0,0,1,0,1,1,1,0,0,0	1	1	1	1	4	9555,42	7,01
2	0,0,0,0,2,0,0,0,1,1,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0	1	1	2	1	3	9254,94	6,53
3	0,0,0,0,2,0,0,0,2,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0	1	1	2	2	2	9086,16	6,27
4	0,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0	1	1	3	1	2	8974,14	6,05

мость в весьма тщательном планировании времени доставки в них грузов.

В порты городов Ейск и Таганрог заходят морские суда дедвейтом соответственно до 7 и 15 тыс. т. В порты городов Азов, Заречная и Усть-Донецк заходят морские суда дедвейтом соответственно до 7, 5 и 5 тыс. т. Заметим, что каждое судно дедвейтом в 7 тыс. т заполняется двумя отправительскими маршрутами, которые в среднем состоят из 50 вагонов грузоподъемностью по 64 т каждый. Считаем, что одно судно дедвейтом в 15 тыс. т заполняется четырьмя маршрутами, а два судна дедвейтом по 5 тыс. т — тремя маршрутами.

Будем предполагать, что на каждой из четырех рассматриваемых станций погрузки находятся по 4 отправительских маршрута с зерном. В адрес станции Ейск могут быть направлены 2, 4, 6 или 8 маршрутов. В адрес станции Азов — 2 или 4 маршрута. В адрес станции Таганрог — 4 или 8 маршрутов. В адрес станции Усть-Донецкая — 1, 3, 4 или 6 маршрутов. Для того, чтобы убедиться в гибкости разработанного оптимизационного алгоритма, припортовую станцию Заречная освободим от ограничений на число маршрутов, направляемых в ее адрес.

В табл. 6 приведены 11 планов, получаемых в процессе улучшения допустимых планов перевозок согласно критерию Парето. Они выбраны системой компьютерной алгебры из миллионов проанализированных планов, которые в данной ситуации составляют множество D . Рис. 3 дает наглядное представление об оптимизации процесса перевозок по двум рассматриваемым показателям.

Из содержащегося в последней строке табл. 6 оптимального плана перевозок видно, что в адрес припор-

товой станции Заречная должны быть направлены 4 маршрута, содержимое которых обеспечивается вместимостью трех судов дедвейтом 5 тыс. т.

Выводы

Рассматривается комплексный подход в нахождении рациональных схем распределения грузопотоков в мультимодальной транспортно-технологической системе. В рамках эгалитарной концепции в теории благосостояния разработана функционирующая в программной среде системы аналитических вычислений оптимизационная модель процесса грузоперевозок со стоимостным и временным показателями. В качестве вспомогательного инструмента при нахождении ограничений в оптимизационной задаче используется разработанный ранее авторами общий подход в транспортно-логистических исследованиях, при котором для рассматриваемого полигона строится геометрическая евклидова модель регионального олигополистического рынка транспортных услуг, образуемого станциями погрузки.

Предложенный подход к нахождению рациональных схем распределения грузопотоков в рамках регионального рынка транспортных услуг является универсальным в отношении видов транспорта. Рассматриваемые в сочетании метод экономико-географического разграничения «областей влияния» станций погрузки и оптимизационный алгоритм распределения грузопотоков согласно критерию Парето, могут быть использованы при изучении вопросов оптимального функционирования других видов наземного транспорта с учетом характера и специфики используемой при этом инфраструктуры. 

