



АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
INFORMATION SYSTEMS

DOI 10.51885/1561-4212_2022_3_129
MPHTI 27.25.19

А.А. Камелова¹, С.Ж. Рахметуллина²

НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева»,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

¹E-mail: kamelova_ayaulim@mail.ru

²E-mail: rakhmetullinas@mail.ru

**АГОРИТМ МУРАВЬИНОЙ КОЛОНИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ
КОМПЛЕКСНОЙ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАНСПОРТА**

**КҮРДЕЛІ КӨЛІК МАРШРУТТАУ МӘСЕЛЕСІН ШЕШУГЕ АРНАЛҒАН
ҚҰМЫРСҚАЛАР КОЛОНИЯСЫ АЛГОРИТМІ**

**ANT COLONY ALGORITHM FOR SOLVING THE COMPLEX
VEHICLE ROUTING PROBLEM**

Аннотация. За перемещение требуемого количества груза оптимальным маршрутом в нужную точку за определенное время и с наименьшими издержками отвечает раздел логистики, именуемый транспортной логистикой. Транспортная логистика является важнейшей составляющей всей сферы транспортно-логистических услуг. Развитие этой сферы в Казахстане может значительно влиять на экономику страны, поэтому на данный момент это считается актуальной проблемой. Повышения эффективности грузоперевозок в современной транспортной логистике можно достичь с помощью автоматизированных систем, позволяющих производить компьютерную обработку, хранить и визуализировать исходные данные.

В ходе исследования представлена математическая модель задачи маршрутизации транспорта с ограничением грузоподъемности, на которую были наложены дополнительные ограничения. Описан алгоритм решения поставленной задачи, основанный на методе муравьиной колонии. Спроектировано и разработано web-приложение, позволяющее определять оптимальные маршруты при указании входных данных и ограничений. Исследована эффективность разработанного алгоритма для решения поставленной задачи путем проведения экспериментов при различных значениях параметров.

Ключевые слова: оптимальные маршруты, задача маршрутизации транспорта, алгоритм муравьиной колонии, web-приложение.

Аңдатпа. Жүктің қажетті көлемін оңтайлы маршрут бойынша қажетті нүктеге белгілі бір уақыт ішінде және ең аз шығынмен тасымалдау үшін көлік логистикасы деп аталатын бөлім жауапты. Көліктік логистика көліктік-логистикалық қызмет көрсетудің барлық саласының маңызды құрамдас бөлігі болып табылады. Бұл саланың, атап айтқанда Қазақстанда дамуы ел экономикасына айтарлықтай әсер етуі мүмкін, сондықтан қазіргі уақытта бұл өзекті мәселе болып саналады. Заманауи көлік логистикасында жүк тасымалдау тиімділігін арттыруға бастапқы деректерді компьютерлік өңдеуге, сақтауға және визуализациялауға мүмкіндік беретін автоматтандырылған жүйелерді қолдану арқылы қол жеткізуге болады.

Зерттеу барысында қосымша шектеулер қойылған жүк көтергіштігі шектеулі көлікті бағыттау мәселесінің математикалық моделі ұсынылған. Құмырсқалар колониясы әдісіне негізделген есепті шешу алгоритмі сипатталған. Енгізу деректері мен шектеулерді көрсеткенде

ең жақсы маршруттарды анықтауға мүмкіндік беретін веб-бағдарлама әзірленген. Әзірленген алгоритмнің тиімділігі әртүрлі параметрлер мәндерімен эксперименттер жүргізу арқылы зерттелді.

Түйін сөздер: оңтайлы маршруттар, көлікті бағыттау мәселесі, құмырсқалар колониясының алгоритмі, веб-қосымша.

Abstract. The logistics section, called transport logistics, is responsible for the movement of the required amount of cargo by the optimal route to the desired point in a certain time and at the lowest cost. Transport logistics is the most important component of the entire sphere of transport and logistics services. The development of this area, in particular in Kazakhstan, can significantly affect the country's economy, so now it is considered an urgent problem. An increase in the efficiency of cargo transportation in modern transport logistics can be achieved by using automated systems that allow computer processing, storage and visualization of initial data.

