



А.Е. Радаев, В.В. Кобзев

**ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КЛАСТЕРИЗАЦИИ
ТРАНСПОРТНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ
ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

A.E. Radaev, V.V. Kobzev

**AN OPTIMIZATION MODEL FOR CLUSTERING
A DISTRIBUTED TRANSPORT NETWORK
OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE**

Современные условия развития отечественных промышленных предприятий обуславливают высокую значимость вопросов минимизации логистических затрат на этапе проектирования соответствующих распределительных сетей. Данное обстоятельство определило целесообразность разработки оптимизационной модели кластеризации транспортной распределительной сети промышленных предприятия на базе математической постановки задачи о разбиении. Разработанная модель обеспечивает определение потребного количества идентичных друг другу транспортных средств, необходимого для обслуживания контрагентов-потребителей, в рамках рассматриваемой распределительной сети, а также формирование оптимальных маршрутов движения транспорта по критерию минимизации суммарных затрат на перевозку грузов при ограничениях по вместимости транспортных средств и длительности обслуживания потребителей в рамках отдельного маршрута. Исходными данными для реализации оптимизационной модели являются характеристики структуры распределительной сети в части состава ее основных элементов (транспортных пунктов) и связей (магистралей) между ними, характеристики транспортных средств в части условно-переменных и условно-постоянных затрат, длительности перемещения по связям транспортной сети и вместимости кузова. Для оценки адекватности разработанной модели была произведена ее реализация на практическом примере при решении задачи маршрутизации мелкопартионных автомобильных перевозок в рамках Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Основные этапы ее решения следующие: формирование исходных данных для реализации оптимизационной модели; реализация оптимизационной модели для различных вариантов модели транспортных средств; анализ результатов реализации модели для каждого альтернативного варианта модели транспортного средства; построение зависимостей показателей процесса выполнения маршрутов от вместимости используемых автомобилей. Результаты анализа полученных зависимостей подтвердили адекватность разработанной оптимизационной модели и, как следствие, ее высокую практическую значимость.

ТРАНСПОРТНАЯ СЕТЬ; ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ; КЛАСТЕРИЗАЦИЯ; МОДЕЛИРОВАНИЕ; ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ.

Modern conditions of the development of domestic industrial enterprises engender the growing importance of the issues in the area of minimizing the logistic costs when designing the corresponding distribution networks. Due to this circumstance, it seems expedient to create an optimization model for clustering the distributed transport network of an industrial enterprise. The created model allows to determine both the required number of identical transport vehicles to serve contractors (consumers) within the examined distribution network and the formation of optimal routes for transport movement according to the criterion of minimizing the total transportation costs with constraints on a vehicle's capacity and duration of consumer's service within each route. The initial data for implementing the optimization model include the characteristics of the distribution network structure concerning the composition of its basic elements (transportation points) and the corresponding connections (pathways), the characteristics of transport vehicles concerning the conditionally variable and conditionally fixed costs, the duration of movement on the transportation network's connections and the vehicle's load capacity. To estimate the adequacy of the created model, it was implemented on a practical example for solving the task in the area of small-batch truck traffic routing within Saint Petersburg and Leningrad Oblast. The main stages of implementing the formulated task were the following: forming the initial data for implementing the optimization model; implementing the optimization model for different variants of the vehicle model; analyzing the implementation results for the optimization model for every alternative variant of the vehicle model; forming the dependences of the performing indicators for the routes versus the load capacity of the vehicles used. The analysis of the formed dependences confirmed the adequacy of the created optimization model and, as a consequence, its high practical importance.

TRANSPORTATION NETWORK; INDUSTRIAL ENTERPRISE; CLUSTERIZATION; MODELING; OPTIMIZATION MODEL.

Введение. В современных условиях развития отечественной экономики эффективность промышленных предприятий невозможна без тщательной проработки вопросов организационного проектирования и организации функционирования не только производственных подразделений предприятий, но и соответствующих сетей поставок, особенно в части грузопотоков готовой продукции, циркулирующих в рамках транспортных распределительных сетей [1–6, 8–10, 13, 14].

Особая значимость проблем организации сбытовых процессов обусловлена необходимостью последовательной реализации процессов консолидации и кастомизации [4] продукции в соответствующих складских объектах и, как следствие, сложностью структуры грузопотоков, циркулирующих в рамках транспортной распределительной сети. Именно для рационализации процессов распределения готовой продукции предприятия зачастую приобретают специализированные программные средства для оптимизации характеристик соответствующих транспортных процессов, такие как TopLogistic, Rinkai TMS и др. Следует подчеркнуть, что приобретение вышеупомянутых программных продуктов производится, как правило, после обоснования характеристик распределительных процессов, реализуемых в рамках предприятия, в части количества и характеристик складских объектов, структуры парка транспортных средств и т. д. Указанное обстоятельство определяет необходимость использования инструментальных средств математического моделирования при организационном проектировании транспортной распределительной сети в части маршрутов транспортировки готовой продукции. При этом результаты анализа отечественных и зарубежных научных работ по соответствующей тематике позволяют сформулировать следующее:

- традиционно используемые при укрупненном моделировании процессов перевозки грузов так называемые транспортные задачи (к которым относятся классическая транспортная задача, транспортная задача с промежуточными пунктами, задача коммивояжера и т. д. [12]) не учитывают большое количество особенностей процесса распределения готовой продукции (наличие кольцевых

маршрутов, ограниченной вместимости транспортных средств (ТС), ограничений по длительности нахождения ТС в наряде и т. п.) и потому не могут быть использованы в рамках организационного проектирования транспортных распределительных сетей;

- оптимизационные модели, применяемые с целью обоснования характеристик транспортных распределительных сетей промышленных предприятий, малочисленны и, как правило, имеют ограниченную область применения, определяемую, в частности, видом используемого транспорта, технологией процессов складирования и транспортировки и т. д.

Все вышеизложенное определило целесообразность разработки оптимизационной модели, обеспечивающей обоснование характеристик функционирования распределительной сети промышленных предприятий (в части маршрутов перевозки грузов и объемов соответствующих транспортных партий) на этапе ее организационного проектирования.

Методика исследования. В качестве основы для создания инструментального средства использована оптимизационная модель, представленная в работе [7], соответствующая так называемой задаче о разбиении. Указанная модель позволяет выделить в неориентированном графе отдельные совокупности узлов – подмножества – по критерию минимизации суммарного веса дуг, соединяющих узлы в подмножествах, при ограничении, что суммарный вес вершин в рамках каждого выделенного подмножества не превысит некоторого предельного значения. Важно отметить, что описанная выше математическая разработка формально может быть использована для решения задачи кластеризации распределительной сети промышленного предприятия на базе следующих основных положений:

- исходный граф как множество вершин и дуг описывает транспортную распределительную сеть как множество пунктов (контрагентов-потребителей) и связующих магистралей; формируемые подмножества отождествляются с маршрутами движения ТС при доставке грузов потребителям;
- в качестве весов дуг и вершин графа рассматриваются соответственно затраты на перемещение ТС по магистрали и объем спроса в транспортном пункте;



– предельное значение суммарного веса вершин графа в выделяемых подмножествах отождествляется с вместимостью ТС.

