



**А.Е. Радаев, В.В. Кобзев**

**МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ  
СКЛАДСКОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ МЕГАПОЛИСА**

**A.E. Radaev, V.V. Kobzev**

**A TECHNIQUE FOR CREATING  
A WAREHOUSE DISTRIBUTION NETWORK STRUCTURE  
FOR INDUSTRIAL ENTERPRISES IN METROPOLITAN AREAS**

Проблемы организации функционирования сетей поставок промышленных предприятий обуславливают высокую значимость вопросов проектирования складских распределительных сетей в рамках географических регионов с крупными населенными пунктами. Данное обстоятельство определило целесообразность разработки методики формирования структуры складской распределительной сети промышленных предприятий в условиях мегаполиса, базирующейся на применении методов статистической обработки (в том числе аппроксимации) информации, а также методов линейной и нелинейной оптимизации. Исходными данными для реализации методики являются массогабаритные характеристики грузовых единиц и транспортных средств, характеристики карты географического региона и устанавливаемой в соответствии с последним прямоугольной системы координат, а также объемы предложения и спроса контрагентов – соответственно поставщиков и потребителей. Основными этапами реализации методики являются: формирование обусловленных особенностями мегаполиса функциональных зависимостей характеристик складских объектов и транспортных процессов от параметров местоположения элементов распределительной сети на базе статистических данных об услугах коммерческих организаций в области транспортировки и временного хранения грузов; укрупненное обоснование структуры складской сети, а также структуры грузопотоков между складами и контрагентами; уточнение координат складских объектов в составе распределительной сети. Результатами реализации предложенной методики являются характеристики количества, местоположения, вместимости и затрат на аренду складских объектов в составе распределительной сети, а также характеристики грузопотоков и соответствующих затрат на перевозку грузов. Основными допущениями методики являются рассмотрение только арендуемых (а не приобретаемых или создаваемых) складских объектов в составе сети, а также независимость структуры грузопотоков от уточняемых на последнем этапе методики местоположений складов.

**СКЛАДСКАЯ СЕТЬ; ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ; МЕТОДИКА; МОДЕЛИРОВАНИЕ; ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ.**

The currently existing problems in organizing industrial enterprises' supply networks cause the methods of designing warehouse distribution networks in geographic regions with high-population centers to become increasingly important. Due to this circumstance, it makes sense to create a technique for forming a warehouse distribution network structure for industrial enterprises in metropolitan areas. The technique is based on applying statistical processing methods (including approximation approaches) and also methods of linear and non-linear optimization. Initial data for implementing the technique includes the weight and size parameters of transport units and vehicles, the characteristics of a geographic region's map and its corresponding rectangular coordinate system, and also the volumes of supplies and demands of the contractors, i.e., the suppliers and consumers, respectively. The main stages of the implementation process for the technique are as follows: forming functional relationships (describing a metropolitan area's features) between the characteristics of warehouse objects and transportation processes and the location parameters of a distribution network's elements based on the statistic data on the services of commercial organizations in the areas of goods transportation and short-time storage; aggregated justification of the warehouse network structure and the cargo flows between warehouses and contractors; correction of coordinates for warehouse objects forming the distribution network. The results of the proposed technique include the characteristics of the amount, location, capacity and rental costs for the warehouse objects forming the distribution network and also the characteristics of cargo flows and the corresponding transportation costs. The main assumptions of the technique are taking into account only the leasable (i.e., not purchased or built) warehouse objects forming the network, and also independence of cargo flow structure from warehouse locations corrected at the last stage of implementing the technique.

**WAREHOUSE NETWORK; INDUSTRIAL ENTERPRISE; TECHNIQUE; MODELING; OPTIMIZATION MODEL.**

*Введение.* Эффективное функционирование отечественных промышленных предприятий в современных условиях невозможно без тщательной проработки вопросов организационного проектирования и организации функционирования не только производственных систем предприятий, но и соответствующих сетей поставок, обеспечивающих перемещение предметов производства с использованием транспортных и складских ресурсов промышленных предприятий и сторонних организаций [1, 4, 6, 7, 9, 13, 14]. Важность решения задач проектирования и эксплуатации промышленных предприятий и образуемых ими сетей поставок определяется, главным образом, усложнением структуры и повышением интенсивности материальных и сопутствующих им потоков в условиях глобализации рынков сбыта готовой продукции предприятий, а также реализуемым в целях обеспечения конкурентоспособности ужесточением требований к характеристикам процессов движения и преобразования предметов производства [2, 3, 5, 8, 10].

*Методы и результаты исследования.* Для решения задач организационного проектирования и организации функционирования складской сети промышленных предприятий (как элемента соответствующей сети поставок), обеспечивающей распределение готовой продукции в рамках крупного населенного пункта (далее — мегаполиса), ранее в [11] были предложены следующие оптимизационные модели:

- оптимизационная модель обоснования местоположения склада (единственного в составе сети);
- оптимизационная модель обоснования состава складской сети при фиксированных характеристиках (местоположение, вместимость, затраты на аренду единицы вместимости) складских объектов сети;
- модернизированная оптимизационная модель обоснования состава складской сети при варьируемых характеристиках складских объектов сети.

Вышеперечисленные модели базируются на общих допущениях, определяющих особенности реализации транспортно-складских процессов в пределах мегаполиса, подробно

изложенных в [11]. Наиболее важным допущением является наличие в рассматриваемом географическом регионе так называемого условного центра мегаполиса, описываемого определенными значениями координат соответствующей системы (в наиболее общем случае предлагается использовать прямоугольную) и являющегося базой для расчета вместимости и затрат на аренду складского объекта проектируемой распределительной сети при заданных характеристиках (координатах) его местоположения.

Углубленный анализ практической значимости разработанных оптимизационных моделей, представленный в [12], показал, что первая и вторая модели в вышеуказанном списке являются наименее трудоемкими с позиций процесса реализации в современных программных средах, поскольку предполагают либо нелинейную оптимизацию малого количества переменных (модель обоснования местоположения склада), либо оптимизацию большого количества переменных, сводимую к линейной (модель обоснования состава складской сети при фиксированных характеристиках ее элементов). Процесс реализации модернизированной оптимизационной модели обоснования состава распределительной сети при варьируемых характеристиках образующих ее складов имеет значительно большую трудоемкость реализации ввиду необходимости сочетания процедур линейной и нелинейной оптимизации большого количества переменных [15], что обуславливает, в частности, невозможность решения соответствующей задачи с использованием базовых алгоритмов в составе современного программного обеспечения. Последнее обстоятельство определило целесообразность разработки методики формирования структуры складской распределительной сети промышленных предприятий в условиях мегаполиса на базе ранее упомянутой модернизированной оптимизационной модели как математического описания постановки соответствующей задачи. Структура разработанной методики, описываемая блок-схемой на рис. 1, предполагает последовательную реализацию определенного количества основных этапов (модулей).