Таблица 6

Распределение грузопотоков при двухкритериальной оптимизации

№	Допустимые планы перевозок	Число отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции				
		Ейск	Азов	Заречная	Таганрог	Усть-Донецкая
1	0,0,0,3,1,0,0,0,1,3,2,0,0,0,2,2,2,0,0,0	4	2	0	4	6
2	0,0,0,3,1,0,0,0,1,3,2,0,0,0,2,0,2,2,0,0	2	2	2	4	6
3	0,0,0,3,1,0,0,0,1,3,4,0,0,0,0,0,2,2,0,0	4	2	2	4	4
4	0,0,0,3,1,0,0,0,1,3,2,0,2,0,0,0,2,2,0,0	2	2	4	4	4
5	0,1,0,2,1,0,0,0,2,2,2,0,2,0,0,0,1,3,0,0	2	2	5	4	3
6	0,0,0,2,2,0,0,0,2,2,2,0,2,0,0,0,2,2,0,0	2	2	4	4	4
7	0,1,0,1,2,0,0,0,3,1,2,0,2,0,0,0,1,3,0,0	2	2	5	4	3
8	0,0,0,1,3,0,0,0,3,1,2,0,2,0,0,0,2,2,0,0	2	2	4	4	4
9	0,2,1,0,1,0,0,0,4,0,2,0,2,0,0,0,0,4,0,0	2	2	7	4	1
10	0,1,0,0,3,0,0,0,4,0,2,0,2,0,0,0,1,3,0,0	2	2	5	4	3
11	0,0,0,0,4,0,0,0,4,0,2,0,2,0,0,0,2,2,0,0	2	2	4	4	4

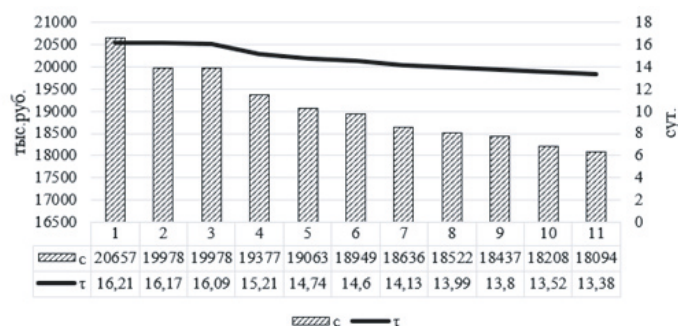


Рис. 3. Динамика поведения целевых функций при двухкритериальной оптимизации

Литература

1. Mogale, D.G. Modelling of sustainable food grain supply chain distribution system: a bi-objective approach / D.G. Mogale, N. Cheikhrouhou, M.K. Tiwari // International Journal of Production Research. — 2020. — Т. 58 (18). — С. 5521–5544.
2. Prachi, A. Multi-choice stochastic transportation problem involving logistic distribution / A. Prachi, G. Talari // Advances and Applications in Mathematical Sciences. — 2018. — Т. 18 (1). — Р. 45–58.
3. Богачев, В.А. Математическое моделирование в оптимизации территориального рынка грузоперевозок в припортовой транспортной зоне / В.А. Богачев, А.С. Кравец, Т.В. Богачев, М.А. Мельников. — Текст: непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. — 2020. — № 2 (80). — С. 84–92.
4. Chislov, O.N. Modelling of the rail freight traffic by the method of economic-geographical delimitation in the region of the South-Easter Coast of the Baltic Sea / O.N. Chislov, V.A. Bogachev, V.M. Zadorozhnyi, O.I. Demchenko, V.V. Khan, T.V. Bogachev // Transport problems. — 2019. — Т. 14. — № 2. — С. 77–87.
5. Chislov, O.N. Time Parameters Optimization of the Export Grain Traffic in the Port Railway Transport Technology System / O.N. Chislov, V.M. Zadorozhnyi, T.V. Bogachev, A.S. Kravets, I.N. Egorova, V.A. Bogachev // Smart and Green Solutions for Transport Systems. — 2020. — Т. 1091. — С. 126–137.
6. Мулен, Э. Кооперативное принятие решений: Аксиомы и модели / Э. Мулен; Пер. с англ. О. Р. Меньшиковой; Под ред. И. С. Меньшикова; [Предисловия И. Меньшикова, А. Сена]. — Москва: Мир, 1991. — 463 с. — ISBN 5-03-002131-0. — Текст: непосредственный.