Однако по результатам реализации соответствующей оптимизационной модели выявлены следующие недостатки:

– при формировании каждого отдельного маршрута производится учет затрат на перемещение ТС по всем магистралям, соединяющим транспортные пункты в составе маршрута; при этом в реальной ситуации учет затрат должен производиться по отношению к каждому транспортному пункту только для двух магистралей – для поступления и убытия ТС из пункта; данное обстоятельство обуславливает сложность трактовки целевой функции и, как следствие, искомых переменных;

– в процессе оптимизации маршрутов движения ТС не учитывается перемещение последних из исходного пункта их загрузки (автотранспортного парка, снабженческого склада и т. д.) в таковой соответственно в начале и по окончании процесса обслуживания потребителей.

Указанные недостатки были устранены в процессе разработки оптимизационной модели кластеризации транспортной распределительной сети промышленного предприятия. Название модели определяет ее назначение – разделение (кластеризация) исходной транспортной сети на отдельные совокупности элементов (транспортных пунктов), описывающие транспортные маршруты движения ТС, с использованием определенных критериев и ограничений.

Важно отметить, что созданная модель является математическим описанием решения задачи маршрутизации мелкопартионных перевозок грузов. При этом основные положения указанной задачи следующие:

– промышленное предприятие реализует доставку однономенклатурной готовой продукции в виде паллетированных грузовых единиц (ГЕ) определенному количеству контрагентов-потребителей в соответствии с их спросом в заданном географическом регионе через центральный распределительный склад; таким образом, упомянутый складской объект и контрагенты-потребители, а также соединяющие их магистрали для транспортировки продукции образуют транспортную сеть предприятия;

– транспортировка ГЕ со склада контрагентам-потребителям осуществляется с использованием идентичных друг другу арендуемых ТС определенной вместимости, выражаемой определенным количеством ГЕ; при этом привлечение очередного ТС к процессу обслуживания контрагентов-потребителей описывается характеристикой условно-постоянных затрат (в случае с автомобильным транспортом последние отождествляются с затратами на подачу ТС [11]);

– процесс распределения готовой продукции предприятия, реализуемый отдельно рассматриваемым ТС, описывается определенным количеством последовательно посещаемых контрагентов-потребителей в рамках соответствующего транспортного маршрута (наряда);

– каждое ТС в рамках соответствующего транспортного маршрута (наряда) посещает каждого контрагента-потребителя единожды, отгружая количество ГЕ в соответствии с номинальным объемом спроса контрагента; таким образом, определенный потребитель не может обслуживаться несколькими ТС в рамках разных транспортных маршрутов;

– основными характеристиками процесса перевозки ГЕ по каждой отдельной магистрали являются условно-переменные затраты (при использовании автомобильного транспорта отождествляются с затратами на 1 ч работы арендуемого автомобиля) и длительность перемещения соответствующего ТС.

В рамках задачи необходимо определить потребное количество ТС для обслуживания контрагентов-потребителей, а также конфигурацию соответствующих транспортных маршрутов, обеспечивающих минимальное значение суммарных затрат на перевозку грузов при условии, что суммарное количество ГЕ, выгружаемое из каждого ТС в процессе выполнения им назначенного транспортного маршрута, не превысит вместимости ТС, а общая длительность выполнения каждого маршрута не превысит соответствующей максимально допустимой величины.

Исходные данные, необходимые для реализации разработанной оптимизационной модели кластеризации транспортной распределительной сети, включают:

– множество индексов элементов транспортной сети K , включающее в себя множество индексов распределительных складских

объектов W , а также множество индексов контрагентов-потребителей J ;

$$\begin{aligned} K &= \{1; 2; \dots; \Psi\}; \quad W = \{w\}; \\ J &= K / W = \{k \mid k \in K, k \neq w\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где k — индекс элемента транспортной сети; Ψ — количество элементов транспортной сети (ед.); w — индекс элемента, соответствующий складскому объекту (распределительному складу);

— объем спроса D_k (шт.) каждого k -го контрагента-потребителя, $k \in J$;

— вместимость μ (шт.) кузова каждого ТС;

— условно-постоянные затраты c_0 (руб./ед.) на привлечение очередного ТС к процессу обслуживания потребителей;

— условно-переменные затраты c_{ij} (руб.) и длительность t_{ij} (ч) перевозки грузов в кузове ТС из i -го элемента транспортной сети в j -й; $i, j \in K; i \neq j$;

— максимально допустимая длительность ξ (ч) процесса доставки ГЕ контрагентам-потребителям каждым ТС; следует отметить, что указанная длительность не учитывает интервал времени возвращения порожнего (посетившего всех назначенных контрагентов-потребителей) ТС в распределительный склад;

— максимально возможное количество $z^{\max}$ (ед.) ТС, используемых для обслуживания контрагентов-потребителей.

Расчетные характеристики модели следующие:

— максимальный остаток ГЕ M (шт.) в кузове ТС после очередной отгрузки:

$$M = \mu - \min_{k \in J} \{D_k\}; \quad (2)$$

— максимальный остаток допустимого значения длительности T (ч) процесса доставки ГЕ контрагентам-потребителям каждым ТС к моменту посещения им первого потребителя:

$$T = \xi - \min_{\substack{i, j \in K \\ i \neq j}} \{t_{ij}\}. \quad (3)$$

Искомые переменные оптимизационной модели следующие:

— логические переменные x_{ij} , определяющие целесообразность перемещения ТС из i -го элемента транспортной сети в j -й (количество данных переменных совпадает с общим количеством магистралей в рамках сети)

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если перемещение ТС из } i\text{-го} \\ & \text{элемента сети в } j\text{-й целесообразно,} \\ 0 & \text{— в противном случае;} \end{cases} \quad (4)$$

$i, j \in K, \quad i \neq j;$

— потребное количество z (ед.) ТС для обслуживания контрагентов-потребителей;

— общее количество u_k (шт.) ГЕ, выгруженных из кузова ТС к моменту посещения каждого контрагента-потребителя, $k \in J$;

— общая длительность τ_k (ч) доставки ГЕ потребителям, выполняемой отдельным ТС, к моменту посещения каждого контрагента-потребителя; $k \in K$.