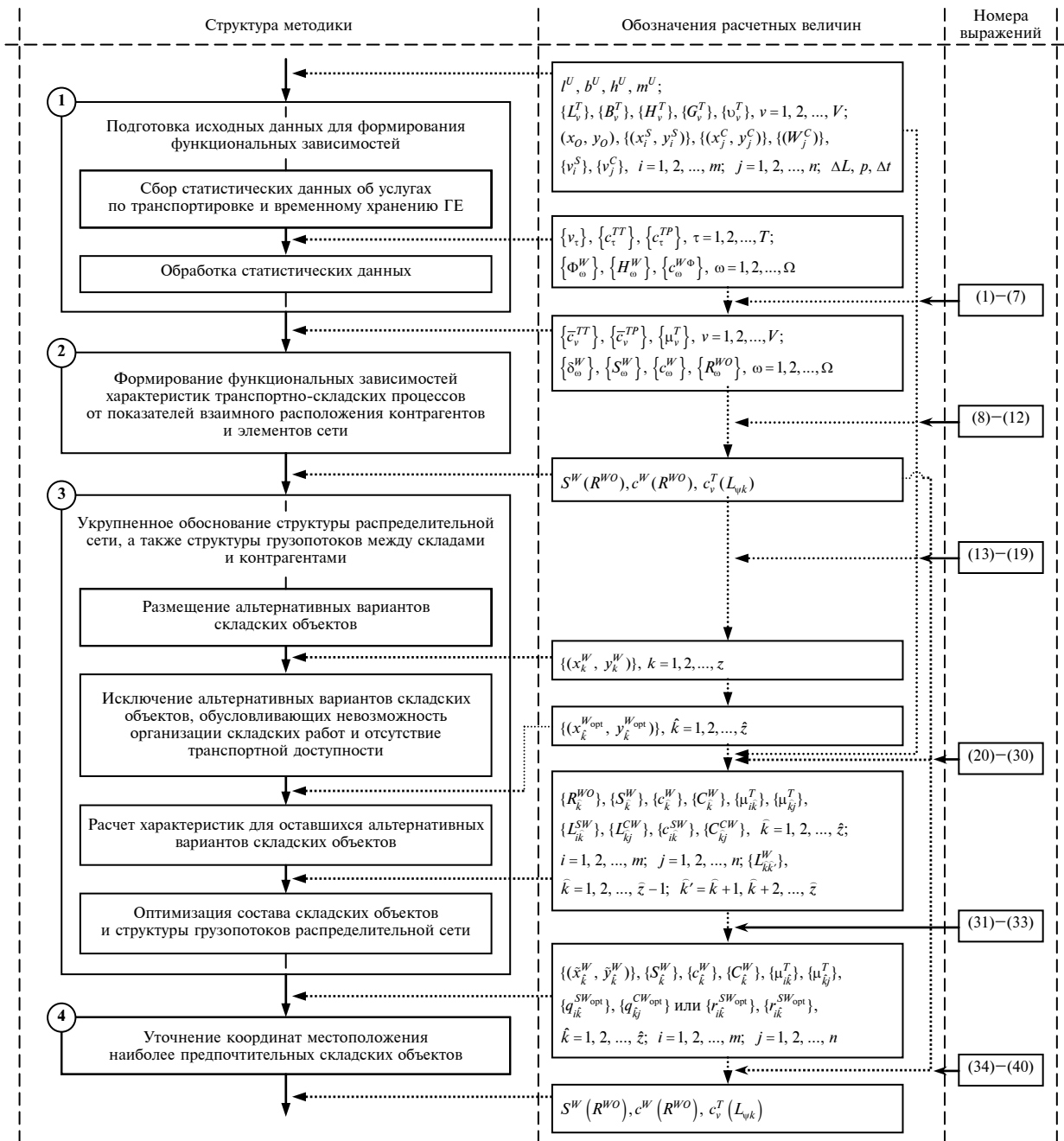


Рис. 1. Структурное и математическое описание разработанной методики

Исходными данными для реализации методики являются следующие (см. рис. 2, а):

- характеристики перевозимых грузовых единиц (ГЕ) – качественные (например, определяющие физико-химическое состояние грузов, требования к реализуемым процессам транспортировки и длительного хранения грузов и т. п.) и количественные, в том числе массогабаритные (длина  $l^U$  м, ширина  $b^U$  м,

высота  $h^U$  м, масса  $m^U$  т), и характеристики технологического процесса грузопереработки (высота ячейки хранения  $h^{U'} \geq h^U$  м);

- характеристики используемых транспортных средств (ТС) – качественные, в том числе общий для всех ТС вид транспорта (автомобильный, железнодорожный и т. д.), способ его разгрузки и загрузки и т. п., и количественные, включая массогабаритные и эксплуа-

тационные характеристики ТС (длина  $\{L_v^T\}$  м, ширина  $\{B_v^T\}$  м, высота  $\{H_v^T\}$  м кузова, а также грузоподъемность  $\{G_v^T\}$  т и средняя маршрутная скорость  $\{v_v^T\}$  км/ч;  $v = 1, 2, \dots, V$ , где  $V$  – количество рассматриваемых моделей ТС, принадлежащих определенному виду транспорта);

– характеристики рассматриваемого географического региона в части масштаба карты (км), ориентации осей прямоугольной системы координат, расположения начала координат и условного центра мегаполиса (для прямоугольной системы координат  $(x_0, y_0)$  км), наличия территориальных зон, не охватываемых транспортно-складской инфраструктурой, и т. п.;

– характеристики обслуживаемых проектируемой распределительной сетью контрагентов – поставщиков и потребителей, в том числе расположение  $\{(x_i^S, y_i^S)\}$ ,  $\{(x_j^C, y_j^C)\}$  км и объем поставок  $\{Q_i^S\}$  или отправок  $\{Q_j^C\}$  за определенный период (шт./мес.), обслуживаемая модель ТС  $\{v_i^S\}$ ,  $\{v_j^D\} \in \{1, 2, \dots, V\}$ ;  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $j = 1, 2, \dots, n$ , где  $m, n$  – количество соответственно поставщиков и потребителей;

– характеристики транспортной инфраструктуры рассматриваемого географического региона, в том числе среднее наикратчайшее расстояние между смежными светофорами  $\Delta L$  км, вероятность  $p$  простоя ТС в ожидании разрешающего сигнала очередного светофора и средняя длительность  $\Delta t$  с простоя под светофором.

На начальном (первом) этапе реализации методики производятся сбор и обработка статистических данных об услугах коммерческих организаций в функциональных областях транспортировки и временного хранения ГЕ с учетом ограничений, обусловленных упомянутыми выше количественными и качественными характеристиками ГЕ и ТС. При этом для каждой  $\tau$ -й учитываемой транспортной организации из их общего количества  $T$  должны быть зафиксированы: модель ТС

$v_\tau \in \{1, 2, \dots, V\}$ ; удельная стоимость работы ТС  $c_\tau^{TT}$  руб./ч.ед.; стоимость подачи ТС под загрузку  $c_\tau^{TP}$  руб./ед.;  $\tau = 1, 2, \dots, T$ . Для каждой  $\omega$ -й учитываемой складской организации (предлагающей в аренду только один объект) из их общего количества  $\Omega$  должны быть зафиксированы: располагаемая (в течение периода) полезная площадь  $\Phi_\omega^W$  м<sup>2</sup>/мес.; рабочая высота  $H_\omega^W$  м; удельные затраты на аренду  $c_\omega^{W\Phi}$  руб./м<sup>2</sup>·мес., координаты местоположения  $(x_\omega^W, y_\omega^W)$  км;  $\omega = 1, 2, \dots, \Omega$ .

Обработка вышеописанных статистических данных предполагает расчет на их базе следующих промежуточных характеристик.

