

ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ТОВАРООБОРОТА ДИСТРИБЬЮТЕРНОЙ КОМПАНИИ

Р. С. ВАЛЕЕВ • А. Р. ЮСУПОВ • Ш. З. КАШАЕВ • А. Ф. ВАЛЕЕВА

Аннотация. Рассматривается задача, связанная с организацией эффективного товарооборота для компании, занимающейся оптовой закупкой товара (мебельной продукции) у фирм-производителей и его реализацией, состоящая из двух подзадач. Одна из них – это управление многономенклатурными запасами товара, хранящегося на складе, с целью повышения прибыли от продаж, другая – доставка товара клиентам (с учетом возврата товара) различными автомобильными транспортными средствами наилучшими маршрутами. Для решения первой подзадачи разработан имитационный алгоритм, позволяющий выявить влияние критических и предкритических уровней запасов товара на прибыль, для второй подзадачи представлена математическая модель и разработан генетический алгоритм для поиска маршрутов доставки товара, приведен практический пример.

Ключевые слова: управление многономенклатурными запасами; поиск наилучших маршрутов; возврат товара; имитационный алгоритм; генетический алгоритм.

ВВЕДЕНИЕ

Целью любой торговой компании, осуществляющей коммерческую деятельность, является стремление надежно закрепиться на рынке, достичь высокой оборачиваемости и прибыли. В связи с этим необходимо проводить анализ рынка, организовать эффективный товарооборот для сохранения клиентуры и получения прибыли, а также обеспечить доставку необходимого товара различным клиентам точно в срок. В настоящее время большое распространение получили фирмы-дистрибьюторы, осуществляющие оптовую закупку товаров у крупных фирм-производителей. Как показал анализ ряда таких фирм, существуют ряд проблем, требующих решения, а именно: отсутствует автоматизация рабочего процесса (учет товаров, выписка товарно-расходных накладных, заполнение базы и ведение / редактирование / заполнение прайс-листов ведется в ручном режиме); возникают проблемы с поставками и поставщиками (несоблюдение сроков отгрузки товаров, отсутствие своего автопарка, недостаточное количество товара в наличии у поставщика); территориальный разброс фирм-производителей; нет автоматизированной системы, которая бы отслеживала траекторию товарооборота в определенный период и определяла бы, сколько и какого товара надо завозить, при каких остаточных количествах товара следует подавать новый заказ производителю, в каком количестве должны быть резервные запасы товаров и т. п. При этом доля оборотных активов представлена именно товарами, которых не должно быть как в избытке, так и в недостаточном количестве. Так, их избыток может привести к замораживанию оборотных средств, увеличению себестоимости товара за счет затрат на хранение, налогов, арендных платежей (склад, офис продаж), что влечет за собой сокращение прибыли. При недостаточном же количестве товара в наличии фирма не сможет удовлетворить потребности своих клиентов и будет терять прибыль из-за сокращения выручки. Если рассматривать долгосрочную перспективу, то компания в скором времени может лишиться своих постоянных клиентов (дилеров), а в дистрибьюторской деятельности уход даже одного клиента – это потеря большой прибыли, поскольку дилеры закупают товары на постоянной основе и в больших объемах. Обычно анализ ситуации с товарооборотом проводится лишь на основе экспертных оценок в лице руководителя фирмы.

В статье предлагается рассмотреть проблему повышения эффективности товарооборота оптово-торговой компании, занимающейся продажей модульной мебели, которую можно использовать как самостоятельные элементы, так и объединить в композицию из нескольких модулей. Основной составляющей издержек являются затраты, связанные с запасами товаров, которые достаточно высоки у оптовых и розничных организаций, их сумма может превышать

50%. Запасы приобретаемой модульной мебели хранятся на складе. При этом может возникнуть ситуация, когда фабрика прекращает производство какой-то серии мебели, и у торговой компании возникает неликвидный запас товара на складе, следовательно, возникают дополнительные затраты, связанные с хранением данного товара. Учитывая перечисленные выше особенности торговой компании, возникает необходимость в решении проблемы управления многономенклатурными запасами мебельной продукции с учетом ее доставки наилучшим маршрутом различным клиентам. При этом у клиентов есть возможность возврата товара.

ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНЫМИ ЗАПАСАМИ МЕБЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

Рассматривается следующая задача управления многономенклатурными запасами с учетом их возврата и доставки клиентам точно в срок (*Multi-item inventory management with product delivery problem, MIM_PDP*): компания, являющаяся дистрибьютором мебельных фабрик, занимается закупкой и оптовой продажей товара (модульной мебели), который хранится на арендованном складе. Ежедневно ведется учет непроданной мебели и фиксируется та часть, которая достигла критического уровня (подается заявка производителю на недостающий вид мебели) и ниже предкритического уровня запасов. Товары, количество которых ниже предкритического уровня, заказываются вместе с товарами, количество которых ниже критического уровня. Срок доставки товара равномерно распределен на некотором интервале времени. Имеется складская программа, в которой указан имеющийся в наличии товар. Спрос на товар может быть случайным (если продается товар, имеющийся на складе, при этом неизвестно, когда и сколько товара будет приобретено клиентами) и детерминированным (если товара нет в наличии, при этом оформляется заказ поставщикам на конкретный вид товара). При поступлении заказов от клиентов, в первую очередь, восполняются отложенные поставки, если таковые имеются. Количество единиц товара для доставки на склады определяется путем анализа продаж за последние D дней. Компания доставляет товар автомобильными транспортными средствами (ТС) различной грузоподъемности. Каждое ТС начинает и заканчивает свой маршрут в депо (депо может быть несколько). ТС может содержать товары для нескольких клиентов. Масса загружаемых товаров не должна превышать грузоподъемности ТС. Клиенты могут вернуть товар (назовем их *клиентами возврата*), количество таких клиентов заранее неизвестно.

Требуется:

- 1) выявить влияние критических и предкритических уровней запасов товара на общие затраты при хранении и заказе товара (*задача управления многономенклатурными запасами мебельной продукции*);
- 2) определить маршруты для доставки товара автомобильными ТС различным клиентам с минимальными транспортными расходами, учитывая возможность возврата товара (*задача поиска наилучших маршрутов с учетом возврата товаров*).