Целевая функция оптимизационной модели определяет общие суммарные затраты C_Σ (руб.) на перевозку грузов от распределительного склада к контрагентам-потребителям:

$$\begin{aligned} C_\Sigma(\{x_{ij}\}, z) &= C_\Sigma^{\text{пер}}(\{x_{ij}\}) + C_\Sigma^{\text{пост}}(z) = \\ &= \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} c_{ij} x_{ij} + c_0 z \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (5)$$

где $C_\Sigma^{\text{пер}}, C_\Sigma^{\text{пост}}$ — суммарные условно-переменные и условно-постоянные затраты (руб.) на перевозку грузов соответственно; I — множество индексов элементов транспортной сети (пунктов-источников), из которых ТС может перемещаться в другие элементы (пункты-приемники); J_i — множество индексов элементов транспортной сети (пунктов-приемников), в которые ТС может перемещаться из i -го элемента (пункта-источника).

Прямые (структурные) ограничения модели, определяющие тип и граничные значения искомых переменных, имеют вид:

$$\begin{cases} x_{ij} \in \{0; 1\}, i \in I, j \in J_i; \\ 1 \leq z \leq z^{\max}; \\ D_k \leq u_k \leq \mu, k \in J; \\ 0 \leq \tau_k \leq \xi, k \in K. \end{cases} \quad (6)$$

Непрямые (функциональные) ограничения оптимизационной модели определяются выражением вида:

$$\begin{cases} u_i - u_j + D_j x_{ij} - M(1 - x_{ij}) \leq 0, i, j \in J, i \neq j; \\ \tau_i - \tau_j + t_{ij} x_{ij} - T(1 - x_{ij}) \leq 0, i \in K, j \in J; \\ \sum_{i \in I_k} x_{ik} = 1; \quad \sum_{j \in J_k} x_{kj} = 1, k \in J; \\ \sum_{i \in I_k} x_{ik} = z; \quad \sum_{j \in J_k} x_{kj} = z, k \in W, \end{cases} \quad (7)$$

где I_k — множество индексов элементов транспортной сети (пунктов-источников), из которых ТС может перемещаться в k -й элемент (пункт-приемник); J_k — множество

индексов элементов транспортной сети (пунктов-приемников), в которые ТС может перемещаться из k -го элемента (пункта-источника).

Ограничения в первой и второй строках выражения (7) определяют кумулятивный характер вычисления неизвестных переменных $\{u_k\}$ и $\{\tau_k\}$ в последовательности транспортных пунктов, отождествляемой с маршрутом движения ТС и определяемой значениями переменных $\{x_{ij}\}$.

Ограничения в третьей строке выражения (7) определяют однократность посещения ТС каждого контрагента-потребителя в составе назначенного маршрута.

Ограничения в четвертой строке выражения (7) определяют соответствие общего количества убытий и прибытий ТС в распределительный склад потребному количеству ТС.

Следует отметить, что разработанная оптимизационная модель в ее исходном виде имеет следующие основные недостатки, ограничивающие область ее применения и негативно влияющие на адекватность получаемых результатов:

– модель описывает распределение грузов между контрагентами-потребителями из единственного склада, т. е. применима либо при наиболее простой конфигурации соответствующей складской сети, либо после закрепления за каждым из нескольких складов определенного количества потребителей. Данный недостаток может быть устранен при замене ограничений в четвертой строке выражения (7) на равенства вида

$$\begin{cases} \sum_{i \in I_k} x_{ik} = \sum_{j \in J_k} x_{kj}, & k \in W; \\ \sum_{i \in W} \sum_{j \in I_k} x_{ij} = z, \end{cases} \quad (8)$$

где

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}; \quad w_l \in K; \quad l = 1, 2, \dots, m; \quad (9)$$

w_l – индекс l -го распределительного склада; m – общее количество распределительных складов (ед.). Следует подчеркнуть, что при наличии условий (9) и использовании ограничений (8) по результатам реализации оптимизационной модели могут быть сформированы транспортные маршруты перемеще-

ния ТС, предполагающие убытие и прибытие транспорта в разные складские объекты;

– при моделировании процесса обслуживания ТС не учитываются процедуры загрузки и разгрузки транспорта соответственно на складах и у контрагентов-потребителей, что допустимо лишь в том случае, когда длительность выполнения указанных процедур пренебрежимо мала, в сравнении с протяженностью процессов перемещения ТС между элементами транспортной сети; данный недостаток может быть устранен на этапе подготовки исходных данных для реализации модели посредством добавления к исходным значениям длительности перемещения ТС между элементами транспортной сети $\{t_{ij}\}$ протяженности процедур обслуживания ТС в соответствующих пунктах $\{t_k^{\text{обс}}\}$ согласно формуле

$$t'_{ij} = \begin{cases} t_{ij} + \frac{t_i^{\text{обс}}}{2} + \frac{t_j^{\text{обс}}}{2}, & i, j \in J; \\ t_{ij} + t_i^{\text{обс}} + \frac{t_j^{\text{обс}}}{2}, & i \in W, j \in J; \\ t_{ij} + \frac{t_j^{\text{обс}}}{2}, & i \in J, j \in W, \end{cases} \quad (10)$$

где t'_{ij} – длительность (ч) перемещения ТС из i -го элемента транспортной сети в j -й, а также обслуживания транспорта в указанных пунктах, поставленная в соответствие определенной магистрали транспортной сети; значения t'_{ij} необходимо использовать при формировании непрямых ограничений во второй строке выражения (7); $t_{i(j)}^{\text{обс}}$ – длительность (ч) обслуживания ТС – загрузки или разгрузки – в i -м (j -м) элементе транспортной сети.

Для оценки адекватности разработанной оптимизационной модели в ее базовом варианте, т. е. без использования дополнительных ограничений и расчетов, описываемых соответственно выражениями (8) и (10), произведена ее реализация на практическом примере в рамках решения задачи маршрутизации мелкопартионных перевозок, предполагающей обоснование потребного количества ТС и формирование кольцевых маршрутов движения транспорта из

центрального распределительного склада до 20 контрагентов-потребителей, в городе Санкт-Петербурге и Ленинградской области. Важно отметить, что решение вышеуказанной задачи производилось для нескольких альтернативных вариантов модели ТС с целью получения наиболее объективной информации о практической значимости модели. Также следует подчеркнуть, что ввиду относительно небольших масштабов рассматриваемого географического региона решение поставленной задачи производилось без учета ограничений по длительности процесса доставки ГЕ потребителям в рамках каждого отдельного маршрута, что определило отсутствие необходимости учета переменных $\{\tau_k\}$ и связанных с ними прямых и функциональных ограничений, описываемых выражениями (6) и (7) соответственно. Значения основных технических и стоимостных характеристик вышеуказанных моделей ТС, предоставляемые соответственно заводами-производителями [19–21] и компаниями-перевозчиками [17, 18], приведены здесь в таблице. В качестве транспортируемых ГЕ рассматривались товары народного потребления, перевозимые на стандартных европаллетах (соответствующие характеристики представлены в таблице), а

в качестве контрагентов-потребителей – магазины оптовой и розничной торговли. Характеристики расположения и спроса последних, а также характеристики расположения центрального распределительного склада в рамках рассматриваемого географического региона представлены на рис. 1 и 2.