Для каждой из рассматриваемых моделей ТС ( $v = 1, 2, \dots, V$ ):

– средние стоимостные показатели  $\bar{c}_v^{TT}$  (руб./ч.ед.) и  $\bar{c}_v^{TP}$  (руб.·ед.),

$$\bar{c}_v^{TT} = \sum_{\tau: v_\tau=v} c_\tau^{TT} / |\Lambda_v|, \quad (1)$$

$$\bar{c}_v^{TP} = \sum_{\tau: v_\tau=v} c_\tau^{TP} / |\Lambda_v|, \quad (2)$$

где  $|\Lambda_v|$  – количество (ед.) транспортных организаций, использующих  $v$ -ю модель ТС (количество элементов множества  $\Lambda_v = \{\tau \mid v_\tau = v\}$ );

– вместимость кузова ТС  $\mu_v^T$  (шт./ед.); в наиболее общем случае при невозможности переворачивания ГЕ на время транспортировки с возможностью укладки ГЕ непосредственно друг на друга

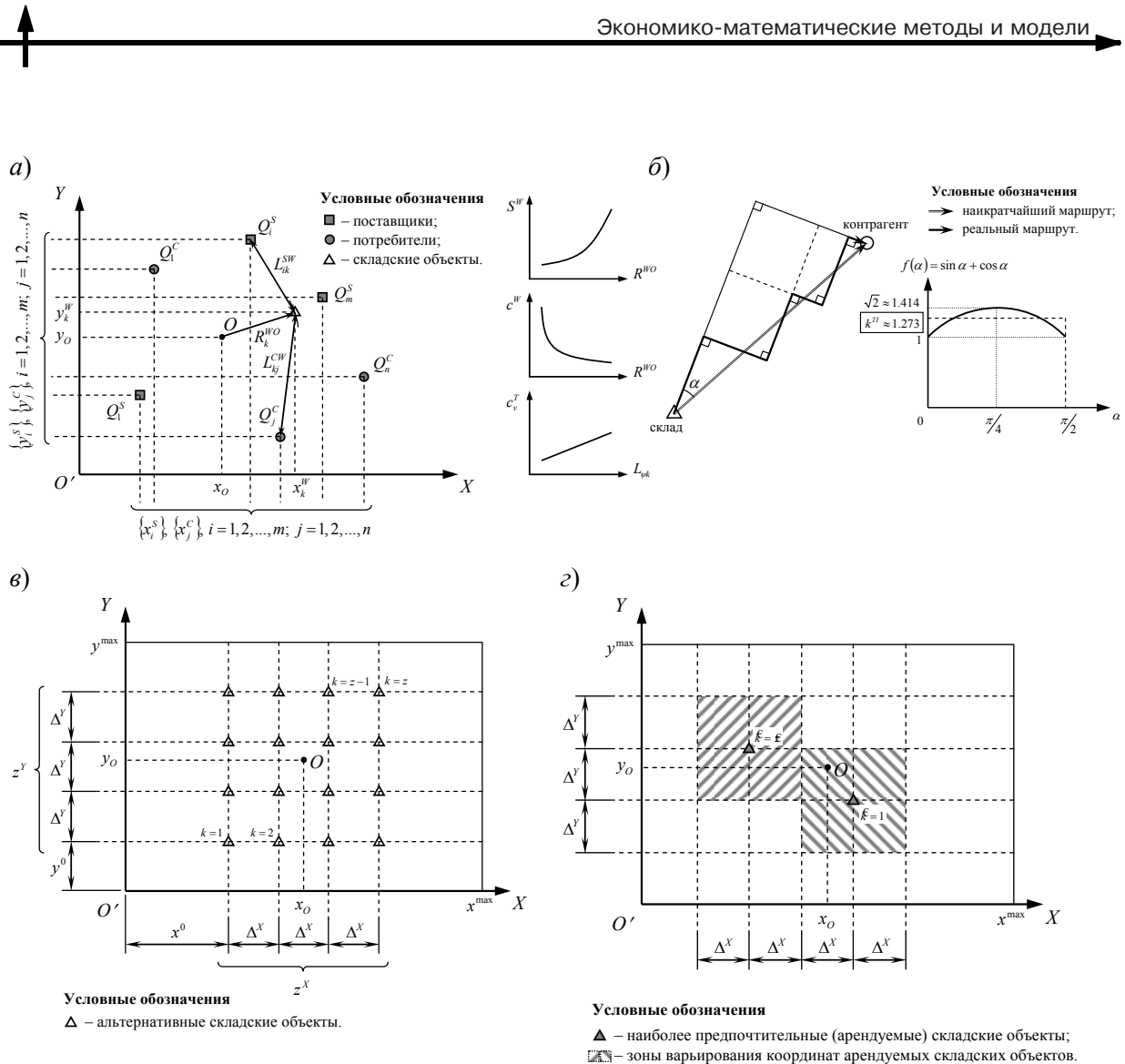
$$\mu_v^T = \min \left( \max \left( \left\lfloor \frac{L_v^T}{l^U} \right\rfloor \cdot \left\lfloor \frac{B_v^T}{b^U} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{L_v^T}{b^U} \right\rfloor \cdot \left\lfloor \frac{B_v^T}{l^U} \right\rfloor \right) \times \left\lfloor \frac{H_v^T}{h^U} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{G_v^T}{m^U} \right\rfloor \right), \quad (3)$$

где  $\lfloor \dots \rfloor$  – результат округления расчетного значения до ближайшего меньшего целого.

Для каждой учитываемой складской организации ( $\omega = 1, 2, \dots, \Omega$ ):

– количество ярусов хранения ГЕ  $\delta_\omega^W$  (шт.) на складе,

$$\delta_\omega^W = \left\lfloor \frac{H_\omega^W}{h^U} \right\rfloor; \quad (4)$$



**Рис. 2.** Графическое описание основных положений разработанной методики: а) состав исходных данных и характер основных функциональных зависимостей; б) принцип расчета поправочного коэффициента  $k^{Tl}$ ; в) принципы размещения альтернативных складских объектов; г) принципы уточнения местоположения арендуемых складских объектов

– вместимость склада  $S_{\omega}^W$  (шт./мес.),

$$S_{\omega}^W = \left[ \frac{\Phi_{\omega}^W}{l^U b^U} \right] \delta_{\omega}^W; \quad (5)$$

– затраты на аренду единицы вместимости склада  $c_{\omega}^W$  (руб./шт.·мес.),

$$c_{\omega}^W = \frac{c_{\omega}^{W\Phi}}{\delta_{\omega}^W l^U b^U}; \quad (6)$$

– удаленность  $R_{\omega}^{WO}$  (км) склада от условно-центра мегаполиса,

$$R_{\omega}^{WO} = \sqrt{(x_{\omega}^W - x_0)^2 + (y_{\omega}^W - y_0)^2}. \quad (7)$$

В рамках следующего (второго) этапа методики посредством аппроксимации расчетных значений, полученных с использованием выражений (1)–(7), производится формирование (определение коэффициентов) следующих функциональных зависимостей (рис. 2, а):

- зависимость вместимости  $S^W$  (шт./мес.) складского объекта от его удаленности  $R^{WO}$  (км) от условного центра мегаполиса, в общем случае являющаяся возрастающей и нелинейной [11];
- зависимость затрат на аренду единицу вместимости  $c^W$  (руб./шт.·мес.) складского объекта от его удаленности  $R^{WO}$  (км) от условного центра мегаполиса, в общем случае являющаяся убывающей и нелинейной [11];