Рассмотрим задачу управления многономенклатурными запасами мебельной продукции. Различные модели задач управления запасами приведены в [1, 2]. В статье предлагается модификация одной из известных имитационных моделей из [1], в которой исследуется влияние критических и предкритических уровней запасов некоторой продукции. Модификация состоит в следующем: учитываются время доставки товара на склад, минимальный и максимальный сроки доставки заказа клиентам; задается спрос на товар, распределенный равномерно на некотором отрезке времени; модифицирована формула для определения размера заказа с учетом количества единиц требуемого вида товара; принимаются во внимание потери от дефицита, которые используются при расчете полных затрат, а также затраты на доставку товара определенного вида. Приведем имитационный алгоритм *IM_MIM_PDP* для выполнения первого требования задачи *MIM_PDP*.

Имитационный алгоритм IM_MIM_PDP

Входные данные:

T – период моделирования (количество дней);

N – количество видов товаров (модульной мебели);

La, Lb – минимально и максимально возможные сроки доставки (дни) заказа;

FOC – затраты на оформление одного набора заказа (у. е.);

(MOP_{ij}, COP_{ij}) – стратегии управления запасами мебельной продукции на складе, где MOP_{ij} – критический уровень i -го товара для стратегии j ; COP_{ij} – предкритический уровень i -го товара для стратегии j , $i = 1, \dots, N$; $j = 1, \dots, F$, F – количество стратегий;

$INV0_i$ – исходное количество запаса i -го товара, $i = 1, \dots, N$;

EDa_i, EDb_i – соответственно минимальный и максимальный спрос на i -й вид товара в течение дня в рассматриваемый период T , $i = 1, \dots, N$;

VOC_i – затраты на доставку единицы i -го товара, $i = 1, \dots, N$;

CC_i – ежедневные затраты на хранение единицы i -го товара, $i = 1, \dots, N$;

$TDCI_i$ – потери от дефицита для единицы i -го товара ($i = 1, \dots, N$);

p – количество видов товара в одном заказе;

D – количество дней для доставки товара на склад.

Случайные переменные:

D_{it} – равномерно распределенная переменная на отрезке $[EDa_i, EDb_i]$, задающая спрос на i -й товар в t -й день ($i = 1, \dots, N$; $t = 1, \dots, T$);

EL – время доставки (в днях) заказа, равномерно распределено на отрезке $[La, Lb]$.

Переменные состояния:

INV_{it} – количество запаса i -го товара в конце t -го дня, $i = 1, \dots, N$; $t = 1, \dots, T$;

LT_i – день прибытия заказа на i -й товар, $i = 1, \dots, N$;

$TNJO$ – общее число наборов заказов в течение времени T ;

EOQ_i – объем заказа i -го товара;

SUM_EOQ_i – количество доставленного i -го товара за все время T , $i = 1, \dots, N$ (для расчета затрат на доставку).

Переменные состояния:

INV_{it} – уровень запаса i -го товара в конце t -го дня, $i = 1, \dots, N$, $t = 1, \dots, T$;

SUM_EOQ_i – общее количество i -го товара, доставленного в течение времени T , $i = 1, \dots, N$ (для расчета затрат на доставку в конце);

$TNJO$ – общее число наборов заказов в течение времени T ;

$EOQF_i$ – индикатор, показывающий, отправлен ли заказ производителю на пополнение i -го товара (если $EOQF_i = 0$, то заявки на товар не было, иначе $EOQF_i = 1$).

События: возникновение спроса на товар; оценка запасов (и возможный заказ товаров); пополнение запасов.

Формулы для вычисления затрат:

$TCC = TCC + INV_{it} \times CC_i$ – затраты на хранение товара;

$TOC = TNJO \times FOC + (SUM_EOQ_i \times VOC_i)$ – затраты на доставку за весь период моделирования T ;

$TDC = TDC + (TDCI_i \times (INV_{it-1}/2) \times (-1))$ – потери при дефиците i -го товара;

$TCOST = TCC + TOC + TDC$ – общие затраты;

Формула расчета объема заказа для i -го товара:

$$EOQ_i = \sqrt{\frac{2 \cdot ((EDa_i + EDb_i) / 2) \cdot D \cdot VOC_i + FOC / p}{CC_i}}. \quad (1)$$

Выходные данные:

$ТОС$ – затраты на организацию поставки;

$ТСС$ – затраты на хранение запасов товаров;

$ТДС$ – потери от дефицита запасов;

$ТСОСТ$ – полные затраты;

$(MOP_{ij}, COP_{ij})^*$ – стратегия с меньшими средними общими затратами за период моделирования T .

Алгоритм реализации задачи MIM_PDP

Шаг 1. Ввод данных для модели и товаров: $T; N; La, Lb; FOC; F; INV0i; EDa_i; EDb_i; VOC_i; CCI; TDCI; MOP_{ij}; COP_{ij}; p; D$

Шаг 2. Цикл $f = 1, \dots, F$

2.1. Цикл $t = 1, \dots, T$

2.1.1. Цикл от $i = 1$ до N

Генерация спроса $D_{it} = EDa_i + (EDb_i - EDa_i) \text{rand}(0.1)$

Если $EOQF_i = 1$ и $t = LT_i$ {заявка на пополнение запаса}

то $SUM_EOQ_i = SUM_EOQ_i + EOQ_i$

Если $INV_{it-1} < 0$ {отсутствие запасов}

то $TDC = TDC + (TDCI_i \times (INV_{it-1}/2) \times (-1))$

$INV_{it} = (INV_{it-1}/2) - D_{it} + EOQ_i$

{отложенная поставка, и в этом случае компания не несет потери из-за дефицита}

иначе $INV_{it} = INV_{it-1} - D_{it} + EOQ_i$ {уровень запаса текущего дня}

Если $t = 1$ {если это первый день периода моделирования}

то $INV_{it} = INV0_i$ {начальный уровень запаса i -го товара}

иначе $INV_{it} = INV_{it-1} - D_{it}$ {уровень запаса текущего дня}

Цикл от $i = 1$ до N

Если $EOQF_i = 0$ {на i -й товар не отправлена заявка}

то

Если $INV_{it} - MOP_{ij} \leq 0$

{уровень запаса товара достиг критического уровня}

то $TNJO = TNJO + 1$

$EL = La + (Lb - La) \times \text{rand}(0.1)$

Цикл от $i = 1$ до N

{определяем количество видов товаров в одном наборе заказа}

Если $EOQF_i = 0$

{если на i -й товар не отправлена заявка}

то

Если $INV_{it} - COP_{ij} \leq 0$

{если запас товара меньше предкритического уровня}

то $p = p + 1$

{увеличиваем количество видов товара в одном заказе}

Цикл от $i = 1$ до N

Если $EOQF_i = 0$ {на i -й товар не отправлена заявка}

то

Если $INV_{it} - COP_{ij} \leq 0$

{если запас товара меньше предкритического уровня}

то Подсчет размера заказа по (1)

$LT_i = t + EL$ {подсчет дня прихода партии i -го товара}

Если $EOQF_i = 1$ {заказ на i -й товар отправлен}

то $EL = 0$

$p = 0$

Цикл от $i = 1$ до N {подсчет затрат хранения i -го товара за день}
 Если $INV_{it} > 0$
 то $TCC = TCC + INV_{it} \times CC_i$

Шаг 3. Цикл от $i = 1$ до N

$$TOC = TNJO \times FOC + (SUM_{EOQ_i} \times VOC_i)$$

Шаг 4. $TCOST = TOC + TCC + TDC$

Шаг 5. Выбор наилучшей стратегии $(MOP_{ij}, COP_{ij})^*$ с наименьшими затратами.