In the course of the study was presented a mathematical model of the vehicle routing problem with a limited load capacity and additional restrictions. There was described an algorithm for solving the problem, based on the ant colony method. Designed and developed a web application that allows you to determine the best routes when you specify the input data and restrictions. The effectiveness of the developed algorithm for solving the problem was studied by conducting experiments with different values of the parameters.

Keywords: optimal routes, vehicle routing problem, ant colony algorithm, web application.

Введение. В современном мире транспортная логистика играет важную роль как для отдельных предприятий, так и для страны в целом. Для предприятий или организаций, занимающихся доставкой или перемещением грузов, правильная организация процессов транспортировки влияет не только на сокращение их транспортных расходов, но и на увеличение потока клиентов за счет своевременно оказанных ими услуг. Поэтому оптимизация процессов транспортной логистики есть и остается актуальным вопросом. Одной из главных проблем транспортной логистики является планирование оптимальных маршрутов доставки, попытка разрешения которой приводит к необходимости исследовать такое направление в области комбинаторной оптимизации, как задачи маршрутизации транспортных средств (англ. Vehicle Routing Problem, VRP). Задачи класса VRP, как правило, нацелены на минимизацию расстояния, стоимости или времени, которые связаны с транспортировкой, благодаря нахождению оптимальной очередности посещения клиентов для транспортных средств (ТС) [1, 2]. В силу практической значимости и одновременно значительной сложности (сложность NP) данных задач, они привлекают особое внимание исследователей. Классическая постановка и алгоритмический подход к решению практической задачи, целью которой было построение маршрута поставки бензина от станции магистрального трубопровода до большого количества обслуживающих терминалов, были предложены Г. Данцигом и Дж. Рамсером. Через несколько лет Кларк и Райт впервые использовали в постановке задачи несколько ТС, а также предложили более эффективный эвристический метод решения на основе жадного алгоритма. Сейчас известно множество разновидностей задач маршрутизации и вариантов постановки, отличающихся, главным образом, различными, накладываемыми на получаемое решение ограничениями [3, 4]. Однако такие модели, как правило, не позволяют одновременно учесть множество факторов, влияющих на процесс составления маршрутов. Согласно новой тенденции, исследования в данной области стремятся описать многофакторные реальные жизненные ситуации, что приводит к возникновению более сложных и обобщенных вариантов задачи маршрутизации транспорта. Одной из таких задач является рассматриваемая в данной статье задача, которая, в отличие классической модели, позволяет одновременно учитывать такие ограничения, как асимметричность данных, грузоподъемность транспортного средства,

максимальная длительность маршрутов и разнородный парк транспортных средств.

На сегодняшний день активно используемыми методами оптимизации в различных сферах, таких как наука, коммерция и инженерия, являются метаэвристики [7]. Определенные успехи в разработке современных метаэвристических методов для решения задач маршрутизации транспорта были достигнуты многими исследователями: С.Д. Штовба, J. Holland, F. Glover, E. Talbi, J. Kennedy, M. Dorigo, Д. Карабога, Sh. Yang, S. Deb, А.П. Карпенко, Ю.А. Скобцов и другими. В последнее время повышенному интересу со стороны исследователей подвержены метаэвристики роевого интеллекта. В частности, в статье [8] описана возможность применения алгоритмов роевого интеллекта, а именно муравьиного алгоритма, алгоритма пчелиного роя и летучих мышей для анализа образовательных данных. Для решения задач транспортной логистики чаще всего используются генетические и муравьиные алгоритмы. Например, предлагаются методы решения задачи маршрутизации транспортных средств с использованием подвижного генетического алгоритма [9]. Для решения многих практических задач, которые в действительности являются более сложными, чем задачи, описанные в существующих математических моделях, зачастую требуется комбинировать или модифицировать существующие алгоритмы. К примеру, в работе [10] приведен комбинированный метод для планирования маршрута безэкипажного надводного аппарата, основанный на муравьином алгоритме и алгоритме, вдохновленном защитным процессом биологической иммунной системы. Также алгоритм муравьиной колонии на основе стратегии динамического поиска применяется при планировании маршрута робота [11].