– зависимость затрат  $c_v^T$  (руб./ед.) на одну езду (перемещаемую транспортную партию ГЕ) каждой  $v$ -й модели ТС ( $v = 1, 2, \dots, V$ ) между абстрактными  $k$ -м складом и  $\psi$ -м контрагентом (поставщиком или потребителем) от наикратчайшего расстояния между ними  $L_{\psi k}$  (км), определяемого по формуле, аналогичной выражению (7); в работе [11] указанная зависимость описывается выражениями (6)–(8); в рамках разработанной методики в наиболее общем случае предлагается использовать зависимость вида

$$c_v^T(L_{\psi k}) = c_{0v}^T + c_{1v}^T L_{\psi k}, \quad (8)$$

где  $c_{0v}^T, c_{1v}^T$  – соответственно условно-постоянная (руб./ед.) и условно-переменная (руб./км·ед.) компоненты затрат,

$$c_{0v}^T = \bar{c}_v^{TP}, \quad (9)$$

$$c_{1v}^T = \frac{\bar{c}_v^{TT} k^{TI} k^{TL}}{v_v^T}, \quad (10)$$

где  $k^{TI}$  – коэффициент учета особенностей транспортной инфраструктуры, который предлагается определять как усредненное отношение суммы длин катетов прямоугольного треугольника, заключающих в себе элементы реального маршрута (при соответствующем допущении), к гипотенузе, определяющей наикратчайший путь (см. рис. 2, б):

$$k^{TI} = \frac{\int_0^{\pi/2} (\sin \alpha + \cos \alpha) d\alpha}{\pi/2 - 0} \approx 1,273; \quad (11)$$

$k^{TL}$  – коэффициент учета простоев ТС в ожидании разрешающих сигналов светофоров в рамках езды,

$$k^{TL} = 1 + \frac{v_v^T \Delta t p}{\Delta L}. \quad (12)$$

Важно отметить, что если параметры функциональной зависимости  $c_v^T(L_{\psi k})$  могут быть непосредственно рассчитаны с использованием формул (9)–(12), то параметры зависимостей  $S^W(R^{WO})$  и  $c^W(R^{WO})$ , имеющих в общем случае более сложный вид, чем определяемый выражением (8), предлагается вычислять на базе исходных массивов значений  $\{S_\omega^W\}$ ,  $\{c_\omega^W\}$  и  $\{R_\omega^{WO}\}$ ,  $\omega = 1, 2, \dots, \Omega$  с использованием инструментов аппроксимации в структуре соответствующих программных сред, в том числе Microsoft Excel и

Mathcad. При этом выбор вида аппроксимирующей функции (линейная, степенная, логарифмическая и т. д.) целесообразно производить по максимальному значению коэффициента детерминации  $R^2$ , вычисляемого отдельно для каждого вида функции на основе результатов предварительного расчета ее параметров на базе исходных массивов.

Следующий (третий) этап методики – укрупненное обоснование структуры распределительной сети, а также структуры грузопотоков между складами и контрагентами на базе сформированных на предшествующем этапе методики функциональных зависимостей.

Подготовка исходных данных для реализации процедуры оптимизации предполагает формирование определенного количества  $z$  альтернативных складских объектов с конкретными характеристиками местоположения  $\{(x_k^W, y_k^W)\}$  км, вместимости  $\{S_k^W\}$  шт./мес. И затрат на аренду единицы вместимости  $\{c_k^W\}$

руб./шт.·мес.,  $k = 1, 2, \dots, z$ . Для задания характеристик местоположения альтернативных складов в декартовой системе координат, описывающей рассматриваемый географический регион, размечается прямоугольная сетка, образующие линии которой (перпендикулярные друг другу) параллельны осям системы координат (см. рис. 2, в); при этом пересечения образующих линий (узлы сетки) определяют значения характеристик местоположения  $\{(x_k^W, y_k^W)\}$  км альтернативных складов

сети. Последнее обстоятельство обуславливает необходимость назначения общего количества  $z$  альтернативных складов исходя из условия

$$z = z^X z^Y, \quad (13)$$

где  $z^X, z^Y$  – количество складов соответственно в горизонтальном и вертикальном ряду прямоугольного массива, образованного сеткой.

Вычисление координат  $(x_k^W, y_k^W)$  км местоположения каждого отдельного  $k$ -го альтернативного складского объекта ( $k = 1, 2, \dots, z$ ) определяется принятым порядком нумерации складов и ориентацией прямоугольной системы координат относительно карты рассматриваемого географического региона на основе координат  $(x^0, y^0)$  км начального (базового) складского объекта (как правило, ближайшего к началу координат) и заданного шага сетки по осям координат  $\Delta^X, \Delta^Y$  км.

При условии, что начало прямоугольной системы координат находится в левом нижнем углу карты региона, а нумерация складов производится от начала координат горизонтальными рядами (рис. 2,  $\theta$ ), характеристики местоположения  $(x_k^W, y_k^W)$ ,  $k = 1, 2, \dots, z$  определяются выражениями

$$x_k^W = x^0 + \Delta^X \left( k - 1 - z^X \left( \left\lceil \frac{k}{z^X} \right\rceil - 1 \right) \right), \quad (14)$$

$$y_k^W = y^0 + \Delta^Y \left( \left( \left\lceil \frac{k}{z^Y} \right\rceil - 1 \right) \right), \quad (15)$$

где  $\lceil \dots \rceil$  – результат округления расчетного значения до ближайшего большего целого;

при этом величины  $\Delta^X, \Delta^Y, x^0, y^0$  (км) целесообразно назначать исходя из условия равномерного расположения альтернативных складских объектов по карте рассматриваемого географического региона в соответствии с формулами

$$\begin{cases} \Delta^X = \frac{x^{\max}}{z^X + 1}; \Delta^Y = \frac{y^{\max}}{z^Y + 1}; \\ x^0 = \Delta^X; y^0 = \Delta^Y, \end{cases} \quad (16)$$

где  $x^{\max}, y^{\max}$  – максимальное значение соответственно абсциссы и ординаты (км), соответствующее границе карты рассматриваемого географического региона (см. рис. 2,  $\theta$ ).

Важно отметить, что результат вычислений, производимых в соответствии с выражением (16), в общем случае описывается выражением

$$\Delta^X \neq \Delta^Y, \quad (17)$$

определяющим неравномерность распределения местоположений складских объектов по образующим линиям сетки; для обеспечения одинакового расстояния между складами по линиям сетки при расчете необходимо использовать формулы

$$\begin{cases} \Delta^X = \Delta^Y = \Delta = \min \left( \frac{x^{\max}}{z^X + 1}, \frac{y^{\max}}{z^Y + 1} \right); \\ x^0 = \max \left( \Delta, x^0 - \Delta \frac{(z^X - 1)}{2} \right); \\ y^0 = \max \left( \Delta, y^0 - \Delta \frac{(z^Y - 1)}{2} \right). \end{cases} \quad (18)$$

Также следует подчеркнуть, что для обеспечения размещения складов сети на минимально допустимом расстоянии  $\lceil L^W \rceil$  км друг от друга в качестве основы для расчета характеристик местоположения альтернативных складских объектов  $(x_k^W, y_k^W)$ ,  $k = 1, 2, \dots, z$  целесообразно использовать не количества складов  $z^X, z^Y$ , а шаг сетки по осям координат  $\Delta^X, \Delta^Y$  км, назначаемый из условия

$$\min(\Delta^X, \Delta^Y) \geq \lceil L^W \rceil. \quad (19)$$

После расчета значений координат всех альтернативных складских объектов по принципам, описываемым выражениями (13)–(19), производится сопоставление полученных результатов с картой, описывающей особенности рассматриваемого географического региона, с целью выявления и последующего исключения из дальнейшего рассмотрения альтернативных складов, местоположения которых обуславливают невозможность организации складских работ или отсутствие транспортной доступности (горные рельефы, водоемы и т. п.). Таким образом, после выполнения вышеописанной процедуры в наиболее общем случае в составе исходных данных остается количество альтернативных складов  $\bar{z} \leq z$  с порядковыми номерами  $\bar{k} = 1, 2, \dots, \bar{z}$ .