Имитационный алгоритм IM_MIM_PDP для решения задачи MIM_PDP был реализован на языке программирования C# в среде Microsoft Visual Studio 2019 на вычислительной машине Intel Core i5 с частотой 2,6 GHz с оперативной памятью 4 Гб на платформе 64-разрядной операционной системы Windows 8.1. Программная реализация алгоритма IM_MIM_PDP проходила апробацию на базе уфимской компании, являющейся дистрибьютором нескольких мебельных фабрик с разных уголков страны в Республике Башкортостан в течение более семи лет и одной из ведущих компаний по оптовой продаже мебели в Уфе. Приведем один из примеров, в котором компания предоставила данные о четырех видах товара за три месяца (май – июль 2021 г.): спросе, продажах с затратами, рис. 1, а. На рис. 1, б приведено окно программной реализации с выбранными шестью стратегиями (MOP_{ij}, COP_{ij}) , $i = 1, \dots, N$; $j = 1, \dots, F$, а также с возможностью введения критического и предкритического уровней для каждого из видов товаров.

а

Название товара	Начальный уровень запаса	Минимальный спрос за день	Максимальный спрос за день	Ежедневные затраты на хранение единицы	Затраты на доставку единицы	Потери от дефицита единицы
Авалия КР-160	10	0	2	2	271	500
Авалия КР-140	4	0	2	2	244	400
Триба пр...	5	0	3	1	53	150
Кот 900	4	0	2	2	219	287

б

Название товара	Стратегия 1	Стратегия 2	Стратегия 3	Стратегия 4	Стратегия 5	Стратегия 6
Авалия К...	(0,0)	(0,5)	(5,5)	(5,10)	(10,10)	(10,12)
Авалия К...	(0,0)	(0,5)	(5,5)	(5,10)	(10,10)	(10,12)
Триба пр...	(0,0)	(0,8)	(8,8)	(8,16)	(16,16)	(16,18)
Кот 900	(0,0)	(0,5)	(5,5)	(5,10)	(10,10)	(10,12)

Рис. 1 Ввод данных о товарах и стратегий (MOP_{ij}, COP_{ij}) , $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, F$.

Стратегии выбирались следующим образом: для стратегии 1 критический и предкритический уровни приравнивались к нулю, для стратегий 2 – 6 критический уровень определялся путем умножения среднего спроса на товар на средний срок доставки этого товара. Для мебельной продукции вида 1, 2, 4 (рис. 1, б) в стратегиях 3, 4 критический уровень равен 5, а для мебельной продукции 3 критический уровень равен 8. Стратегии 4, 5, 6 были получены из стратегии 3 путем увеличения критического и предкритического уровней. На рис. 2 приведены результаты численных экспериментов – средние затраты для каждой из выбранных стратегий (было выполнено 100 реплик). Наилучшей из представленных стратегий является стратегия 2, полные затраты при которой составляют 88 868 руб. Следовательно, при предоставленных компанией данных, ей эффективно применять стратегию 2 с нулевым критическим уровнем и с предкритическим уровнем, равным 5. Результаты экспериментов на данных, предоставленных дистрибьютерной компанией, занимающейся закупкой модульной мебели, показывают, что потери от дефицита товара меньше, чем затраты от хранения товара. Экспертом при проведении численного эксперимента являлся руководитель компании. После проведенных экспериментов были даны следующие рекомендации: вести анализ потерь от дефицита товаров,

поскольку это поможет повысить эффективность товарооборота; обратить внимание на выбор стратегий; вести учет затрат для каждого вида товара, а не только общие затраты.

	№ Стратегии	Затраты на пополнение запаса	затраты на хранение запаса	потери от дефицита	Полные затраты
▶	Стратегия 1	72517	4447	13786	90751
	Стратегия 2	73159	4922	10786	88868
	Стратегия 3	86089	6722	2480	95293
	Стратегия 4	83805	7517	1653	92976
	Стратегия 5	86814	9731	805	97351
*	Стратегия 6	86346	9913	714	96974

Рассчитать модель

Рис. 2 Расчет затрат для каждой стратегии (MOP_{ij}, COP_{ij}), $i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, F$.

ЗАДАЧА ПОИСКА НАИЛУЧШИХ МАРШРУТОВ С УЧЕТОМ ВОЗВРАТА ТОВАРОВ

При поиске наилучшего маршрута в задаче MIM_PDP (требование 2) используются следующие известные ограничения: грузоподъемность ТС (задача $CVRP$, *Capacitated Vehicle Routing Problem*); несколько депо с парком ТС (задача $MDVRP$, *Multi Depot Vehicle Routing Problem*); возврат товаров (задача $VRPPD$, *Vehicle Routing Problem with Pick-up and Delivery*) [3, 4, 5]. На рис. 3 а, б приведены примеры маршрутов для двух депо А и В, клиенты обозначены цифрами 1, 2, ..., 10 с требуемым количеством товаров (например, 15 шт. для клиента 2 и т. д.).