Решение поставленной задачи предполагало последовательную реализацию следующих основных этапов.

1. Расчет для каждого альтернативного варианта модели ТС вместимости $\mu = \mu^T$ кузова по формуле (3), представленной в работе [11].

2. Введение по отношению к карте рассматриваемого географического региона [16] декартовой системы координат, измерение координат (км) по осям абсцисс и ординат $\{(x_k, y_k)\}$ для каждого элемента транспортной сети ($k \in K$).

3. Расчет наикратчайших расстояний L_{ij} (км) с использованием формулы (7), представленной в [11], между каждой парой элементов транспортной сети ($i, j \in K$); таким образом, рассматривалась полносвязная транспортная сеть, обуславливающая возможность перемещения ТС из каждого элемента сети в любой другой.

Характеристики альтернативных вариантов модели транспортных средств, рассматриваемых при решении поставленной задачи, а также обрабатываемых грузовых единиц

Модель транспортного средства	Габариты кузова, мм			Грузоподъемность G_v^T , кг	Вместимость	Средняя маршрутная скорость v_v^T , км/ч	Условно-постоянные затраты $c_{0v}^T = c_0$, руб./ед.	Условно-переменные затраты c_{1v}^T , руб.
	длина L_v^T	ширина B_v^T	высота H_v^T					
Hyundai HD 78	4700	2000	2000	4500	4	50,1	625	625
КАМАЗ 43253-28 (R4)	5162	2470	2000	7250	7	45,7	725	725
Ford Cargo 1826 DC	6660	2480	2400	10000	10	41,2	850	850
КАМАЗ 65117-23 (A4)	7800	2470	2200	14500	14	33,9	900	900
	Габариты грузовой единицы, мм			Масса ГЕ с грузом m^U , кг				
	длина L^U	ширина b^U	высота с грузом h^U					
	1200	1000	1650	1000				

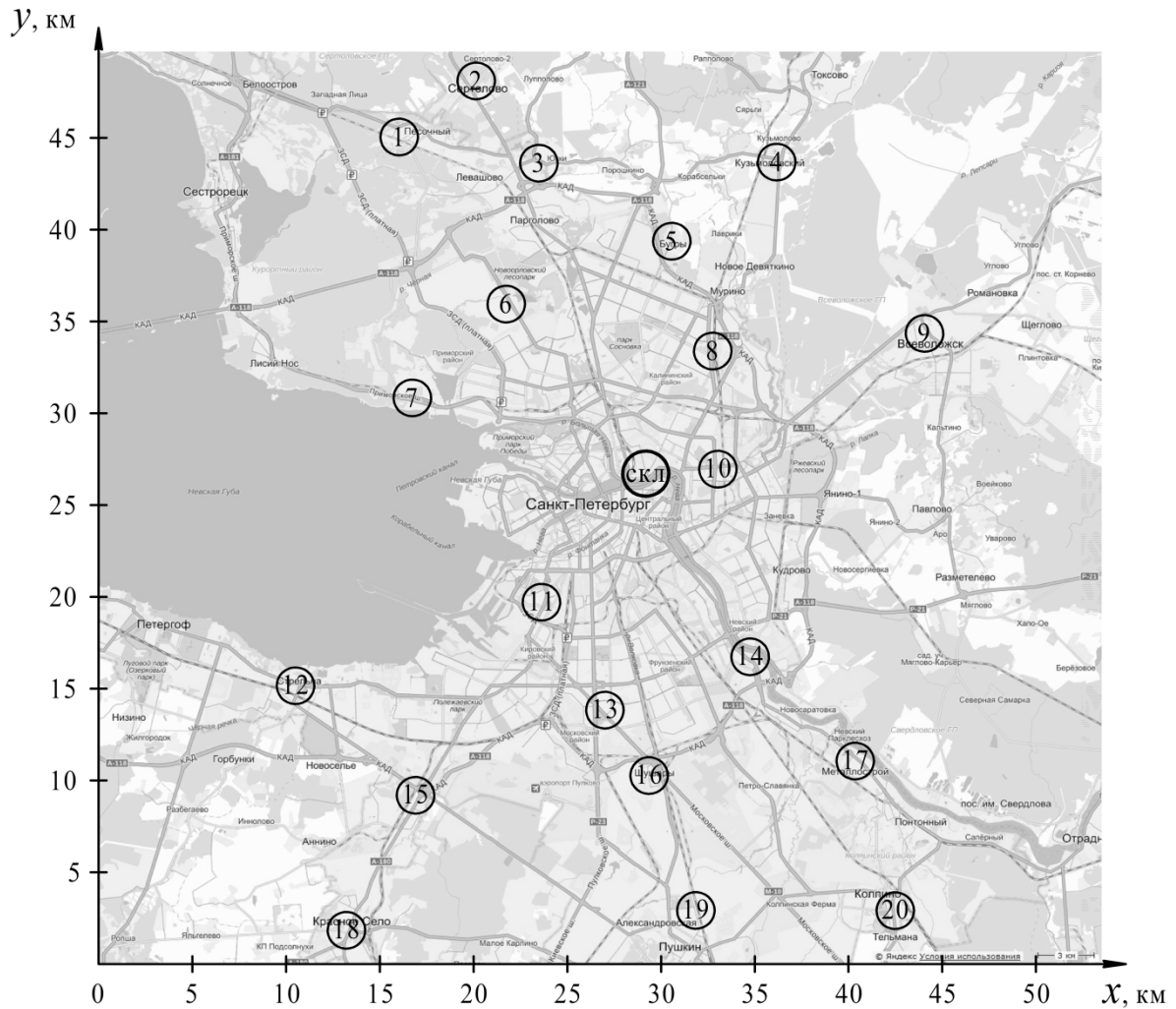


Рис. 1. Местоположения распределительного склада и 20 контрагентов-потребителей в рамках рассматриваемого географического региона

4. Реализация для каждого альтернативного варианта модели ТС следующих вычислительных процедур:

1) расчет длительности t_{ij} (ч) и условно-переменных затрат c_{ij} (руб.) на перевозку ГЕ между каждой парой элементов транспортной сети ($i, j \in K$) на базе предварительно вычисленных наикратчайших расстояний L_{ij} в соответствии с выражениями

$$t_{ij} = \frac{L_{ij} k^{TI} k^{TL}}{v^T}, \quad (11)$$

$$c_{ij} = C_1^T t_{ij}, \quad (12)$$

где k^{TI} , k^{TL} — коэффициенты учета соответственно особенностей транспортной инфраструктуры и простоев ТС под светофорами [11]; описание остальных компонентов выражений (11) и (12) представлено в таблице; результаты выполненного с использованием программы «Microsoft Excel 2010» расчета вышеуказанных характеристик для одного из альтернативных вариантов модели ТС представлены на рис. 2; здесь же приведены значения характеристик вероятности простоя ТС под очередным светофором p , средней длительности простоя ТС под очередным светофором Δt (с) и среднего расстояния между смежными светофорами ΔL (км), необходимые для вычисления коэффициента k^{TL} [11];

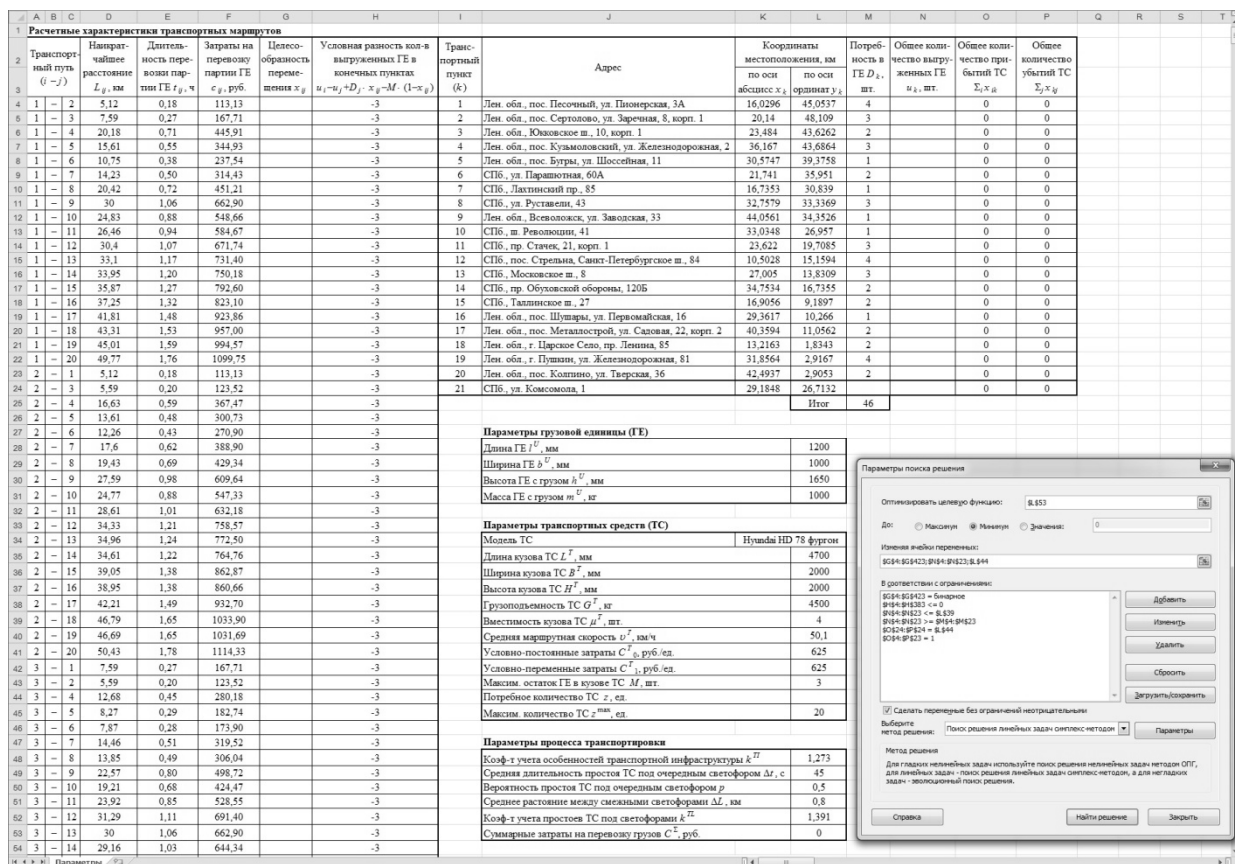


Рис. 2. Исходные данные, расчетные характеристики и принцип реализации оптимизационной модели в «Microsoft Excel 2010».

2) реализация оптимизационной модели кластеризации транспортной распределительной сети на базе исходных данных, сформированных в рамках предшествующих этапов решения задачи; наименее трудоемкий способ выполнения данного этапа предполагает использование надстройки «Поиск решения» в программе «Microsoft Excel 2010» (принципы использования надстройки иллюстрируются на рис. 2), однако ввиду большого количества переменных и ограничений (441 переменная, 463 прямых ограничения, 422 функциональных ограничения) применение вышеуказанной надстройки невозможно из-за ее ограниченных вычислительных возможностей [15]; вышеуказанное обстоятельство определило целесообразность использования надстройки «Optimization toolbox» программной среды «MatLab R2014a», не имеющей ограничений по сложности реализуемых математических моделей;

3) анализ полученных результатов реализации оптимизационной модели, предполагающий следующее.

Во-первых, расчет для каждого r -го сформированного маршрута ($r = 1, 2, \dots, z$) следующих показателей:

– количество Ψ_r (ед.) контрагентов-потребителей, обслуживаемых определенным ТС в рамках каждого r -го маршрута, определяемое выражением

$$\Psi_r = |J_r|;$$

$$J_r = \left\{ k \mid \prod_{k \in J_r} \left(\sum_{i \in I_k} x_{ik} \cdot \sum_{j \in J_k} x_{kj} \right) = 1 \right\}, \quad (13)$$

где J_r – множество индексов элементов транспортной сети, соответствующих контрагентам-потребителям, в составе r -го маршрута;

– общее количество груза v_r (шт.), доставленное контрагентам-потребителям, а также номинальная загруженность ТС γ_r в рамках каждого r -го маршрута, вычисляемые по формулам

$$v_r = \sum_{k \in J_r} D_k, \quad (14)$$

$$\gamma_r = v_r / \mu; \quad (15)$$

– длительность T_r (ч) выполнения каждого r -го маршрута определенным ТС (от момента отправления транспорта из распределительного склада до момента его возвращения), определяемая в соответствии с выражением

$$T_r = \sum_{i \in J_r} \sum_{\substack{j \in J_r \\ j \neq i}} t_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in W} \sum_{j \in J_r} t_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in J_r} \sum_{j \in W} t_{ij} x_{ij}; \quad (16)$$

– условно-переменные затраты $C_r^{\text{пер}}$ (руб.) на выполнение каждого r -го маршрута определенным ТС, описываемые формулой

$$C_r^{\text{пер}} = \sum_{i \in J_r} \sum_{\substack{j \in J_r \\ j \neq i}} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in W} \sum_{j \in J_r} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in J_r} \sum_{j \in W} c_{ij} x_{ij}. \quad (17)$$

Во-вторых, статистическую обработку полученных расчетных значений вышеуказанных показателей с вычислением суммарного среднего, минимального и максимального значений по всей совокупности сформированных маршрутов с использованием известных формул.