На базе расчетных значений координат местоположения каждого  $\bar{k}$ -го альтернативного складского объекта ( $\bar{k} = 1, 2, \dots, \bar{z}$ ) производится вычисление следующих характеристик:

– удаленность от условного центра мегаполиса  $R_{\bar{k}}^{WO}$  км,

$$R_{\bar{k}}^{WO} = \sqrt{(x_{\bar{k}}^W - x_O)^2 + (y_{\bar{k}}^W - y_O)^2}; \quad (20)$$

– вместимость склада  $S_{\bar{k}}^W$  (шт./мес.) и удельная стоимость аренды  $c_{\bar{k}}^W$  (руб./шт.·мес.), определяемые на базе сформированных на предшествующем этапе методики функциональных зависимостей

$$S_{\bar{k}}^W = S^W(R_{\bar{k}}^{WO}), \quad (21)$$

$$c_{\bar{k}}^W = c^W(R_{\bar{k}}^{WO}); \quad (22)$$

– суммарные затраты на аренду склада  $C_{\hat{k}}^W$  (руб./мес.),

$$C_{\hat{k}}^W = S_{\hat{k}}^W c_{\hat{k}}^W; \quad (23)$$

– расстояние между складом и каждым контрагентом (км) –  $i$ -м поставщиком  $L_{i\hat{k}}^{SW}$  и  $j$ -м потребителем  $L_{\hat{k}j}^{CW}$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ ),

$$L_{i\hat{k}}^{SW} = \sqrt{(x_i^S - x_{\hat{k}}^W)^2 + (y_i^S - y_{\hat{k}}^W)^2}, \quad (24)$$

$$L_{\hat{k}j}^{CW} = \sqrt{(x_j^C - x_{\hat{k}}^W)^2 + (y_j^C - y_{\hat{k}}^W)^2}; \quad (25)$$

– затраты на одну езду ТС (руб./ед.) от каждого  $i$ -го поставщика на склад  $c_{i\hat{k}}^T$  и со склада каждому  $j$ -му потребителю  $c_{\hat{k}j}^T$ , определяемые на основе сформированной на предшествующем этапе методики зависимости затрат на езду от соответствующего расстояния перевозки,

$$c_{i\hat{k}}^T = c_{v=v_i}^T(L_{i\hat{k}}^{SW}), \quad (26)$$

$$c_{\hat{k}j}^T = c_{v=v_j}^T(L_{\hat{k}j}^{CW}); \quad (27)$$

– вместимость (шт.) кузова ТС, используемого для перевозки грузов от каждого  $i$ -го поставщика на склад  $\mu_{i\hat{k}}^T$  и со склада каждому  $j$ -му потребителю  $\mu_{\hat{k}j}^T$ ,

$$\mu_{i\hat{k}}^T = \mu_{v=v_i}^T, \quad (28)$$

$$\mu_{\hat{k}j}^T = \mu_{v=v_j}^T. \quad (29)$$

Важно отметить, что в дополнение к вышеперечисленным характеристикам в общем случае производится расчет расстояний между каждой парой ( $\hat{k}$ -м и  $\hat{k}'$ -м) альтернативных складских объектов ( $\hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z} - 1$ ;  $\hat{k}' = \hat{k} + 1, \hat{k} + 2, \dots, \hat{z}$ ) по следующей обобщенной формуле:

$$L_{\hat{k}\hat{k}'}^W = \sqrt{(x_{\hat{k}}^W - x_{\hat{k}'}^W)^2 + (y_{\hat{k}}^W - y_{\hat{k}'}^W)^2}. \quad (30)$$

После расчета характеристик функционирования складской распределительной сети с использованием формул (13)–(30) производится обоснование наиболее предпочтительных для аренды складских объектов, а также количества ГЕ, перевозимых от поставщиков на арендуемые склады и с последних – потребителям, по критерию минимизации сум-

марных затрат  $C_{\Sigma}$  (руб./мес.) на аренду объектов распределительной сети и транспортировку грузов с использованием средств оптимизационного моделирования.

Неизвестными переменными соответствующей математической модели являются следующие:

– логические переменные  $p_{\hat{k}}^W$  ( $\hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z}$ ), определяющие целесообразность аренды  $\hat{k}$ -го склада по принципу

$$p_{\hat{k}}^W = \begin{cases} 1, & \text{если } \hat{k}\text{-й склад арендуется,} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases} \quad (31)$$

– суммарное количество ГЕ (шт./мес), доставленное за рассматриваемый период на каждый  $\hat{k}$ -й склад от каждого  $i$ -го поставщика  $q_{i\hat{k}}^{SW}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) и от каждого  $\hat{k}$ -го склада каждому  $j$ -му потребителю  $q_{\hat{k}j}^{CW}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ).

Оптимизационная модель, базирующаяся на вышеуказанных переменных, имеет вид

$$\left\{ \begin{aligned} C_{\Sigma}(\{p_{\hat{k}}^W\}, \{q_{i\hat{k}}^{SW}\}, \{q_{\hat{k}j}^{CW}\}) &= \sum_{\hat{k}=1}^{\hat{z}} (C_{\hat{k}}^W p_{\hat{k}}^W + \\ &+ \sum_{i=1}^m c_{i\hat{k}}^{SW} \left[ \frac{q_{i\hat{k}}^{SW}}{\mu_{i\hat{k}}^T} \right] + \sum_{j=1}^n c_{\hat{k}j}^{CW} \left[ \frac{q_{\hat{k}j}^{CW}}{\mu_{\hat{k}j}^T} \right]) \rightarrow \min; \\ \sum_{\hat{k}=1}^{\hat{z}} q_{i\hat{k}}^{SW} &= Q_i^S, \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ \sum_{\hat{k}=1}^{\hat{z}} q_{\hat{k}j}^{CW} &= Q_j^C, \quad j = 1, 2, \dots, n; \\ \sum_{i=1}^m q_{i\hat{k}}^{SW} &\leq S_{\hat{k}}^W p_{\hat{k}}^W; \quad \sum_{j=1}^n q_{\hat{k}j}^{CW} = \sum_{i=1}^m q_{i\hat{k}}^{SW}, \\ \hat{k} &= 1, 2, \dots, \hat{z}; \\ L_{\hat{k}\hat{k}'}^W &\geq [L^W] p_{\hat{k}}^W p_{\hat{k}'}^W, \quad \hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z} - 1; \\ \hat{k}' &= \hat{k} + 1, \hat{k} + 2, \dots, \hat{z}; \\ p_{\hat{k}}^W &\in \{0; 1\}, \quad \hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z}; \\ q_{i\hat{k}}^{SW}, q_{\hat{k}j}^{CW} &\geq 0; \quad q_{i\hat{k}}^{SW}, q_{\hat{k}j}^{CW} \in Z, \\ i &= 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad \hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z}, \end{aligned} \right. \quad (32)$$

где  $Z$  – множество целых чисел.

Вышеописанная модель разработана на базе оптимизационной модели обоснования состава складской сети при фиксированных характеристиках ее элементов [11] и отличается от последней наличием допущения о возможности аренды складского объекта только



в номинальном количестве мест хранения ГЕ. Указанное допущение позволяет учесть принцип концентрации потребных мест хранения ГЕ в относительно малом количестве складских объектов распределительной сети, используемый при проектировании последней.