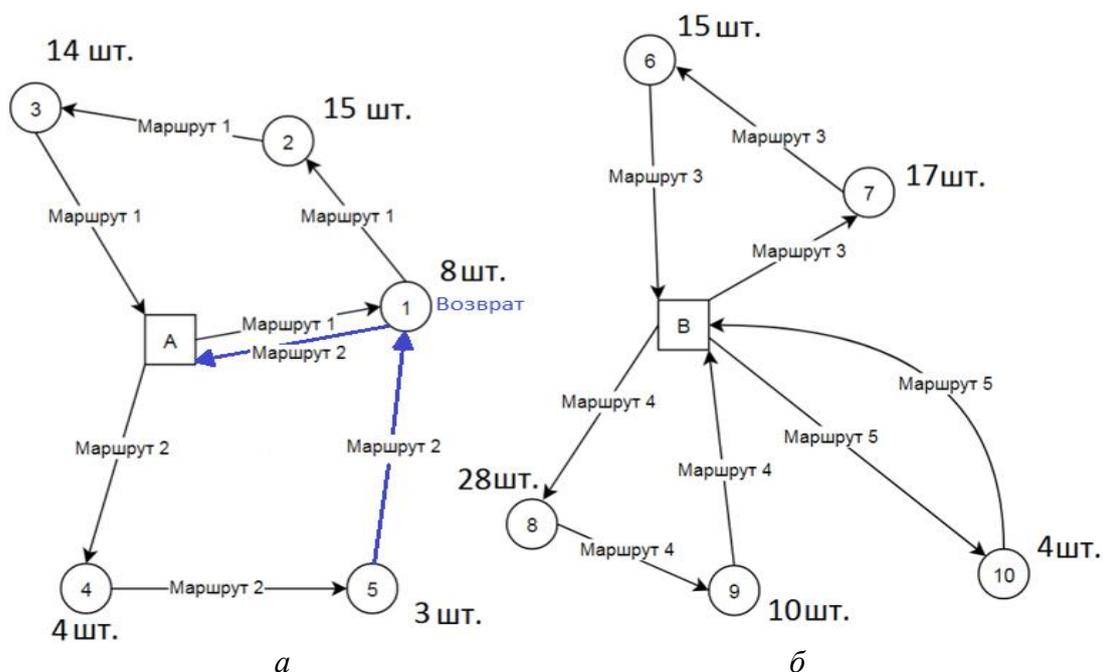


Рис. 3 Примеры маршрутов с двумя депо А и В для задачи MIM_PDP :
 а – клиент возврата 1, маршрут 1: А – 1 – 2 – 3 – А; маршрут 2: А – 4 – 5 – 1 – А;
 б – маршрут 3: В – 7 – 6 – В, маршрут 4: В – 8 – 9 – В, маршрут 5: В – 10 – В.

Математическая модель MIM_PDP (второе требование)

Дано: $G = (V, E)$ – взвешенный граф со множеством вершин V и множеством ребер E ; V – множество вершин, которое делится на два подмножества: $V_c = \{1, \dots, n\}$ – множество клиентов, $V_h = \{n+1, \dots, n+k\}$ – множество депо; $V_{Backhauls} = \{1, \dots, g\}$ – множество клиентов возврата; d_{ij} – расстояние между клиентами i и j ; $park_u = \{1, \dots, h\}$ – доступные виды ТС в депо $u \in V_h$; Q_t – грузоподъемность ТС t , $t \in park_u$, $u \in V_h$; F_t – расход топлива для ТС t , $t \in park_u$, $u \in V_h$; c_t – стоимость топлива для ТС t , $t \in park_u$, $u \in V_h$; p_t – стоимость проезда ТС t по платным дорогам, $t \in park_u$, $u \in V_h$; q_i – количество товара для клиента i , $i \in V_c$; q_j^{back} – количество товара, которое клиент j возвращает, $j \in V_{Backhauls}$.

Переменные: x_{ij}^v – переменная логического типа, принимающая значение 1, если ТС v перемещается из депо $u \in V_h$ в направлении от клиента i к клиенту j , и 0 в противном случае, $v \in car_u = \{o_1, \dots, o_{m_u}\}$, car_u – задействованные ТС в депо $u \in V_h$, m_u – количество ТС в депо $u \in V_h$ (car_u, m_u вычисляются в результате распределения клиентов по ТС, количество ТС зависит от спроса клиентов и грузоподъемности ТС); s_{ij}^v – переменная логического типа, принимающая значение 1, если ТС v перемещается при возврате товара от клиента i к клиенту j , и 0 в противном случае, $i, j \in V_{Backhauls}$, $v \in car_u$; y_{iv} – количество товара, доставляемого ТС v , $i \in V_c$, но $i \notin V_{Backhauls}$, $v \in car_u$; y_{iv}^{back} – количество товара, возвращаемого ТС v от клиента i , где $i \in V_{Backhauls}$, $v \in car_u$.

Требуется минимизировать общие транспортные расходы:

$$\min \sum_{v=1}^{m_u} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_{ij}^v \cdot petrol_{ij}^v + p_v) + \min \sum_{v=1}^{m_u} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (s_{ij}^v \cdot petrol_{ij}^v + p_v), \quad (2)$$

где $u = n+1, \dots, n+k$; $petrol_{ij}^v = (d_{ij} \cdot F_v \cdot c_v)/100$ – затраты на топливо ТС v от клиента i к клиенту j , $v \in car_u$;

при следующих ограничениях:

- каждый клиент посещается только один раз при доставке:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^{m_u} x_{ij}^v = 1, j = 1, \dots, n; u = n+1, \dots, n+k; \quad (3)$$

- каждый клиент возврата посещается только один раз:

$$\sum_{i=1}^g \sum_{v=1}^{m_u} s_{ij}^v = 1, j = 1, \dots, g; u = n+1, \dots, n+k; \quad (4)$$

- количество прибытий к клиенту i и равно количеству выездов к клиенту j :

$$\sum_{i=1}^n x_{iz}^v - \sum_{j=1}^n x_{jz}^v = 0, \sum_{i=1}^g s_{ib}^v - \sum_{j=1}^g s_{bj}^v = 0, z = 1, \dots, n; v = 1, \dots, m_u; b = 1, \dots, g; \quad (5)$$

- товар доставляется ТС v клиенту i и клиенту $j \in V_{Backhauls}$:

$$y_{iv} \leq q_i \sum_{j=1}^n x_{ij}^v, y_{jv}^{back} \leq \sum_{b=1}^g s_{bj}^v, i = 1, \dots, n; v = 1, \dots, m_u; u = n+1, \dots, n+k; \quad (6)$$

- спрос каждого клиента должен быть полностью удовлетворен:

$$\sum_{v=1}^{m_u} y_{iv} = q_i, \sum_{v=1}^{m_u} y_{jv}^{back} = q_j^{back}, i = 1, \dots, n; u = n+1, \dots, n+k, j = 1, \dots, g; \quad (7)$$

- количество товара в ТС v не должно превышать его грузоподъемность:

$$Q_v \geq \sum_{i=1}^n y_{iv}, Q_v \geq \sum_{i=1}^g y_{iv}^{back}, v = 1, \dots, m_u; u = n + 1, \dots, n + k. \quad (8)$$

Для решения задачи (2) – (8) разработан алгоритм *GA_MIM_PDP* на базе генетического алгоритма [3, 4].