Графическая интерпретация результатов реализации разработанной оптимизационной модели для всех альтернативных вариантов модели ТС представлены на рис. 3.

5. Построение и анализ зависимостей значений показателей, сформированных в рамках реализации предыдущего этапа решения задачи, от значений вместимости соответствующего альтернативного варианта модели ТС. К указанным статистическим показателям относятся:

- потребное количество транспортных средств (ед.);
- среднее значение количества пунктов (потребителей) в маршруте (ед.);
- среднее значение номинальной загруженности ТС при выполнении маршрута;

– среднее и максимальное значения длительности выполнения маршрута (ч);

– суммарные значения условно-переменных и условно-постоянных затрат на обслуживание контрагентов-потребителей (руб.).

Графики вышеперечисленных зависимостей представлены на рис. 4.

Результаты исследования. По результатам анализа зависимостей, полученных на заключительном этапе реализации оптимизационной модели, выявлено следующее:

– потребное количество ТС уменьшается, а среднее количество пунктов в маршруте увеличивается с возрастанием вместимости ТС при фиксированном суммарном значении спроса контрагентов-потребителей; при этом нелинейный характер указанных зависимостей обусловлен необходимостью удовлетворения спроса каждого отдельного контрагента-потребителя в полном объеме при посещении его ТС, а также случайным характером расположения контрагентов-потребителей и их объемов спроса;

– среднее значение загруженности ТС нелинейно снижается при увеличении вместимости транспорта, что объясняется как возрастанием величины остатка от деления суммарного значения объема спроса потребителей на вместимость ТС, так и неравномерностью распределения последних по формируемым маршрутам;

– среднее и максимальное значения длительности выполнения маршрута нелинейно возрастают (причины этому аналогичны тем, что представлены в п. 1) при увеличении вместимости ТС ввиду повышения среднего количества обслуживаемых контрагентов-потребителей в маршруте;

– общие суммарные затраты уменьшаются при возрастании вместимости ТС в основном благодаря снижению условно-постоянных затрат; данное обстоятельство объясняется тем, что возрастание условно-переменных затрат на выполнение каждого отдельного маршрута (ввиду увеличения средней длительности пребывания в наряде соответствующего ТС) полностью компенсируется снижением потребного количества ТС и, как следствие, суммарных условно-постоянных затрат; этим же объясняется и относительно небольшое изменение условно-переменных затрат при увеличении вместимости ТС.

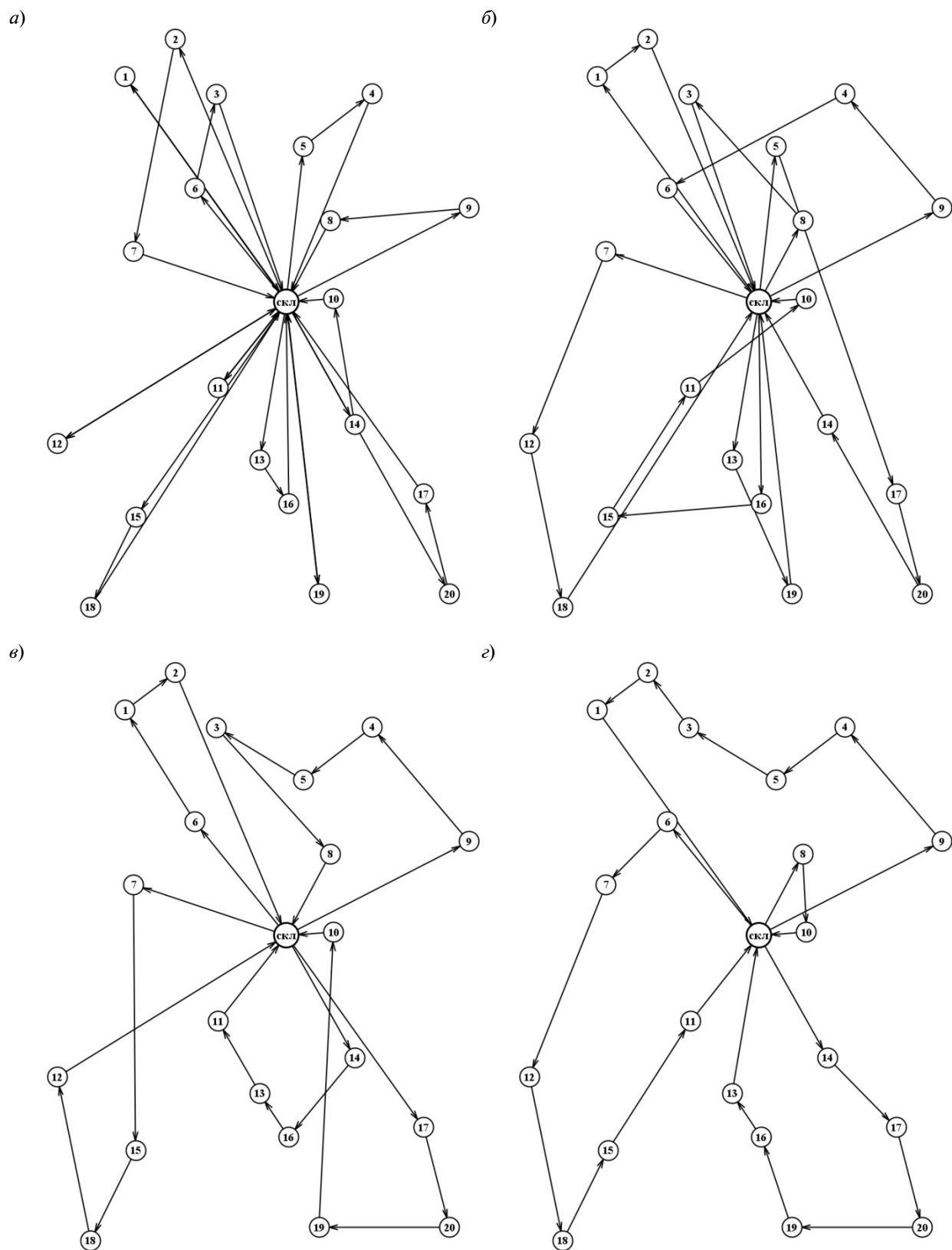


Рис. 3. Графическая интерпретация результатов реализации оптимизационной модели в части конфигурации маршрутов движения ТС определенной вместимости μ : а) 4 шт.; б) 7 шт.; в) 10 шт.; г) 14 шт.