Следует подчеркнуть, что ограничения по удаленности складских объектов друг от друга на величину не менее  $[L^W]$  км могут не учитываться при реализации вышеописанной оптимизационной модели в случае, когда размещение альтернативных складов удовлетворяет условию (19).

Важно отметить, что выражения (32) определяют нелинейность разработанной модели [15] и, как следствие, высокую трудоемкость ее реализации даже с использованием наиболее распространенных алгоритмов оптимизации в составе современных программных сред. Тем не менее, вышеприведенная модель может быть преобразована в линейную посредством замены неизвестных переменных  $q_{ik}^{SW}$  и  $q_{kj}^{CW}$  шт./мес., описывающих транспортные потоки в ГЕ, на переменные  $r_{ik}^{SW}$  и  $r_{kj}^{CW}$  ед./мес., определяющие количества соответствующих ездов ТС (или транспортных партий) за рассматриваемый период. Преобразованная модель имеет вид

$$\left\{ \begin{aligned} & C_{\Sigma} \left( \{p_{\hat{k}}^W\}, \{r_{i\hat{k}}^{SW}\}, \{r_{\hat{k}j}^{CW}\} \right) = \sum_{k=1}^{\hat{z}} (C_k^W p_k^W + \\ & + \sum_{i=1}^m c_{ik}^{SW} r_{ik}^{SW} + \sum_{j=1}^n c_{kj}^{CW} r_{kj}^{CW}) \rightarrow \min; \\ & \sum_{k=1}^{\hat{z}} r_{ik}^{SW} \mu_{ik}^T \geq Q_i^S, \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ & \sum_{k=1}^{\hat{z}} r_{kj}^{CW} \mu_{kj}^T \geq Q_j^C, \quad j = 1, 2, \dots, n; \\ & \sum_{i=1}^m r_{ik}^{SW} \mu_{ik}^T \leq S_k^W p_k^W; \quad \sum_{j=1}^n r_{kj}^{CW} \mu_{kj}^T = \sum_{i=1}^m r_{ik}^{SW} \mu_{ik}^T, \quad (33) \\ & \hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z}; \\ & L_{\hat{k}\hat{k}'}^W p_{\hat{k}}^W + M(1 - p_{\hat{k}}^W) \geq [L^W] p_{\hat{k}'}^W, \\ & \hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z} - 1; \quad \hat{k}' = \hat{k} + 1, \hat{k} + 2, \dots, \hat{z}; \\ & p_{\hat{k}}^W \in \{0; 1\}, \quad \hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z}; \\ & r_{i\hat{k}}^{SW}, r_{\hat{k}j}^{CW} \geq 0; \quad r_{i\hat{k}}^{SW}, r_{\hat{k}j}^{CW} \in Z, \\ & i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad \hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z}, \end{aligned} \right.$$

где  $M$  – характеристика условно-большой удаленности, км;  $M \gg \max_{\hat{k}, \hat{k}'} \{L_{\hat{k}\hat{k}'}^W\}$ .

Следует подчеркнуть, что линейный характер модели (33) обеспечивает относительно невысокую трудоемкость ее реализации с использованием соответствующего вычислительного программного обеспечения, в том числе Maple, Mathcad, Microsoft Excel и т. п.

Результатами реализации вышеописанного этапа методики являются следующие:

- совокупность арендуемых складов с порядковыми номерами  $\hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z}$ , где  $\hat{z}$  – общее количество арендуемых складов (или количество элементов множества  $\Theta = \{\hat{k} | p_{\hat{k}}^{W \text{opt}} = 1\}$ ,

где  $p_{\hat{k}}^{W \text{opt}}$  – оптимизированное значение логической переменной для  $\hat{k}$ -го альтернативного склада, полученное по результатам реализации оптимизационной модели (30) или (31));  $1 \leq \hat{z} \leq \hat{z}$ ;

- координаты местоположения  $(\tilde{x}_{\hat{k}}^W, \tilde{y}_{\hat{k}}^W)$ , вместимость  $S_{\hat{k}}^W$  (шт./мес.), удельные  $c_{\hat{k}}^W$  (руб./шт.:мес.) и суммарные  $C_{\hat{k}}^W$  (руб./мес.) затраты на аренду, а также вместимость ТС (шт./ед.) для перевозки грузов от каждого  $i$ -го поставщика  $\mu_{ik}^T$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) и к каждому  $j$ -му потребителю  $\mu_{kj}^T$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) для каждого отобранного складского объекта ( $\hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z}$ );

- характеристики грузопотоков – оптимизированные значения перевозимого количества ГЕ (шт./мес.)  $q_{i\hat{k}}^{SW \text{opt}}$  и  $q_{\hat{k}j}^{CW \text{opt}}$  или числа ездов ТС (ед./мес.)  $r_{i\hat{k}}^{SW \text{opt}}$  и  $r_{\hat{k}j}^{CW \text{opt}}$  (в зависимости от используемой модели, определяемой выражением (32) или (33) соответственно) между каждым  $\hat{k}$ -м арендуемым складом и каждым контрагентом  $i$ -м поставщиком и  $j$ -м потребителем.

На заключительном (четвертом) этапе методики производится уточнение координат арендуемых складских объектов при фиксированных значениях характеристик грузопотоков, полученных на предшествующем этапе методики, с использованием средств оптимизационного моделирования.

Неизвестными переменными соответствующей математической модели являются координаты (км) арендуемых складских объектов  $\{(x_k^W, y_k^W)\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ .

На базе указанных переменных производится формирование по отношению к каждому  $\hat{k}$ -му складскому объекту ( $\hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z}$ ) следующих расчетных характеристик модели:

– удаленность  $R_k^{WO}$  (км) склада от условного центра мегаполиса, определяемая на основе координат склада  $(x_k^W, y_k^W)$  (км) в соответствии с выражением (20);

– вместимость  $S_k^W$  (шт./мес.) и удельные затраты  $c_k^W$  на аренду (руб./шт.·мес.), определяемые с использованием соответствующих функциональных зависимостей  $S^W(R^{WO})$  и  $c^W(R^{WO})$  по формулам

$$S_k^W(x_k^W, y_k^W) = S^W(R_k^{WO}(x_k^W, y_k^W)), \quad (34)$$

$$c_k^W(x_k^W, y_k^W) = c^W(R_k^{WO}(x_k^W, y_k^W)); \quad (35)$$

– суммарные затраты на аренду склада  $C_k^W$  (руб./мес.),

$$C_k^W(x_k^W, y_k^W) = S_k^W(x_k^W, y_k^W)c_k^W(x_k^W, y_k^W); \quad (36)$$

– расстояние между складом и каждым контрагентом (км) –  $i$ -м поставщиком  $L_{ik}^{SW}$  и  $j$ -м потребителем  $L_{kj}^{CW}$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ ), вычисляемое на базе координат склада  $(x_k^W, y_k^W)$  (км) в соответствии с выражениями (24) и (25);

– затраты на одну езду ТС (руб./ед.) от каждого  $i$ -го поставщика на склад  $c_{ik}^T$  и со склада каждому  $j$ -му потребителю  $c_{kj}^T$ , определяемые на основе функциональной зависимости  $c_v^T(L_{vk})$  по следующим формулам

$$c_{ik}^T(x_k^W, y_k^W) = c_{v=v_i}^T(L_{ik}^{SW}(x_k^W, y_k^W)), \quad (37)$$

$$c_{kj}^T(x_k^W, y_k^W) = c_{v=v_j}^T(L_{kj}^{CW}(x_k^W, y_k^W)). \quad (38)$$

Также следует отметить, что в наиболее общем случае в дополнение к вышеперечисленным характеристикам производится оценка расстояния между каждой парой ( $\hat{k}$ -м и  $\hat{k}'$ -м) арендуемых складских объектов ( $\hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z} - 1; \hat{k}' = \hat{k} + 1, \hat{k} + 2, \dots, \hat{z}$ ) на базе координат их расположения  $x_k^W, y_k^W, x_{k'}^W, y_{k'}^W$  по формуле, аналогичной (30).