Алгоритм *GA_MIM_PDP*

Шаг 1. *Распределение_клиентов_по_депо* (вход: d_{ij}, V_c, V_h ; выход: $K_1, \dots, K_u, u \in V_h$ – кластеры клиентов для каждого депо u)

Повторять для каждого клиента $i \in V_c$

Повторять для каждого депо $u \in V_h$

Выбрать ближайшее депо u для клиента i

Добавить клиента i в кластер K_i для депо u

Конец

Конец

Шаг 2. *Распределение_клиентов_по ТС* (вход: $K_1, \dots, K_u, u \in V_h$; выход: распределение клиентов по ТС $v, v \in car_u$)

Повторять для каждого кластера K_i и депо $u \in V_h$

Вычислить полярные координаты клиентов (θ_i, ρ_i) , θ_i – полярный угол, ρ_i – радиальная координата

Сформировать список L клиентов в порядке увеличения θ_i

$sum = 0$

Выбрать ТС t с наибольшей грузоподъемностью $Q_t, t \in park_u$ из депо $u \in V_h$

Повторять для каждого клиента $i \in L$

Если $sum + q_i > Q_t$, *то*

добавить в маршрут ТС t клиента $i \in V_c$

добавить ТС t в car_u

$sum = 0$

иначе

добавить в маршрут ТС t текущего клиента с учетом условий (6) и (7)

$sum = sum + q_i$

Выбрать ТС t с наибольшей грузоподъемностью $Q_t, t \in park_u$ из депо $u \in V_h$

Конец

Повторять для каждого ТС v из car_u

Если в $park_u$ есть такое ТС t , что $c_t < c_v$ с учетом (8), *то*

Передать ТС t в маршрут и добавить его в car_u

Удалить ТС v из car_u

Конец

Конец

Шаг 3. *Поиск_рациональных_маршрутов_доставки* (вход: список ТС $v, v \in car_u, iter$ – количество итераций, $rate$ – вероятность мутации, $elitesize$ – количество лучших решений, $size$ – размер популяции, d_{ij} ; выход: *Solutions* – список рациональных маршрутов доставки товара для ТС v)

Повторять для каждого депо $u \in V_h$

Повторять для каждого ТС v из депо $u \in V_h$

Создать начальную популяцию (список) маршрутов размера $size$ с учетом (3) – (8)

Цикл от 1 до $iter$ *выполнить*

Вычислить функцию пригодности f_k для маршрута $k = 1, \dots, N$; N – количество маршрутов в популяции: $f_k = 1 / \text{стоимость_маршрута_}k$

Если маршрут доставки, то

$\text{стоимость_маршрута_при_доставке} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_{ij}^v \cdot \text{petrol}_{ij}^v + p_v)$

Если маршрут возврата, то

$\text{стоимость_маршрута_при_возврате} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (s_{ij}^v \cdot \text{petrol}_{ij}^v + p_v)$

Добавить в новую популяцию маршруты с наибольшими значениями функции пригодности из текущей популяции в количестве elitesize .

Цикл от 1 до $(\text{size} - \text{elitesize})$

Выбрать из популяции маршрут 1 и маршрут 2 (оператор селекции)

Если случайное число (от 0 до 1) < 0.5 , то

Получить маршрут 3 = кроссинговер 1 (маршрут 1, маршрут 2)

иначе

Получить маршрут 3 = кроссинговер 2 (маршрут 1, маршрут 2).

Если случайное число (от 0 до 1) $< \text{rate}$, то

Получить маршрут 3 = Мутация (маршрут 3).

Добавить маршрут 3 в новую популяцию

Конец цикла

Конец цикла

Конец

Добавить лучший маршрут для ТС v в Solutions

Конец

Шаг 4. *Распределение_клиентов_возврата_по_ТС* (вход: маршруты доставки с ТС v , $v \in \text{car}_u$, депо $u \in V_h$, клиенты возврата, d_{ij} ; выход: список ТС v с начальными маршрутами возврата)

Повторять для каждого депо $u \in V_h$

Сортировка клиентов возврата по убыванию количества возвращаемого ими товара

Добавить первого клиента возврата и ближайшее к нему ТС v с учетом (8)

в маршрут возврата

Повторять до тех пор, пока есть клиенты возврата

Добавить в маршрут возврата ТС v с учетом (7)

Конец

Добавить в начало и конец маршрута возврата для ТС v последнего клиента

доставки и депо $u \in V_h$ соответственно

Конец

Шаг 5. *Поиск_рациональных_маршрутов_возврата* (вход: маршруты доставки и начальные маршруты возврата с ТС v , клиенты возврата, депо $u \in V_h$, rate , elitesize , size , d_{ij} ; выход: список рациональных маршрутов возврата с ТС v)

Вызов процедуры шага 3.

Шаг 6. *Объединение_маршрутов_доставки_и_возврата* (вход: маршруты доставки и начальные маршруты возврата с ТС v , депо $u \in V_h$; выход: рациональные объединенные маршруты доставки и возврата)

Повторять для каждого депо $u \in V_h$

Повторять для каждого ТС v из депо $u \in V_h$

Если ТС v имеет маршрут доставки и маршрут возврата, то объединить оба маршрута

Конец

Конец

Рассмотрим пример работы алгоритма GA_MIM_PDP . Пусть имеются 12 клиентов и три депо: А, В, С. На основании шага 1 получено следующее распределение клиентов по депо: для

депо А ближайшие клиенты 1 – 4, для депо С – клиенты 5 – 8, для депо В – клиенты 9 – 12. На рис. 4 приведено распределение клиентов 5, 6, 7, 8 по кластерам (кластеры выделены пунктирной линией, шаг 2). В депо С имеются ТС 1 ($Q_1 = 40, F_1 = 32$) и ТС 2 ($Q_2 = 36, F_2 = 30$). При этом для доставки товара выбрано ТС 2 по маршрутам С – 6 – 5 – С, С – 7 – 8 – С с меньшим расходом топлива.

На шаге 3 осуществляется поиск рациональных маршрутов доставки товара клиентам по генетическому алгоритму, в котором используются оператор селекции для выбора маршрутов из популяции, два вида оператора кроссинговера и оператор мутации для получения нового маршрута. Оператор селекции осуществляет выбор маршрута $k = 1, \dots, N$ из популяции с вероятностью $p_k = \frac{f_k}{\sum_{i=1}^N f_i}$, где f_i – значение функции пригодности для i -го маршрута; N – число маршрутов в популяции. Для получения нового маршрута используется двухточечный оператор кроссинговер двух видов (рис. 5); оператор мутации меняет случайным образом двух клиентов в маршруте.