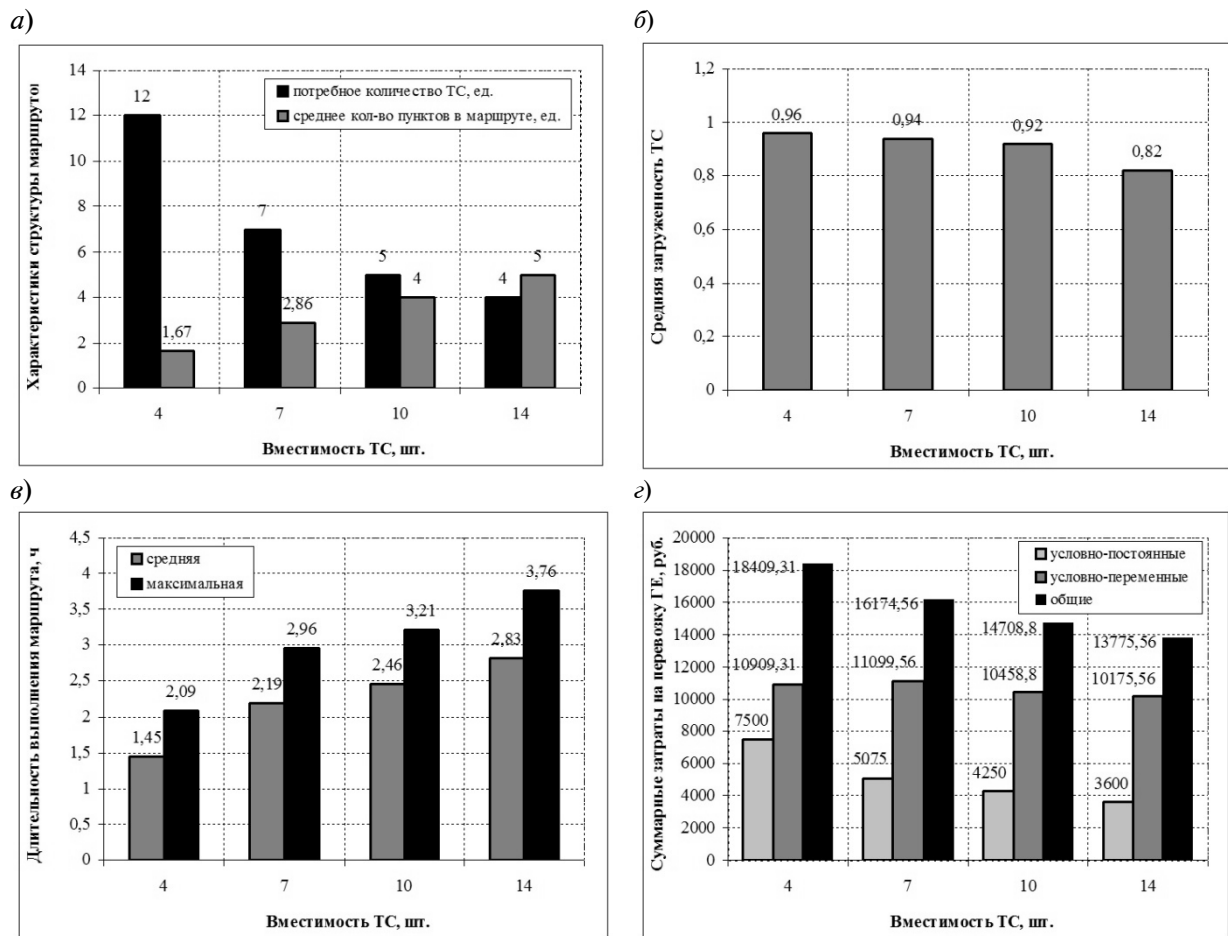


Рис. 4. Графики зависимостей расчетных показателей, полученных на базе результатов реализации оптимизационной модели, от вместимости альтернативных вариантов модели ТС:

- а) потребного количества ТС и среднего количества пунктов в маршруте; б) среднего значения загрузки ТС; в) среднего и максимального значений длительности выполнения маршрута; г) суммарного значения условно-постоянных, условно-переменных и общих затрат на обслуживание контрагентов-потребителей

Следует подчеркнуть, что вышеописанные зависимости получены на базе стоимостных характеристик альтернативных вариантов модели ТС без учета ограничения по минимальному времени аренды автомобильного транспорта. При этом предполагалось, что сформированные маршруты могут быть выполнены не параллельно (потребным количеством ТС), а последовательно (меньшим количеством автомобилей) с выполнением для каждого отдельного ТС вышеупомянутого ограничения.

Таким образом, указанные выше зависимости, полученные по результатам решения задачи, соответствуют действительности и свидетельствуют об адекватности разработанной оптимизационной модели.

Выводы. На основе математической постановки задачи о разбиении [7] была разработана оптимизационная модель кластеризации транспортной распределительной сети промышленного предприятия, обеспечивающая формирование маршрутов движения транспортных средств определенной грузоподъемности при обслуживании ограниченного количества контрагентов-потребителей из конечного числа пунктов загрузки транспорта (транспортных парков, распределительных складов и т. п.); модель может быть применена к любому виду транспорта, за исключением трубопроводного;

Разработанная модель реализована на практическом примере; анализ полученных результатов позволил сделать вывод об адек-

ватности созданного инструментального средства и его высокой практической значимости.