Структура оптимизационной модели, реализуемой на заключительном этапе предлагаемой методики, определяется исходными данными для ее реализации в части грузопотоков, циркулирующих в распределительной сети. В случае, когда указанные грузопотоки описываются количествами перемещаемых (за период) ГЕ  $q_{ik}^{SW\text{opt}}$  и  $q_{kj}^{CW\text{opt}}$  (шт./мес.),  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$  – результатами реализации модели (32) – математическое описание процедуры уточнения координат местоположения арендуемых складских объектов имеет вид

$$\left\{ \begin{aligned} C_{\Sigma}(\{(x_k^W, y_k^W)\}) &= \sum_{k=1}^{\hat{z}} (C_k^W(x_k^W, y_k^W) + \\ &+ \sum_{i=1}^m c_{ik}^{SW}(x_k^W, y_k^W) \left[ \frac{q_{ik}^{SW\text{opt}}}{\mu_{ik}^T} \right] + \\ &+ \sum_{j=1}^n c_{kj}^{CW}(x_k^W, y_k^W) \left[ \frac{q_{kj}^{CW\text{opt}}}{\mu_{kj}^T} \right]) \rightarrow \min; \\ S_k^W(x_k^W, y_k^W) &\geq \sum_{i=1}^m q_{ik}^{SW\text{opt}} = \sum_{j=1}^n q_{kj}^{CW\text{opt}}, \\ \hat{k} &= 1, 2, \dots, \hat{z}; \\ L_{\hat{k}\hat{k}'}^W(x_k^W, y_k^W, x_{k'}^W, y_{k'}^W) &\geq [L^W], \\ \hat{k} &= 1, 2, \dots, \hat{z} - 1; \hat{k}' = \hat{k} + 1, \hat{k} + 2, \dots, \hat{z}; \\ \tilde{x}_k^W - \Delta^X &\leq x_k^W \leq \tilde{x}_k^W + \Delta^X; \\ \tilde{y}_k^W - \Delta^Y &\leq y_k^W \leq \tilde{y}_k^W + \Delta^Y, \hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z}. \end{aligned} \right. \quad (39)$$

При использовании в качестве характеристик грузопотоков количества езды ТС (за период)  $r_{ik}^{SW\text{opt}}$  и  $r_{kj}^{CW\text{opt}}$  (шт./мес.),  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$  – результатов использования

модели (33) – реализуемая на рассматриваемом этапе методики оптимизационная модель описывается выражением

$$\begin{cases}
 C_{\Sigma} \left( \{(x_{\hat{k}}^W, y_{\hat{k}}^W)\} \right) = \sum_{\hat{k}=1}^{\hat{z}} \left( C_{\hat{k}}^W (x_{\hat{k}}^W, y_{\hat{k}}^W) + \right. \\
 + \sum_{i=1}^m c_{i\hat{k}}^{SW} (x_{\hat{k}}^W, y_{\hat{k}}^W) r_{i\hat{k}}^{SW \text{ opt}} + \\
 \left. + \sum_{j=1}^n c_{\hat{k}j}^{CW} (x_{\hat{k}}^W, y_{\hat{k}}^W) r_{\hat{k}j}^{CW \text{ opt}} \right) \rightarrow \min; \\
 S_{\hat{k}}^W (x_{\hat{k}}^W, y_{\hat{k}}^W) \geq \sum_{i=1}^m r_{i\hat{k}}^{SW \text{ opt}} \mu_{i\hat{k}}^T = \sum_{j=1}^n r_{\hat{k}j}^{CW \text{ opt}} \mu_{\hat{k}j}^T, \\
 \hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z}; \\
 L_{\hat{k}\hat{k}'}^W (x_{\hat{k}}^W, y_{\hat{k}}^W, x_{\hat{k}'}^W, y_{\hat{k}'}^W) \geq [L^W], \\
 \hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z} - 1; \hat{k}' = \hat{k} + 1, \hat{k} + 2, \dots, \hat{z}; \\
 \tilde{x}_{\hat{k}}^W - \Delta^X \leq x_{\hat{k}}^W \leq \tilde{x}_{\hat{k}}^W + \Delta^X; \\
 \tilde{y}_{\hat{k}}^W - \Delta^Y \leq y_{\hat{k}}^W \leq \tilde{y}_{\hat{k}}^W + \Delta^Y, \hat{k} = 1, 2, \dots, \hat{z}.
 \end{cases} \quad (40)$$

Важно отметить, что прямые ограничения в оптимизационных моделях (39) и (40) определяют величину отклонения уточненных значений координат арендуемых складов  $(x_{\hat{k}}^{W \text{ opt}}, y_{\hat{k}}^{W \text{ opt}})$  – результатов реализации указанных моделей – от базовых  $(\tilde{x}_{\hat{k}}^W, \tilde{y}_{\hat{k}}^W)$ , вычисленных по формулам (14) и (15) в рамках предшествующего этапа методики, в пределах шага сетки по соответствующей оси координат (см. рис. 2, а); указанное обстоятельство обеспечивает учет погрешности определения оптимальных координат складских объектов с использованием математических моделей (32) и (33).

Также следует подчеркнуть, что ограничения по удаленности арендуемых складских объектов на величину не менее  $[L^W]$  км могут не учитываться в случае, когда исходное размещение альтернативных складов удовлетворяет условию (19), а зоны варьирования координат арендуемых складов, определяемые прямыми ограничениями в моделях (39) и (40), не пересекаются и не являются смежными (удалены друг от друга на расстояние шага сетки  $\Delta^X, \Delta^Y$  км по осям координат).

*Выводы.* Вышеизложенное описание процесса реализации методики формирования складской распределительной сети промышленных предприятий в условиях мегаполиса позволяет сформулировать наиболее важные допущения предложенной разработки и ограничения по ее практическому применению:

- результаты реализации методики в общем случае являются ориентировочными ввиду трудности или невозможности аренды складских площадей или обеспечения транспортной доступности для отдельных местоположений с уточненными координатами  $\{(x_{\hat{k}}^{W \text{ opt}}, y_{\hat{k}}^{W \text{ opt}})\}$ , а также отсутствия строго

- функционального характера (коэффициент детерминации  $R^2 < 1$ ) зависимостей  $S^W(R^{W^0})$ ,  $c^W(R^{W^0})$  и  $c_v^T(L_{\psi k})$ ; при этом отклонения фактических значений характеристик складской сети от расчетных будут обратно пропорциональны плотности застройки рассматриваемого географического региона складскими объектами, значениям коэффициента детерминации  $R^2$  для указанных зависимостей, а также исходному количеству  $z$  альтернативных складских объектов;