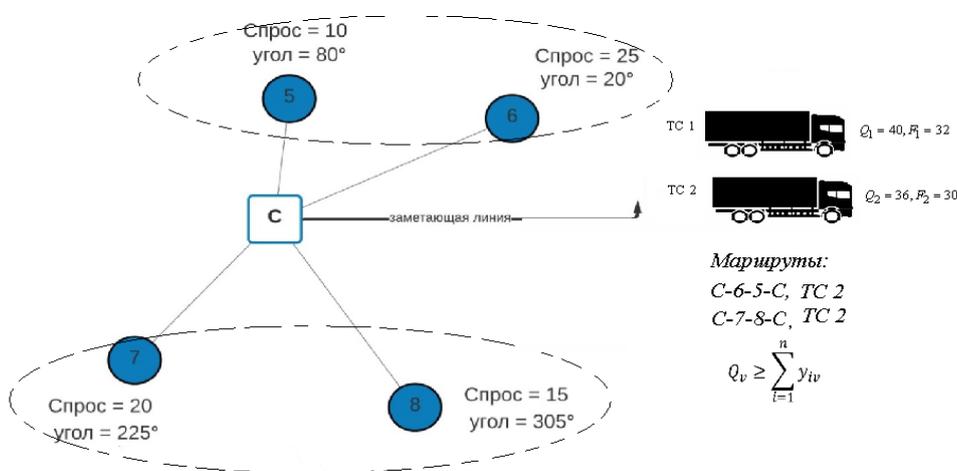


Рис. 4 Пример распределения клиентов по ТС с маршрутами С – 6 – 5 – С (ТС 2), С – 7 – 8 – С (ТС2)

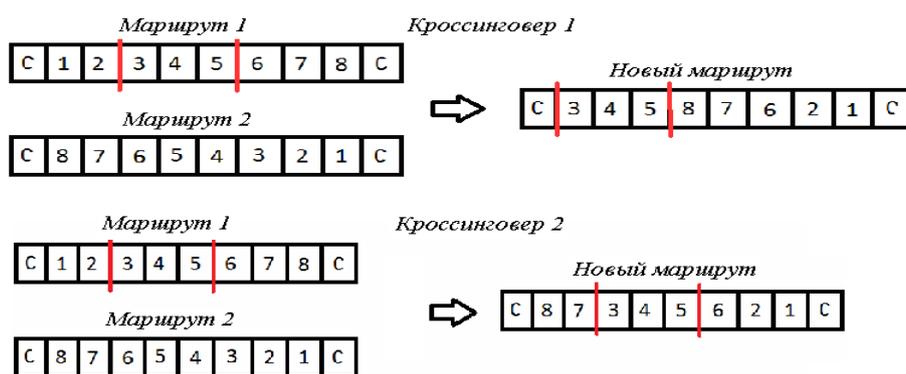


Рис. 5 Операторы кроссинговер 1 и кроссинговер 2 в генетическом алгоритме (шаг 3).

На рис. 6 представлен пример формирования маршрута возврата и объединенного маршрута: на рис. 6, а приведены два маршрута доставки С – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9 – С, С – 1 – 2 – 3 – С, причем клиенты 4, 5, 6 возвращают товар. Для клиента возврата 5 ближайший клиент доставки 3, добавляем его в начало маршрута доставки, в конец маршрута добавляется депо С, тогда начальный маршрут возврата 3 – 5 – 4 – 6 – С (рис. 6, б), шаг 4). Применив генетический алгоритм (шаг 5), найдем лучший маршрут возврата 3 – 5 – 6 – 4 – С и объединенный маршрут С – 1 – 2 – 3 – 5 – 6 – 4 – С (шаг 6).

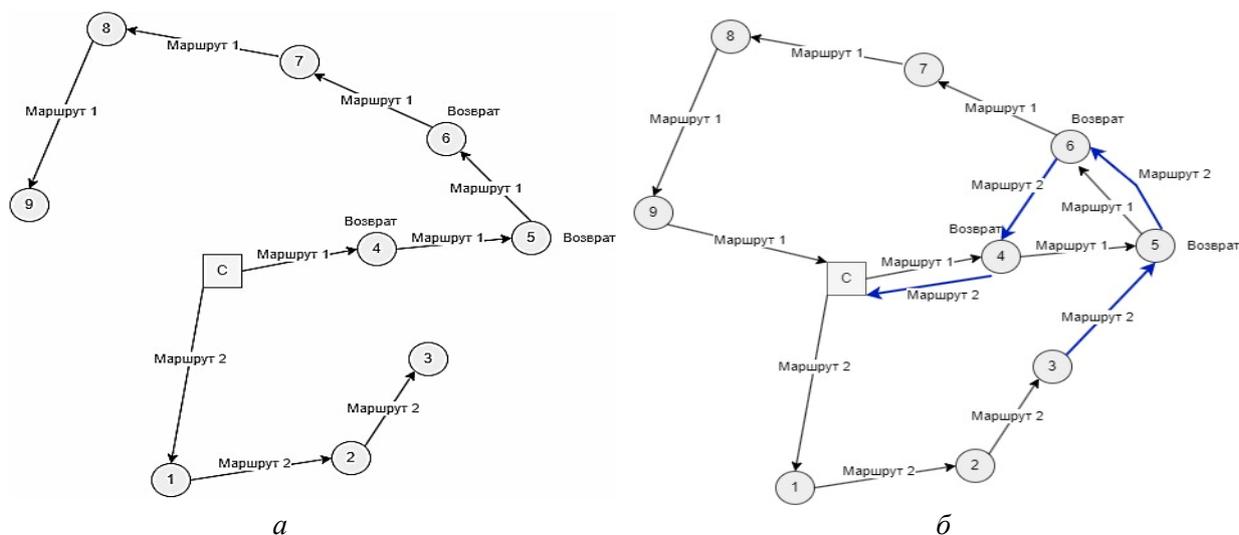


Рис. 6 Пример маршрутов:

а – маршруты доставки: $C - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - C$, $C - 1 - 2 - 3 - C$, клиенты возврата: 4, 5, 6;
б – маршрут возврата: $3 - 5 - 6 - 4 - C$, объединенный маршрут $C - 1 - 2 - 3 - 5 - 6 - 4 - C$.

Алгоритм *GA_MIM_PDP* для поиска рациональных маршрутов доставки товара был реализован на языке JavaScript в редакторе кода Visual Studio Code на вычислительной машине AMD Ryzen 5 4600h с частотой 3 – 4 GHz, с оперативной памятью 8 Гб на платформе 64-разрядной операционной системы Windows 10. Для определения расстояний между клиентами и визуализации маршрутов используется библиотека Yandex Maps.