Вышеописанные результаты предполагает использовать в качестве основы для дальнейших исследований по следующим направлениям:

– реализация разработанной оптимизационной модели кластеризации транспортной распределительной сети промышленного пред-

приятия на других практических примерах, в рамках которых рассматриваются процессы транспортировки альтернативными видами транспорта (морским, железнодорожным и т. п.);

– модернизация разработанной модели для возможности учета фактора надежности процесса транспортировки совместно с уже учитываемыми факторами затрат и времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабкин А.В., Новиков А.О. Кластер как субъект экономики: сущность, современное состояние, развитие // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2016. № 1(235). С. 9–29. DOI: 10.5862/JE.235.1
2. Глухов В.В., Балашова Е.С. Производственный менеджмент. Анатомия резервов. Lean production: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2008. 351 с.
3. Иванова Н.Л., Ключарева Н.С. Влияние макроэкономических факторов на риски деятельности предприятий // Неделя науки СПбГПУ: матер. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Инженерно-экономический институт СПбГПУ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 20–22.
4. Казанцев А.К., Кобзев В.В., Макаров В.М. Управление операциями: учебник. М.: Инфра-М, 2013. 478 с.
5. Клейнер Г.Б. Системный ресурс стратегической устойчивости экономики // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2015. № 4(223). 2015. С. 10–24. DOI: 10.5862/JE.223.1
6. 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.
7. Леоленков А.В. Решение задач оптимизации в среде MS Excel. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 704 с.
8. Малюк В.И., Немчин А.М. Производственный менеджмент: учеб. пособие. СПб.: Питер, 2008. 277 с.
9. Чернов С.С. и др. Современная модель эффективного бизнеса. Новосибирск: ЦРНС, 2015. 246 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. Методика формирования структуры складской распределительной сети промышленных предприятий в условиях мегаполиса // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2015. № 6(233). С. 183–195. DOI: 10.5862/JE.233.19
12. Радаев А.Е., Кобзев В.В. Модели обоснования структуры распределительной сети промышленных предприятий в условиях мегаполиса // Экономика и промышленная политика: теория и инструментальный / А.В. Бабкин [и др.]. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 436–452.
13. Силкина Г.Ю., Юрьев В.Н. Экономико-математическое моделирование в принятии инновационных решений // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2014. № 3. С. 43–53.
14. Сулоева С.Б., Свириденко В.А. Клиенто-ориентированные системы управления затратами на промышленных предприятиях // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2013. № 4(175). С. 80–83.
15. Вычислительные возможности надстройки «Поиск решения» программы «Microsoft Excel». 2015. URL: http://www.planetaexcel.ru/forum/?FID=8&PAGE_NAME=read&TID=14200
16. Карта Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Поисково-информационная картографическая служба ООО «Яндекс». 2016. URL: <https://maps.yandex.ru/2/saint-petersburg/>
17. Тарифы на автомобильные перевозки в Санкт-Петербурге. Компания «Авангард». 2011. URL: <http://www.gruzoperevozki-spb.ru/>
18. Тарифы на автомобильные перевозки в Санкт-Петербурге. Проект «Догрузов». 2009. URL: <http://dogruzov.ru/gruzoperevozki-sankt-peterburg/tarify>
19. Технические характеристики грузовых автомобилей «КАМАЗ». 2016. URL: <http://www.kamaz.ru/production/serial/bortovye-avtomobili/>
20. Технические характеристики грузовых автомобилей «Ford». 2016. URL: http://www.ford.ru/Heavys/Heavys_models
21. Технические характеристики грузовых автомобилей «Hyundai». 2016. URL: <http://www.hyundai-ct.ru/auto/trucks/>



REFERENCES

1. Babkin A.V., Novikov A.O. Cluster as a subject of economy: essence, current state, development. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 2016, no. 1(235), pp. 9–29. DOI: 10.5862/JE.235.1 (rus)
2. Glukhov V.V., Balashova E.S. Proizvodstvennyi menedzhment. Anatomii rezervov. Lean production: ucheb. posobie. SPb.: Lan', 2008. 351 s. (rus)
3. Ivanova N.L., Kliuchareva N.S. The influence of macroeconomic factors on risks of activity of the enterprises. *Proceedings of the Scientific Forum with International Participation Week of Science. St. Petersburg*, 2014, pp. 20–22. (rus)
4. Kazantsev A.K., Kobzev V.V., Makarov V.M. Upravlenie operatsiyami: uchebnik. M.: Infra-M, 2013. 478 s. (rus)
5. Kleiner G.B. System resource of economic strategic stability. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 2015, no. 4(223), pp. 10–24. DOI: 10.5862/JE.223.1 (rus)
6. 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)
7. Leolenkov A.V. Reshenie zadach optimizatsii v srede MS Excel. SPb.: BKhV-Peterburg, 2005. 704 s. (rus)
8. Maliuk V.I., Nemchin A.M. Proizvodstvennyi menedzhment: ucheb. posobie. SPb.: Piter, 2008. 277 s. (rus)
9. Chernov S.S. i dr. Sovremennaya model' effektivnogo biznesa. Novosibirsk: TsRNS, 2015. 246 s. (rus)
10. Prokhorov A.V., Ilyin 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. A technique for creating a warehouse distribution network structure for industrial enterprises in metropolitan areas. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 2015, no. 6(233), pp. 183–195. DOI: 10.5862/JE.233.19 (rus)
12. Radaev A.E., Kobzev V.V. Modeli obosnovaniia struktury raspredelitel'noi seti promyshlennykh predpriatii v usloviakh megapolisa. *Ekonomika i promyshlennaya politika: teoriya i instrumentarii*. A.V. Babkin i dr. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2014. S. 436–452. (rus)
13. Silkina G.Iu., Iur'ev V.N. Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie v priniatii innovatsionnykh reshenii. *Izvestiya Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta*. 2014. № 3. S. 43–53. (rus)
14. Suloeva S.B., Sviridenko V.A. Customer-oriented cost management systems in industrial enterprises. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 2013, no. 4(175), pp. 80–83. (rus)
15. Vychislitel'nye vozmozhnosti nadstroiki «Poisk reshenii» programmy «Microsoft Excel». 2015. URL: http://www.planetaexcel.ru/forum/?FID=8&PAGE_NAME=read&TID=14200 (rus)
16. Karta Sankt-Peterburga i Leningradskoi oblasti. Poiskovo-informatsionnaya kartograficheskaya sluzhba OOO «Iandeks». 2016. URL: <https://maps.yandex.ru/2/saint-petersburg/> (rus)
17. Tarify na avtomobil'nye perevozki v Sankt-Peterburge. Kompaniya «Avangard». 2011. URL: <http://www.gruzoperevozki-spb.ru/> (rus)
18. Tarify na avtomobil'nye perevozki v Sankt-Peterburge. Proekt «Dogruzov». 2009. URL: <http://dogruzov.ru/gruzoperevozki-sankt-peterburg/tarify> (rus)
19. Tekhnicheskie kharakteristiki gruzovykh avtomobilei «KAMAZ». 2016. URL: <http://www.kamaz.ru/production/serial/bortovye-avtomobili/> (rus)
20. Tekhnicheskie kharakteristiki gruzovykh avtomobilei «Ford». 2016. URL: http://www.ford.ru/Heavys/Heavys_models (rus)
21. Tekhnicheskie kharakteristiki gruzovykh avtomobilei «Hyundai». 2016. URL: <http://www.hyundai-ct.ru/auto/trucks/> (rus)

РАДАЕВ Антон Евгеньевич — доцент 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
