

## ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕГИОНАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Кандидат техн. наук, доцент **Попов П.В.**  
(Волгоградский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова),

**Степин Ю.Г.**

(Гродненский государственный университет имени Янки Купалы),

кандидат физ.-мат.наук, доцент **Цехан О.Б.**

(Гродненский государственный университет имени Янки Купалы),

кандидат физ.-мат.наук, доцент **Будько О. Н.**

(Гродненский государственный университет имени Янки Купалы)

## APPROACH TO SOLVING THE PROBLEM OF OPTIMIZATION OF REGIONAL TRANSPORT INFRASTRUCTURE

**P.V. Popov**, Ph. D. (Tech.), Associate Professor  
(Volograd Branch of Plekhanov Russian University of Economics ),

**Yu.G. Stepin**

(Yanka Kupala State University of Grodno),

**O.B. Tsekhan**, Ph.D. (Physics & Math), Associate Professor  
(Yanka Kupala State University of Grodno),

**O.N. Budko**, Ph.D. (Physics & Math), Associate Professor  
(Yanka Kupala State University of Grodno)

**Аннотация.** Важность развития транспортной инфраструктуры с целью повышения инвестиционной привлекательности региона, мобильности граждан, устранения дисбаланса в социально-экономическом развитии регионов отражена в основополагающих стратегиях и концепциях развития страны. Предложен методологический подход, в рамках которого разработана математическая модель построения транспортной инфраструктуры на территории региона. Изложены два подхода к численному решению задачи рационального формирования сети автотранспортных парков в составе транспортной инфраструктуры региона на основе модели оптимизации размещения автотранспортных парков (терминалов) с учетом сформированной сети распределительных складов и заданной сети поставщиков и потребителей.

Решена задача определения пунктов размещения и мощностей автотранспортных парков по критерию минимума суммарных затрат на содержание автотранспортных парков, перегон порожнего автомобильного транспорта к поставщикам, производителям и складам, доставку товаров по всей сети, а также грузопереработку. Описаны условия применимости каждого подхода, указаны их преимущества и недостатки, выполнен сравнительный анализ результатов реализации двух подходов на модельных и реальных данных для частного случая задачи с однопродуктовыми потоками, двумя типами автотранспортных средств и линейными функциями затрат.

**Abstract.** The importance of the development of transport infrastructure in order to increase the investment attractiveness of the region, the mobility of citizens, and eliminate the imbalance in the socio-economic development of the regions is reflected in the fundamental strategies and concepts of the country's development. The authors of the article propose a methodological approach, within the framework of which a mathematical model for building a transport infrastructure in the region has been developed.

The article presents two approaches to the numerical solution of the problem of rational formation of a network of motor transport fleets as part of the transport infrastructure of a region based on a model for optimizing the placement of motor transport fleets (terminals), taking into account the formed network of distribution warehouses and a given network of suppliers and consumers. The problem of determining the locations and capacities of vehicle fleets is solved according to the criterion of the minimum total costs for the maintenance of vehicle fleets, the transfer of empty vehicles to suppliers, manufacturers and warehouses, the delivery of goods throughout the network, as well as cargo handling of goods.

The conditions for the applicability of each approach are described, their advantages and disadvantages are indicated, a comparative analysis of the results of the implementation of the two approaches on model and real data for a particular case of a problem with single-product flows, two types of vehicles and linear cost functions is performed.

**Ключевые слова:** транспортная инфраструктура, сеть автопарков, распределительные склады, декомпозиция, двухуровневое объемное планирование.

**Keywords:** transport infrastructure, a network of car fleets, distribution warehouse, decomposition, two-level volumetric planning.

## Введение

Важность развития региональной транспортной инфраструктуры, оказывающей влияние на социально-экономические показатели субъекта РФ и страны, способствующей повышению качества и количества оказываемых логистических услуг, отражено как в основополагающих стратегиях и концепция развития РФ, так в работах отечественных [1-3] и зарубежных ученых [4-6].