Для поиска рациональных маршрутов для доставки мебельной продукции в задаче *MIM_PDP* проводились численные эксперименты на данных компании с различными модификациями алгоритма *GA_MIM_PDP*, а именно: *GA_MIM_PDP_M* (с оператором мутации), *GA_MIM_PDP_MS* (с операторами мутации, кроссинговером 1 и кроссинговером 2). При этом параметрами экспериментов были количество итераций, размер популяции. Лучший результат показал алгоритм *GA_MIM_PDP_MS*, который далее применялся для поиска маршрутов для доставки мебельной продукции компании различным клиентам.

Приведем результат одного из проведенных экспериментов с помощью разработанного программного обеспечения на следующих наборах данных: имеются два депо в г. Уфе (с автомобильными ТС с грузоподъемностями (у. е.) 60, 4, 6, 17, 14, 65 и расходами топлива (л на 100 км) 30, 7, 8, 11, 10, 32) и в г. Брянске (с автомобильными ТС с грузоподъемностями 60, 6, 14, 65 и расходами топлива 30, 8, 10, 32).

Необходимо доставить наилучшими маршрутами мебельную продукцию клиентам в: Пермь (полка Мирра – 4 шт.), Челябинск (стол Флора – 1 шт.), Казань (стол Норд – 1 шт.), Тверь (стол Норд – 3 шт.), Смоленск (кухня Бруклин – 1 шт.), Екатеринбург (стол Флора – 2 шт.), Тюмень (стол Норд – 1 шт.), Москву (полка Мирра – 4 шт.), Чишмы (гостиная Норд – 1 шт.), Буздяк (стол Флора – 1 шт.), Набережные Челны (гостиная Айден – 1 шт.), Ульяновск (стол Флора – 1 шт.), Тольятти (стол Норд – 3 шт.), Оренбург (стол Норд – 1 шт.), Белебей (стол Норд – 1 шт.), Стерлитамак (полка Мирра – 4 шт.), Магнитогорск (стол Норд – 2 шт.), Калугу (стол Флора – 1 шт., полка Мирра – 2 шт.), Тулу (полка Мирра – 4 шт.), Балашиху (полка Мирра – 8 шт.), Можайск (стол Норд – 2 шт., полка Мирра – 1 шт.), Агидель (Стол Флора – 1 шт.); занимаемый объем 1 шт. мебельной продукции в кузове: полка Мирра – 1 у. е., стол Норд – 3 у. е., стол Флора – 5 у. е., гостиная Айден – 6 у. е., гостиная Норд – 8 у. е., кухня Бруклин – 10 у. е.; клиенты возврата находятся в городах: Смоленск, Тверь, Казань, Магнитогорск, Ульяновск. Получены следующие маршруты из депо в Уфе: использовалось ТС с гру-

зоподъемностью 60 у. е. с расходом топлива 30 л., Уфа – Магнитогорск – Оренбург – Sterлитамак – Белебей – Ульяновск – Казань – Уфа, клиенты возврата в Ульяновске и Казани, пройденное расстояние 2413.309 км, стоимость маршрута 46673.78 руб.; использовалось ТС с грузоподъемностью 65 у. е. с расходом топлива 32 л., Уфа – Пермь – Екатеринбург – Челябинск – Тольятти – Ульяновск – Казань – Набережные Челны – Буздяк – Агидель – Тюмень – Чишмы – Магнитогорск – Уфа, клиенты возврата в Ульяновске и Казани, пройденное расстояние 2413.309 км, стоимость маршрута 46673.78 руб. (рис. 7, а). Маршрут из депо в Брянске: использовалось ТС с грузоподъемностью 60 с расходом топлива 30, Брянск – Калуга – Тула – Балашиха – Москва – Тверь – Можайск – Смоленск – Тверь – Брянск (рис. 7, б), клиенты возврата в Смоленске, Твери; платный участок дороги Москва – Тверь с ценой проезда 1000 руб., пройденное расстояние 2158.893 км со стоимостью маршрута 48712.23 руб., общая стоимость пути 239881.89 руб.

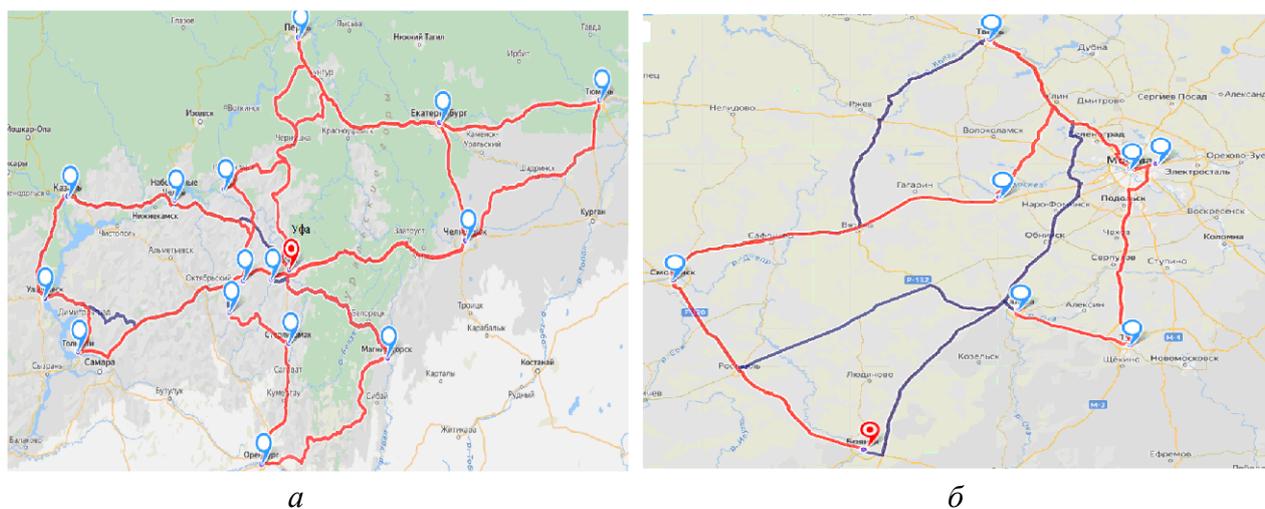


Рис. 7 Маршруты:

а – депо Уфа, Уфа – Пермь – Екатеринбург – Челябинск – Тольятти – Ульяновск – Казань – Набережные Челны – Буздяк – Агидель – Тюмень – Чишмы – Магнитогорск – Уфа; Уфа – Пермь – Екатеринбург – Челябинск – Тольятти – Ульяновск – Казань – Набережные Челны – Буздяк – Агидель – Тюмень – Чишмы – Магнитогорск – Уфа; *б* – депо Брянск, Брянск – Калуга – Тула – Балашиха – Москва – Тверь – Можайск – Смоленск – Тверь – Брянск.