В данной статье для решения комплексной задачи маршрутизации транспорта применяется алгоритм, основанный на методе муравьиной колонии [12].

Материалы и методы исследования. Постановка задачи, предлагаемая в данной статье, позволит, в отличие от существующих, учесть дополнительные условия, которые могут быть достаточно значимыми на практике и влиять на качество получаемого решения при поиске рациональных маршрутов для разнородного парка ТС.

В предлагаемой постановке учитываются следующие ограничения и особенности:

– асимметричность матриц расстояний и времени. Предположение о том, что пути между пунктами будут идентичными независимо от направления движения, противоречит реальным условиям и может привести к разрыву теории и практики. Помимо этого, в данных, предоставляемых большей частью распространенных программных инструментов, позволяющих автоматически прокладывать маршруты между точками, учитывается выбранное направление. Поэтому, несмотря на сложность, будет целесообразным рассматривать асимметричную задачу, для моделирования которой используется ориентированный граф;

– ограничение грузоподъемности. На практике, как правило, параметры транспортного средства не позволяют перевозить неограниченное количество груза, поэтому объем транспортируемых грузов на маршруте не должен превышать некоторую заданную величину. В связи с этим данное ограничение является основополагающим во многих вариантах задачи маршрутизации транспортных средств и также соблюдается в предлагаемой постановке задачи;

– ограничение максимальной длительности маршрутов. Необходимость такого ограничения может быть вызвана планированием перевозок, например, если заранее установлена длительность маршрутов, то клиенты для их же удобства могут быть предупреждены, что товар будет доставлен в течение этого времени. Данное условие в отличие от ограничения,

накладываемого в задаче маршрутизации транспорта с временными окнами, не ограничивает строго время обслуживания каждого клиента, однако дает возможность примерно оценить общую длительность, не усложняя при этом поиск маршрутов;

– разнородность парка транспорта. В современных условиях, не исключено наличие у организаций, осуществляющих транспортные перевозки, большого парка ТС с различными классами транспорта. В связи с чем логистические операции в таких организациях требуют учитывать характеристики конкретного транспорта. Игнорирование отличий в характеристиках транспортных средств позволило бы упростить поиск решений существующими методами, однако это не соответствовало бы реальным условиям. Поэтому в предлагаемой постановке задачу необходимо решить с учетом разнородности парка ТС, а именно различной грузоподъемности, при этом имеется фиксированное количество видов ТС каждого типа.

Таким образом, в данной статье будет рассматриваться асимметричная задача маршрутизации транспорта с ограничением грузоподъемности, длительности маршрута и разнородным парком ТС. Математическая модель данной задачи базируется на моделях уже известных задач, таких как асимметричная задача маршрутизации транспортных средств [13] и задача маршрутизации транспортных средств с ограничением грузоподъемности [14]. Дан полный ориентированный граф $G = (A, E)$, с множеством вершин $A = 0, \dots, 1$ и множеством дуг E . Вершина a_0 является депо, остальным вершинам графа соответствуют пункты потребления. Для каждого клиента задано значение спроса q_i , для каждого транспортного средства v – его грузоподъемность Q_v . С каждой дугой связаны значения входных параметров, характеризующих пути движения транспортных средств: d_{ijv} – расстояние между вершинами (i, j) для транспортного средства v и t_{ijv} – время передвижения между вершинами (i, j) для транспортного средства v .

При выборе параметров d_{ijv} , t_{ijv} , которые характеризуют дороги, учитываются реальные сведения о пути между двумя точками, предоставляемые различными программными инструментами прокладки маршрутов. Предполагается, что информация о дорогах определена для различных типов транспортных средств, поэтому в обозначении используется дополнительный индекс, соответствующий конкретному типу транспортного средства. Если бы парк транспорта был однородным, то входные параметры и переменные принимались бы одинаковыми для всех v . Задача решается с использованием множества логических переменных $x_{ijv} \in X$, которые соответствуют дугам графа так, что:

$$x_{ijv} = \begin{cases} 1, & \text{если дуга } (i, j) \text{ принадлежит маршруту } v \\ 0, & \text{если дуга } (i, j) \text{ не принадлежит маршруту } v. \end{cases}$$