В настоящее время существует значительное число работ, в которых представлены математические методы и модели, а также подходы к формированию и реинжинирингу региональной транспортной инфраструктуры [7-10]. Все эти методы и модели можно условно разделить на две большие группы, простые и сложные [11-12]. Однако в данных работах не рассматривается возможность одновременного формирования складской и транспортной инфраструктуры с определением количества и мощности ключевых объектов логистической инфраструктуры.

В работах [13-16] на основе разработанной авторами методологии формирования логистической инфраструктуры региона предложен подход определения районов субъекта Российской Федерации, где целесообразно размещение региональной складской и транспортной сети, построены математические модели, позволяющие определить оптимальную дислокацию ключевых объектов складской и транспортной инфраструктуры. В работе [17] выполнена модификация математических моделей с учетом стохастического спроса на товар в работах. Полученные модели предложено решать на основе непрямого подхода с помощью сведения стохастической задачи оптимизации к детерминированной.

В данной работе авторами предлагается подход к численному решению детерминированного эквивалента задачи определения оптимального месторасположения ключевых объектов основной составляющей логистической инфраструктуры с учетом неопределенности спроса средствами EXCEL. Описаны условия применимости, указаны преимущества и недостатки, выполнен сравнительный анализ результатов на модельных и реальных данных для частного случая задачи с однопродуктовыми потоками и двумя типами автотранспортных средств.

### Постановка задачи

Пусть на территории региона сформирована складская инфраструктура, т.е. определены места располо-

жения распределительных складов, их мощности и известен тип товароносителя, а также издержки на переработку грузов на складах. Кроме этого, дано местонахождение поставщиков (включая производителей) продукции, объемы поставок (запасы) товаров от поставщиков в разрезе номенклатурных групп товаров, пункты потребления (потребители) гетерогенной продукции и их средний спрос, который должен быть полностью удовлетворен, транспортные издержки, связанные с поставкой товаров от поставщиков на склад и со складов потребителям, а также движением порожнего транспорта. Определены возможные места расположения автотранспортных парков/терминалов, а также доступные для перевозки груза виды транспортных средств и их максимальное количество, которое может быть размещено в автопарках. Перевозка выполняется пакетами на поддонах, причем каждый пакет содержит только один тип товара/груза. Для каждого вида транспортного средства определена его грузоподъемность (в пакетах, далее п.). Порожные автотранспортные средства возвращаются в автопарк.

Требуется определить местоположение и мощности автопарков, план перевозки грузов в рамках формируемой логистической инфраструктуры по критерию минимизации суммарных затрат построенной сети распределения, при условии полного удовлетворения спроса в среднем.

Рассмотрим постановку задачи в следующих предположениях.

*Предположение 1:* перевозка от поставщиков на склады выполняется однотипным большегрузным транспортом заданной грузоподъемностью, а со складов потребителям – однотипным малогрузным транспортом заданной грузоподъемностью.

*Предположение 2:* груз однородный.

*Предположение 3:* затраты на размещение и содержание автотранспортного парка линейно зависят от мощности автопарка (количества размещенных в нем машин).

*Предположение 4:* для доставки грузов в требуемом объеме до потребителей имеется достаточное количество транспортных средств.

*Предположение 5:* рассматривается задача краткосрочного объемного планирования.

*Предположение 6:* перевозки от поставщиков непосредственно потребителям отсутствуют.

Для формирования соответствующей математической модели введем следующие обозначения.

Таблица 1.

### Модельные обозначения

1.	Вместимость машин большегрузных, п.	$v_1$
2.	Вместимость машин малогрузных, п.	$v_2$
3.	Индекс/количество возможных мест размещения автопарков	$i / I$
4.	Затраты на размещение и содержание одного большегрузного автотранспортного средства в автопарке (для каждого автопарка) руб./дн.	$CN_i, i = 1, 2, \dots, I$
5.	Затраты на размещение и содержание одного малогрузного автотранспортного средства в автопарке (для каждого автопарка) руб./дн.	$Cn_i, i = 1, 2, \dots, I$
6.	Индекс/количество поставщиков	$r / R$
7.	Запас товара у каждого поставщика, п.	$S_r, r = 1, 2, \dots, R$