- использование оптимизированных на третьем этапе методики значений характеристик грузопотоков ( $\{q_{i\hat{k}}^{SW \text{ opt}}\}$  и  $\{q_{\hat{k}j}^{CW \text{ opt}}\}$  или  $\{r_{i\hat{k}}^{SW \text{ opt}}\}$  и  $\{r_{\hat{k}j}^{CW \text{ opt}}\}$ ) в качестве базовых значений (исходных данных) для уточнения координат  $\{(x_{\hat{k}}^W, y_{\hat{k}}^W)\}$  арендуемых складов сети в рамках следующего (четвертого) этапа основывается на предположении, что дальнейшее изменение (относительно базовых значений) характеристик грузопотоков не оказывает существенного влияния на критерий оптимальности решения – суммарные затраты  $C_{\Sigma}$  на транспортировку грузов и аренду складов – и потому может быть исключено; указанное обстоятельство в общем случае не соответствует действительности, но при этом обеспечивает возможность реализации методики с использованием современных программных сред;

- разработанная методика базируется на проблеме исключительно аренды складских объектов, а не их строительства, что обусловлено существующими тенденциями в

соответствующей области деятельности отечественных промышленных предприятий; структура методики позволяет в наиболее общем случае использовать последнюю для решения задач проектирования распределительной сети из создаваемых, а не арендуемых складских объектов при условии рационального обоснования приведенных (к рассматриваемому периоду) затрат на строительство (создание) единицы вместимости отдельного склада, описываемых характеристикой  $c^W(R^{W0})$ .

ных складских объектов при условии рационального обоснования приведенных (к рассматриваемому периоду) затрат на строительство (создание) единицы вместимости отдельного склада, описываемых характеристикой  $c^W(R^{W0})$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глухов В.В., Балашова Е.С. Производственный менеджмент. Анатомия производства. Lean production: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2008. 351 с.
2. Журавлев Д.А., Макаров В.М. Формирование логистической системы сбыта предприятия при выходе на международные рынки // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2011. № 5(132). С. 251–255.
3. Иванов Д.А. Управление цепями поставок. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 660 с.
4. Козлов В.А., Козлов А.В. Использование фактора времени в современном менеджменте: принципы, инструменты, эффективность // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2012. № 5(156). С. 17–21.
5. Модели и методы теории логистики: учеб. пособие / под ред. В.С. Лукинского [и др.]. СПб.: Питер, 2007. 448 с.
6. Окорочков В.Р., Евсеева С.А., Кальченко О.А. Стратегии поведения организаций в меняющемся мире // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2013. № 6–2(185). С. 60–66.
7. Окрепилов В.В. Роль качества в условиях глобального рынка // Экономика качества. 2013. № 1(2). С. 1–3.
8. Пилипчук С.Ф. Логистика предприятия. Проектирование складской логистической системы предприятия: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 231 с.
9. Проблемы экономики и управления предприятиями, отраслями, комплексами / под ред. С.С. Чернова [и др.]. Новосибирск: ЦРНС, 2015. 215 с.
10. Прохоров А.В., Ильин И.В. Моделирование транспортной инфраструктуры промышленных кластеров с использованием информационно-аналитических систем // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2012. № 3(149). С. 61–65.
11. Радаев А.Е., Кобзев В.В. Модели обоснования структуры распределительной сети промышленных предприятий в условиях мегаполиса // Экономика и промышленная политика: теория и инструментарий / под ред. А.В. Бабкина [и др.]. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 436–452.
12. Радаев А.Е., Кобзев В.В. Подходы к решению задач обоснования структуры складской распределительной сети промышленных предприятий // Инновационная экономика и промышленная политика региона (ЭКОПРОМ-2015): сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А.В. Бабкина [и др.]. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 453–457.
13. Силкина Г.Ю. Теория принятия решений и управление рисками. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2003. 70 с.
14. Сулоева С.Б., Свириденко В.А. Клиентоориентированные системы управления затратами на промышленных предприятиях // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2013. № 4(175). С. 80–83.
15. Юрьев В.Н., Кузьменков В.А. Методы оптимизации в экономике и менеджменте: учеб. пособие. 2-е изд. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 540 с.

## REFERENCES

1. Glukhov V.V., Balashova E.S. Proizvodstvennyi menedzhment. Anatomiiia proizvodstva. Lean production: ucheb. posobie. SPb.: Lan', 2008. 351 s. (rus)
2. Zhuravlev D.A., Makarov V.M. Formation of logistical system of sales development of enterprise by the expansion on the international markets. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 2011, no. 5(132), pp. 251–255. (rus)
3. Ivanov D.A. Upravlenie tsepiami postavok. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2009. 660 s. (rus)
4. Kozlov V.A., Kozlov A.V. Application of time factor in modern management: principles, instruments, efficiency. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 2012, no. 5(156), pp. 17–21. (rus)
5. Modeli i metody teorii logistiki: ucheb. posobie. Pod red. V.S. Lukinskogo i dr. SPb.: Piter, 2007. 448 s. (rus)



6. **Okorokov V.R., Evseeva S.A., Kalchenko O.A.** Strategies of organisations behavior in a changing environment. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 2013, no. 6–2(185), pp. 60–66.
7. **Okrepilov V.V.** Rol' kachestva v usloviakh global'nogo rynka. *Ekonomika kachestva*. 2013. № 1(2). S. 1–3. (rus)
8. **Pilipchuk S.F.** Logistika predpriatii. Proektirovanie skladskoi logisticheskoi sistemy predpriatii: ucheb. posobie. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2008. 231 s. (rus)
9. Problemy ekonomiki i upravleniia predpriatiiami, otrasliami, kompleksami. Pod red. S.S. Chernova i dr. Novosibirsk: TsRNS, 2015. 215 s. (rus)
10. **Prokhorov A.V., Pyin I.V.** Modelling of transport infrastructure of industrial clusters with use of information and analytical systems. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 2012, no. 3(149), pp. 61–65. (rus)
11. **Radaev A.E., Kobzev V.V.** Modeli obosnovaniia struktury raspredelitel'noi seti promyshlennykh predpriatii v usloviakh megapolisa. *Ekonomika i promyshlennaiia politika: teoriia i instrumentarii*. Pod red. A.V. Babkina i dr. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2014. S. 436–452. (rus)
12. **Radaev A.E., Kobzev V.V.** Podkhody k resheniiu zadach obosnovaniia struktury skladskoi raspredelitel'noi seti promyshlennykh predpriatii. *Innovatsionnaia ekonomika i promyshlennaiia politika regiona (EKOPROM-2015)*: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Pod red. A.V. Babkina i dr. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2014. S. 453–457. (rus)
13. **Silkina G.Iu.** Teoriia priniatii reshenii i upravlenie riskami. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2003. 70 s. (rus)
14. **Suloeva S.B., Sviridenko V.A.** Customer-oriented cost management systems in industrial enterprises. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 2012, no. 3(149), pp. 61–65. (rus)
15. **Iur'ev V.N., Kuz'menkov V.A.** Metody optimizatsii v ekonomike i menedzhmente: ucheb. posobie. 2-e izd. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2015. 540 s. (rus)

---

**РАДАЕВ Антон Евгеньевич** – ассистент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат экономических наук.

195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: TW-inc@yandex.ru

**RADAEV Anton E.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

195251. Politechnicheskaya str. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: TW-inc@yandex.ru

**КОБЗЕВ Владимир Васильевич** – заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктор экономических наук.

195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kobzev\_vv@mail.ru

**KOBZEV Vladimir V.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

195251. Politechnicheskaya str. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: kobzev\_vv@mail.ru

---