Как показали результаты численных экспериментов на данных компании, применение эффективного метаэвристического алгоритма для поиска наилучших маршрутов для доставки заказов мебельной продукции клиентам с возможностью возврата товара позволило сократить транспортные расходы компании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена задача, возникшая в дистрибьютерной компании, занимающейся оптовой закупкой товара (мебельной продукцией) у фирмы-производителя. Поставлена и решена задача управления многономенклатурными запасами товара, позволившая выявить влияние критических и предкритических уровней запаса товара на общие затраты и повысить эффективность товарооборота, что подтверждено результатами численного эксперимента, данные для которого были предоставлены экспертом. При этом была сформулирована и решена задача доставки товара различным клиентам с учетом его возврата, если какой-то вид товара не устроил заказчика. Поскольку задача поиска наилучшего маршрута является NP-трудной задачей комбинаторной оптимизации, для ее решения применялась метаэвристика, а именно – генетический алгоритм. Численные эксперименты, проведенные на данных компании, занимающейся оптовой продажей мебельной продукцией в г. Уфе, подтвердили

эффективность разработанного программного обеспечения для поиска наилучших маршрутов для доставки товара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Нейлор Т. Имитационные эксперименты с моделями экономических систем. М.: Мир, 1975. 490 с. [[Naylor T. Simulation Experiments with Models of Economic Systems. Moscow: Mir, 1975. (In Russian).]]
2. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. Издательская группа ВНХ, 2004. 847 с. [[Kelton V., Lowe A. Simulation Modeling. CS Classics. VNH Publishing Group, 2004. (In Russian).]]
3. Toth P., Vigo D. Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications. SIAM, 2015.
4. Voss S., Woodruff David L., and Mannino C. Optimizing Transport Logistics Processes with Multi-Modal Transport Networks. Springer. 2016.
5. Валеева А. Ф., Гончарова Ю. А., Валеев Р. С. Задачи маршрутизации при транспортировке: обзор моделей, методов и алгоритмов // Логистика и управление цепями поставок. 2019. № 4 (93). Ч. 1. С. 74–89. [[Valeeva A. F., Goncharova Y. A., Valeev R. S. // Logistics and Supply Chain Management. 2019. No. 4 (93), part 1, pp. 74-89. (In Russian).]]

Поступила в редакцию 16 сентября 2024 г.

МЕТАДАННЫЕ / METADATA

Title: On the problem of the effective trade turnover supporting of a distribution company.

Abstract: We consider a problem related to the organization of the effective trade turnover for a company engaged in the wholesale purchase of goods (furniture products) from manufacturing companies and their sale which consists of two subtasks. One of them is the management of multi-item inventories of goods stored in a warehouse in order to increase sales profits, the other is the delivery of goods to customers (taking into account the return of goods) by various transport vehicles (TV) along the best routes. To solve the first subtask the simulation algorithm has been developed to identify the impact of the critical and pre-critical levels of product inventories on profit; for the second subtask, the mathematical model has been presented and the genetic algorithm has been developed to search routes for the delivery of goods, and the practical example is presented.

Key words: the management of multi-product inventories; the search for the best routes; the return of goods; the simulation algorithm; the genetic algorithm.

Об авторах / About the authors:

ВАЛЕЕВ Руслан Сагитович

ООО «Вентра Ай-Ти»,
Уфимский университет науки и технологий, Россия.
Ведущий специалист. Доц. каф. вычислительной математики и кибернетики. Дипл. математик-программист (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2008). Канд. техн. наук по сист. анализу, управлению и обработке информации (Там же, 2011). Иссл. в обл. задач комбинаторной оптимизации.
E-mail: ruslan__valeev@inbox.ru
URL: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=603381

ЮСУПОВ Айдар Рашитович

ООО «Интерьер центр Урал», Россия.
Инженер-программист. Магистр по мат. обеспечению и администрированию информ. систем. (Уфимск. гос. нефтяной техн. ун-т, 2024).
E-mail: yusupov@inbox.ru

КАШАЕВ Шамиль Зульфатович

ООО «ОЗНА-Диджитал Солюшн», Россия.
Инженер-программист. Магистр по мат. обеспечению и администрированию информ. систем (Уфимск. ун-т науки и технологий, 2023).
E-mail: kashaev.schamil@yandex.ru

ВАЛЕЕВА Аида Фаритовна

Уфимский университет науки и технологий, Россия.
Проф. каф. вычислительной математики и кибернетики. Дипл. математик (Башк. гос. ин-т, 1982). Д-р техн. наук по мат. моделированию, числ. методам и комплексам программ (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2006). Иссл. в обл. задач комбинаторной оптимизации, имитационного моделирования.
E-mail: aida_val2004@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3687-4925>
URL: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=15767

VALEEV Ruslan Sagitovich

LLC «Ventra IT»,
Ufa University of Science and Technology, Russia,
Leading specialist. Assoc. prof. of the Dept of Computational Mathematics and Cybernetics. Certified mathematician-programmer (Ufa State Aviation Technical University, 2008). Candidate of Technical Sciences (ibid., 2011). Research in the field of combinatorial optimization problems.
E-mail: ruslan__valeev@inbox.ru
URL: elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=603381

YUSUPOV Aidar Rashitovich

LLC "Interior Center Ural", Russia.
Software engineer. Master in mathematical support and administration of information systems (Ufa State Oil Technological University, 2024).
E-mail: yusupov.aydar2000@mail.ru

KASHAEV Shamil Zulfatovich

LLC "OZNA-Digital Solution", Russia.
Software engineer. Master in mathematical support and administration of information systems (Ufa University of Science and Technology, 2023).
E-mail: kashaev.schamil@yandex.ru

VALEEVA Aida Faritovna

Ufa University of Science and Technology, Russia.
Prof., Dept of Computational Mathematics and Cybernetics. Dipl. in mathematics (Bashkir State Institute, 1982). Dr. of Tech. Sci. in mathematical modeling, numerical methods and software complexes (Ufa State Aviation Technical University, 2006). Research in the field of combinatorial optimization problems.
E-mail: aida_val2004@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3687-4925>
URL: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=15767