8.	Индекс/количество складов	$j / J$
9.	Мощность складов, п.	$W_j, j = 1, 2, \dots, J$
10.	Затраты на грузопереработку одного пакета на $j$ -м складе, руб./ п.	$C_j, j = 1, 2, \dots, J$
11.	Индекс/количество потребителей	$k / K$
12.	Потребность каждого потребителя, п.	$D_k, k = 1, 2, \dots, K$
13.	Средний спрос потребителя $k$ , п.,	$d_k$
14.	Транспортные затраты на перегон единицы порожнего большегрузного автомобильного транспорта из $i$ -го автопарка к $r$ -му поставщику; (руб.)	$C1_{ir}, i = 1, 2, \dots, I$ $r = 1, 2, \dots, R$
15.	Транспортные затраты на перегон единицы порожнего малогрузного автомобильного транспорта из $i$ -го автопарка к $j$ -му складу; (руб.)	$C1_{ij}, i = 1, 2, \dots, I$ $j = 1, 2, \dots, J$
16.	Стоимость доставки единицы пакета товара от $r$ -го поставщика в $j$ -й склад общего назначения, руб.	$C(1)_{rj}, r = 1, 2, \dots, R$ $j = 1, 2, \dots, J$
17.	Стоимость доставки единицы пакета товара с $j$ -го склада общего назначения в $k$ -й пункт потребления, руб.	$C(2)_{jk}, j = 1, 2, \dots, J$ $k = 1, 2, \dots, K$
18.	Объем перевозки груза от поставщика $r$ на склад $j$ , п.	$x(1)_{rj}$
19.	Объем перевозки груза со склада $j$ потребителю $k$ , п.	$x(2)_{jk}$
20.	Количество большегрузных машин, требуемых для перевозки груза в требуемом объеме от поставщика $r$ на склад $j$ , шт.	$n1_{rj}$
21.	Количество малогрузных машин, требуемых для перевозки груза в требуемом объеме со склада $j$ потребителю $k$ , шт.	$n2_{jk}$
22.	Запас поставщика $r$ , т.п.	$S_r$
23.	Количество большегрузных машин в $i$ -м автопарке, шт.	$y1_i$
24.	Количество малогрузных машин в $i$ -м автопарке, шт.	$y2_i$
25.	Количество единиц порожнего большегрузного автомобильного транспорта, перегоняемого из $i$ -го автопарка к $r$ -му поставщику, шт.	$y1_{ri}$
26.	Количество единиц порожнего малогрузного автомобильного транспорта, перегоняемого из $i$ -го автопарка на $j$ -й распределительный склад, шт.	$y2_{ij}$
27.	Максимальная мощность $i$ -го автопарка, машин	$N_i$

Математическая модель задачи имеет вид:

$$Z = z_1 + z_2 + z_3 + z_4 \rightarrow \min \quad (1) \quad \sum_{j=1}^J y2_{ij} \leq N2_i, i = \overline{1, I}, \quad (7)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x1_{rj} \leq W_j, j = \overline{1, J} \quad (2) \quad \sum_{j=1}^J x1_{rj} \leq \sum_{i=1}^I y1_{ir1} \cdot v_1, r = \overline{1, R} \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H x2_{jk} \leq W_j, j = \overline{1, J} \quad (3) \quad \sum_{k=1}^K x2_{jk} \leq \sum_{i=1}^I y2_{ij} \cdot v_2, j = \overline{1, J}, \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H x2_{jk} = d_k, k = \overline{1, K} \quad (4) \quad \sum_{r=1}^R x1_{rj} \geq \sum_{k=1}^K x2_{jk}, \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H x1_{rj} \leq S_r, r = \overline{1, R} \quad (5) \quad y1_i + y2_i \leq N_i, i = \overline{1, I}, \quad (11)$$

$$\sum_{r=1}^R y1_{ir} \leq N1_i, i = \overline{1, I}, \quad (6) \quad x1_{rj}, x2_{jk} \geq 0, y1_i, y1_{ir}, y2_{ij} \in Z_{\geq 0} \forall i, j, k, r, h = 1, 2 \dots I, J, K, R, H \quad (12)$$

Здесь переменными модели являются объемы грузоперевозок  $x1_{rj}, x2_{jk}$  и потоки перемещения порожних автомобилей  $y1_{ir}, y2_{ij}$ ,  $z_1 = \sum_i CN_i \sum_r y1_{ir} + \sum_i Cn_i \sum_r y2_{ir}$  – затраты на размещение и содержание автотранспортного парка в каждом пункте,  $z_2 = \sum_j \left( \sum_r c(1)_{rj} \cdot x1_{rj} + \sum_k c(2)_{jk} \cdot x2_{jk} \right)$  – транспортные затраты на транспортировку товаров на склады и со складов,  $z_3 = \sum_i \left( \sum_r c1_{ir} \cdot y1_{ir} + \sum_j c2_{ij} \cdot y2_{ij} \right)$  – затраты на перегон порожнего автотранспорта,  $z_4 = \sum_j c_j \sum_r x1_{rj}$  – затраты на грузопереработку.

Ограничения (5) отражают требования по перевезенной продукции от поставщиков на склады (ограничения-неравенства, запасы могут остаться); (10) баланс по количеству продукции поступившей на склад и вывезенной с этого склада; (4) – по доставленной продукции со складов потребителям (полное удовлетворение спроса в среднем); (2) – по полученной продукции каждым складом от поставщиков; (8) – по потребностям в большегрузных машинах; (9) – по потребностям в малогрузных машинах; (11) – ограничения по мощности парков; (6), (7) отражают возможности в поставке порожняка автопарков, (12) – искомые перевозки продукции неотрицательные, а количества машин – целые.

С учетом того, что при доставке груза на склады используется только большегрузный транспорт, а при доставке грузов к потребителям – только малогрузный, необходимое количество машин по каждой коммуникации для спланированной перевозки продукции в соответствии с вместимостью каждого типа машин рассчитываем по формулам:

$$n1_{rj} = \left\lceil \frac{x1_{rj}}{v_1} \right\rceil + 1, n2_{jk} = \left\lceil \frac{x2_{jk}}{v_2} \right\rceil + 1 \quad (13)$$

Полученные значения определяют план движения грузеного автотранспорта. План загрузки автотранспортных парков определяется как

$$y1_i = \sum_{r=1}^R y1_{ir}, y2_i = \sum_{r=1}^R y2_{ir}, i = \overline{1, I}.$$

Количество машин необходимых для перевозки грузов с ограничениями (8), (9) можно записать в виде:

$$\sum_{j=1}^J n1_{rj} \leq \sum_{i=1}^I y1_{ir}, r = \overline{1, R} \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^K n2_{jk} \leq \sum_{i=1}^I y2_{ij}, j = \overline{1, J}, \quad (15)$$

Решением задачи на основе модели (1)-(12) является множество элементов  $\{y1_i, y2_i, y1_{ir}, y2_{ij}, n1_{rj}, n2_{jk}\}$ , определяющее план загрузки автотранспортных парков  $\{y1_i, y2_i\}$ , количество перегоняемого порожнего транспорта  $y1_{ir}, y2_{ij}$  и грузеного транспорта  $n1_{rj}, n2_{jk}$ .

При этом если для какого-то возможного пункта размещения автопарка  $i$  согласно полученному решению окажется  $y1_i + y2_i = 0$ , то в  $i$ -м пункте не планируется размещение автопарка. В каждом  $i$ -м пункте с  $y1_i + y2_i > 0$  планируется размещение автопарка мощностью  $y1_i + y2_i$  и составом  $\{y1_i, y2_i\}$ .

Опишем подход к численному решению задачи на основе модели (1)-(12).

**Пример.** Рассмотрим модельный пример со следующими исходными данными (для показа работы алгоритма возьмем небольшие значения).

Количество возможных мест размещения автопарков – 3, в каждом может быть 2 вида машин: большегрузные (вместимостью 50 п. каждая) и малогрузные (вместимостью 20 п. каждая).

Вместимость предполагаемых автопарков: 10, 15, 13 большегрузных и 30, 25, 40 малогрузных машин соответственно.

Затраты на размещение и содержание в автопарках составляют: по большегрузным машинам – 16, 18, 17 ден. ед./дн., по малогрузным – 12, 14, 13 ден. ед./дн.

Количество поставщиков – 4, их запасы – 243, 281, 268, 179 п. соответственно.

Количество складов – 3, их предельные мощности одинаковые: 700 п. Если склады имеют емкость больше, чем требуется, то можно считать, что максимальное количество продукции, которое может поступить на каждый склад в результате перевозки, равно суммарному спросу. Затраты на переработку 1 п. на складах составляют 2,1,3 ден.ед., соответственно.

Количество потребителей – 6, их спрос – 59, 141, 44, 43, 123, 286 п.

Затраты на перегон 1 ед. большегрузного порожняка из автопарков к поставщикам (АП-S), 1 ед. малогрузного порожняка из автопарков на склады (АП-W), транспортировку одного пакета от поставщиков на склады (S-W) и одного пакета со складов потребителям (W-D) представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2.

**Затраты на перегон 1 ед. большегрузного порожняка из автопарков к поставщикам (АП-S), 1 ед. малогрузных порожних автомобилей из автопарков на склады (АП-W)**

	S1	S2	S3	S4
A1	5	7	4	6
A2	2	4	6	3
A3	3	5	2	7

	W1	W2	W3
A1	3	3	4
A2	5	2	4
A3	7	4	6

Таблица 3.

**Затраты на транспортировку одного пакета от поставщиков на склады (S-W) и одного пакета со складов потребителям (W-D)**

	W1	W2	W3
S1	8	5	6
S2	6	5	6
S3	5	5	4
S4	4	7	7

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
W1	4	4	4	7	6	6
W2	5	6	7	7	6	8
W3	7	4	7	7	4	6

Для данных примера суммарный спрос составляет 696 ед., суммарные запасы продукции у поставщиков – 971 ед., модель открытая (несбалансированная), часть продукции у поставщиков останется.

Для непосредственного решения задачи по модели (1)-(12) при допустимых размерах модели (число переменных не больше 200 и число ограничений не более 100) задачу можно решить в Excel средствами Поиска решения.

Переменными модели являются объемы грузоперевозок  $x1_{rj}, x2_{jk}$  и потоки перемещения порожних автомобилей  $y1_{ir}, y2_{ij}$ . Для них в Excel резервируем соответствующие ячейки.

Для формирования исходных данных модели в Excel выполним эквивалентные преобразования компонент целевой функции (1), при этом учтем, что условие (10) допустимо рассматривать как равенство.

$$Z_2 + Z_4 = \sum_j \left( \sum_r c(1)_{rj} \cdot x1_{rj} + \sum_k c(2)_{jk} \cdot x2_{jk} \right) + \sum_j c_j \sum_k x2_{jk} = \sum_j \sum_k \left( c(2)_{jk} + c_j \right) \cdot x2_{jk} + \sum_j \sum_r \left( 1 \right)_{rj} \cdot x1_{rj} \quad (16)$$

Таким образом, поскольку вся привезенная на склад продукция перерабатывается, то к тарифам перевозки 1 ед. продукции со складов к потребителям можно добавить тарифы ее переработки. Аналогично к тарифам перегона порожних автомобилей можно добавить тарифы содержания одной машины в автопарке. Легко понять, что аналогичным образом можно перенести тарифы переработки грузов по складам на тарифы перевозок от поставщиков на склады (при условии, что лишнего не перевозим).

При формировании электронной модели в Excel исходные данные (с учетом преобразования тарифов) размещаются в табличной форме на листе.

При формировании ограничений с учетом того, что целью является минимизация целевой функции (1), ограничения (10) можно использовать как ограничения-равенства. В соответствии со структурой перевозок удобно выделять на листе Excel модули, соответствующие блокам «перевозки поставщик-склад», «перевозки склад-потребитель», «перегон автопарк-поставщик», «перегон автопарк-склад». Специфическим блоком, связывающим блок перевозок и блок по автотранспорту, является определение необходимого количества машин по каждой коммуникации для спланированной перевозки продукции в соответствии с вместимостью каждого типа машин в соответствии с (13).

Целевая функция модели состоит из суммы затрат блока «перевозка, переработка+ перевозка», затрат на перегон необходимого количества машин и затрат на их содержание и формируется по (1) с учетом (16).

Приведем два способа решения задачи средствами Excel.

*Способ 1.* Нелинейная задача (в силу округления количества машин до целых в модели) решается в «целых» машинах методом обобщенного приведенного градиента (ОПГ) средством Поиск решения.

Переменные, вычисленные по (13), используются в блоке автотранспорта в качестве спроса на каждый тип машин: ограничения (14), (15).

В результате решения методом ОПГ сформированной Excel-модели были получены следующие результаты.

#### План перевозок от поставщиков на склады (S-W) и со складов потребителям (W-D) (в пакетах):

	W1	W2	W3
S1	0	0	0
S2	147	102	0
S3	145	0	123
S4	179	0	

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
W1	0	141	44	0	0	286
W2	59	0	0	43	0	0
W3	0	0	0	0	123	0

При этом на склады поступит 471, 102, 123 п. продукции соответственно, а потребители получают требуемое количество продукции.

Таким образом, согласно полученному плану перевозок от первого поставщика продукция не перевозится, вся останется у поставщика, от второго перевозится 249 ед. (32 ед. останется), от третьего и четвертого поставщика – вся продукция 268 и 179 ед. соответственно перевозится на склады. Суммарные затраты на перевозки и переработку продукции составляют 8282 ден. ед.

Таблица 5.

#### Потребность в машинах на реализацию полученного плана перевозок от поставщиков на склады (S-W) в большегрузных машинах и со складов потребителям (W-D) малогрузными машинами:

МБГ	W1	W2	□W3	Всего нужно
S1	0	0	0	0
S2	3	3	0	6
S3	3	0	3	6
S4	4	0	0	4

ММГ	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Всего нужно
W1	0	8	3	0	0	15	26
W2	3	0	0	3	0	0	6
W3	0	0	0	0	7	0	7

Таблица 6.

#### План перегона большегрузных машин из автопарков к поставщикам (A-S) и малогрузных – к складам (A-W):

	S1	S2	S3	S4
A1	0	0	0	0
A2	0	6	0	4
A3	0	0	6	0

	W1	W2	W3
A1	26	0	4
A2	0	6	3
A3	0	0	0

Все три планируемых автопарка должны быть построены. В первом автопарке (A1) для перевозки продукции согласно полученному плану перевозок должно быть 0 большегрузных и 30 малогрузных машин, A2 – 10 большегрузных и 9 малогрузных, A3 – 6 большегрузных и 0 малогрузных машин. Затраты на содержание машин составляют 768 ден. ед./дн, на перегон – 166 ден. ед. Общие суммарные затраты, включая затраты на транспортировку продукции по всем коммуникациям и переработку на складах, будут равны 9216 ден. ед./дн.

**Способ 2** отличается от способа 1 тем, что линейная задача решается без вычисления целых машин, необходимых на перевозку продукции, то есть в «нецелых» машинах, что соответствует использованию ограничений (8), (9).

Получаем оптимальное решение средством Поиск решения симплекс-методом.

Таблица 7.

**Потребность в машинах на реализацию полученного плана перевозок от поставщиков на склады (S-W) в большегрузных машинах и со складов потребителям (W-D) малогрузными машинами (2 способ):**

	W1	W2	W3
S1	0	243	0
S2	6	0	0
S3	268	0	0
S4	179	0	0

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
W1	0	141	44	0	0	268
W2	59	0	0	43	123	18
W3	0	0	0	0	0	0

Затраты на транспортировку и переработку продукции ( $z_2+z_4$ ) на полученном решении остались тем же – 8282 ден. ед.:

Таблица 8.

**План (по 2 способу) перегона «нецелых» большегрузных машин из автопарков к поставщикам (A-S) и «нецелых» малогрузных машин – к складам (A-W):**

	S1	S2	S3	S4
A1	0	0	0	0
A2	0	0	0	3,58
A3	4,86	0,12	5,36	0

	W1	W2	W3
A1	22,65	7,35	0
A2	0	4,8	0
A3	0	0	0

Округляя полученное решение по потребностям поставщиков и складов в машинах соответствующего типа, получаем планы перегона машин.

**План (по 2 способу) перегона большегрузных машин из автопарков к поставщикам (A-S) и малогрузных машин – к складам (A-W):**

	S1	S2	S3	S4
A1	0	0	0	0
A2	0	0	0	4
A3	5	1	6	0

	W1	W2	W3
A1	25	5	0
A2	0	9	0
A3	0	0	0

Заметим, что план перегона A-S получен обычным округлением вверх (формула (13)), так как каждый поставщик согласно плану перевозок должен поставить продукцию не более чем на один склад. Целочисленный план перегона B-W составлялся с учетом того, что со складов W1 и W2 продукция должна перевозиться разным потребителям и складывать не полностью загруженные машины по разным коммуникациям вообще говоря нельзя. Складу W1 необходимо для перевозки продукции поставщикам 25 машин, перегоняем их из автопарка A1. Складу W2 нужно 14 машин: перегоняем оставшиеся 5 машин из A1 и остальные 9 машин из задействованного в «нецелом» плане перегона автопарка A2.

Согласно новому решению все три автопарка должны быть построены, для обеспечения плана перевозок должно быть в автопарке A1 0 большегрузных и 30 малогрузных машин, A2 – 4 большегрузных и 9 малогрузных, A3 – 12 большегрузных и 0 малогрузных машин.

Суммарные затраты на реализацию такого плана равны 9196 ден. ед./дн. Затраты по блоку автотранспорта стали больше, чем в «нецелых» машинах, но меньше, чем при решении задачи методом ОПГ на 20 ден. ед./дн.

### Заключение.

В настоящей работе предложен подход к решению задачи оптимизации сети автотранспортных парков в составе транспортной инфраструктуры региона на основе модели оптимизации размещения автотранспортных парков (терминалов) с учетом сформированной сети распределительных складов и неопределенности спроса заданной сети потребителей.

Подход основан на использовании общедоступного программного обеспечения Microsoft Excel 2010, надстройки Поиск решения, что позволило:

- наглядно и понятно представить на листе Excel отдельные блоки задачи, ограничения математической модели и полученное решение;

- решить нелинейную задачу без разбиения на этапы, используя метод обобщенного приведенного градиента (ОПГ);

- решить линейную задачу симплекс-методом с последующим округлением результатов по перегону машин;

- получить результаты в достаточно короткие сроки.

Полученное решение в общем случае является приближенным, но обеспечивает близкие к минимальным суммарные затраты на содержание автотранспортных парков, доставку товаров по всей сети, перегон порожнего автомобильного транспорта, а также перевозку грузов.

### Литература

1. Попов П.В. Оценка влияния логистической инфраструктуры на социально-экономические показатели Астраханской области // *Логистика*. — 2019. — № 1(146). — С. 46-50.

2. Попов П.В. Оценка взаимосвязи показателей транспортно-логистической инфраструктуры и социально-экономического развития региона // *Транспорт: наука, техника, управление*. — 2018. — № 8. — С. 3-6.

3. Беляева Е.В., Карлова Е.В. Роль транспортно-логистической инфраструктуры в развитии региона // *Современные проблемы экономического и социального развития*. — 2014. — № 10. — С. 97-100.

4. The Importance of Trade Costs: A Gravity Model Applications / 3rd ARTNeT Capacity Building Workshop. UNESCAP. Bangkok. 26–30 March 2007. URL: [http://artnet.unescap.org/tid/artnet/mtg/cb3\\_d2s3dea.pdf](http://artnet.unescap.org/tid/artnet/mtg/cb3_d2s3dea.pdf) (дата обращения: 09.01.2022 г.).

5. Raimbekov Zh., Syzdykbayeva B., Baimbetova A., & Rakhmetulina Zh. Evaluating the impact of logistics infrastructure on the functioning and development of regional economy / *Economic Annals-XXI* (2016), 160(7-8), 100-104.

6. Rubén Sainz, Jose Baños, Susana Val & Samir Jose Kattour (2013): The economic impact of logistics infrastructure: the case of PLAZA – the Zaragoza Logistics Platform, *Transportation Planning and Technology*, Volume 36, p 299-318. DOI:10.1080/03081060.2013.798480.

7. Казаков А. Л., Петров М. Б., Маслов А. М. Многокритериальная оптимизация транспортной системы региона на основе ее гиперграфа // *Экономика региона*. — 2014. - № 4 - С. 199-208.

8. Tutunchi G.K., Fathi Y. Effective methods for solving the Bi-criteria  $p$ -Center and  $p$ -Dispersion problem. *Computers & Operations Research* Volume 101, January 2019, Pages 43-54.

9. Kramer R.A., Lori M., Vidal T. Mathematical models and search algorithms for the capacitated  $p$ -center problem. *Mathematics, Computer Science Comput. Oper. Res.* 2019, p. 1-29.

10. Contardo C., Lori M., Kramer R.A. A scalable exact algorithm for the vertex  $p$ -center problem // *Computers & Operations Research* Volume 103, March 2019, Pages 211-220.

11. W.G.M.M. Rutten, P.J.M. van Laarhoven, B. Vos. The extension of GOMA model for determining the optimal number of depots // *IE Transactions*, 2003, № 33, 1031-1036.

12. Andreas Klose, Andreas Drexl. Facility location models for distribution system design // *European Journal of Operational Research* 162 (2005) 4–29.

13. Попов П.В., Мирецкий И.Ю. Методология построения логистической инфраструктуры на территории региона // *Экономика региона*. — 2019. — Т.15, вып. 2. — С. 483-492.

14. Попов П. В., Мирецкий И. Ю., Ивуть Р. Б., Лаповская П. И. Модель формирования складской инфраструктуры регионов // *Новости науки и технологий*. - 2016. - № 2 (37). - С. 24–28.

15. Ивуть Р.Б., Попов П.В., Мирецкий И.Ю. Проектирование сети автотранспортных парков // *Наука и техника*. - 2016. - Т.15, № 5. - С. 442–446.

16. Попов П.В., Мирецкий И.Ю. Об оптимизации логистической инфраструктуры региона // *Логистика*. - 2017. - № 7. - С. 37–39.

17. Попов П.В., Цехан О.Б. (2020), Моделирование транспортной инфраструктуры региона в условиях стохастической неопределенности спроса // *Логистика*. - 2020. - № 7. - С. 44–48.

### Сведения об авторах:

**Попов Павел Владимирович**, доцент кафедры менеджмента и коммерции Волгоградского филиала РЭУ имени Г.В. Плеханова

Россия, 400131 Волгоградская область, Волгоград, улица Волгодонская, 11,

тел. 7 8442 33-17-57.

E-mail: donpascha@yandex.ru.

**Степин Юрий Генрихович**, старший преподаватель кафедры математического и информационного обеспечения экономических систем, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы.

E-mail: ju.stepin@yandex.ru.

**Цехан Ольга Борисовна**, заведующий кафедрой математического и информационного обеспечения экономических систем. Гродненский государственный университет имени Янки Купалы.

E-mail: tsekhan @ grsu.by.

**Будько Ольга Николаевна**, доцент кафедры математического и информационного обеспечения экономических систем, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы.

E-mail: budko\_on@mail.ru.

Адрес Гродненского университета: Республика Беларусь, 230023, Гродно, ул. Ожешко, 22, тел. (80152) 487235