Обозначив общее количество ТС как m , количество груза, доставляемого из депо транспортным средством v i -му клиенту как y_{iv} и максимально допустимую длительность маршрутов как T , математическую модель асимметричной ЗМТ с ограничением грузоподъемности, длительности маршрута и с разнородным парком ТС можно представить следующей формулой:

$$F = \sum_{v=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n d_{ijv} x_{ijv} \rightarrow \min, \quad (1)$$

при соблюдении следующих условий:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{v=1}^m x_{ijv} = 1 \quad j = 1, \dots, n; \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{izv} - \sum_{j=0}^n x_{zjv} = 0 \quad z = 0, \dots, n; \quad v = 1, \dots, m; \quad (3)$$

$$y_{iv} \leq q_i \sum_{j=1}^n x_{ijv} \quad i = 1, \dots, n; v = 1, \dots, m; \quad (4)$$

$$\sum_{v=1}^m y_{iv} = q_i \quad i = 1, \dots, n; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{iv} \leq Q_v \quad v = 1, \dots, m; \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n t_{ijv} x_{ijv} \leq T \quad v = 1, \dots, m; \quad (7)$$

$$d_{ijv} \neq d_{jiv}; \quad (8)$$

$$t_{ijv} \neq t_{jiv}; \quad (9)$$

$$x_{ijv} \in \{0,1\} \quad i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; v = 1, \dots, m; \quad (10)$$

$$y_{iv} \geq 0 \quad i = 0, \dots, n; v = 1, \dots, m. \quad (11)$$

Суть формулы (1) заключается в минимизации расстояния пройденного пути, формула (2) отражает условие, что каждый пункт будет посещен строго только один раз, а формула (3) означает, что для каждой вершины, количество входящих дуг должно быть равно количеству исходящих. Неравенство (4) показывает, что обслуживание клиента i транспортным средством v возможно при условии, что последнее проходит через i . Условие (5) гарантирует удовлетворение спроса каждого клиента; формула (6) отражает, что количество груза, доставляемого из депо транспортным средством v i -му клиенту, не выходит за пределы грузоподъемности ТС. Ограничение (7) показывает, что суммарная длительность маршрута для одного ТС не должна превышать заданного значения T . В формуле (8) отражается асимметричность матрицы расстояний, в формуле (9) – асимметричность матрицы времени.

Основная суть муравьиного алгоритма, именуемого также алгоритмом оптимизации подражанием муравьиной колонии – это анализ и применение описанной модели поведения муравьиной колонии для решения различного рода задач поиска маршрутов на графах. В данной работе за основу предлагается использовать алгоритм муравьиной колонии, базирующийся на методе Q-обучения [15]. Переход каждого муравья из точки i в точку j происходит в зависимости от так называемой памяти муравья, видимости и виртуального следа феромона. Память муравья представляет собой список посещенных муравьем узлов, которые нельзя посещать повторно, что исключает возможность посещения муравьем одних и тех же узлов дважды. Разумеется, в процессе составления маршрута данный список пополняется, а в начале итерации обнуляется. Под видимостью подразумевается обратная расстоянию величина, которая представляет собой некую локальную статическую информацию, выражающуюся эвристическим желанием направиться к точке j из точки i . Причем чем ближе находится точка, тем больше желание посетить ее. Конечно же, всего этого недостаточно для определения оптимального маршрута. Для этого введено понятие виртуального следа феромона на ребре (i, j) , который отражает подтвержденное опытом муравьиной колонии желание направиться к точке j из точки i . Отличие феромонного следа от видимости заключается в том, что он представляет более глобальную и динамичную информацию, изменяющуюся после каждой итерации и отражающую опыт муравьиной колонии. В результате, вероятность перехода k -го муравья из точки i в точку j на определенной итерации вычисляется по формуле:

$$P_{ij,k} = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \left(\frac{1}{D_{ij}}\right)^\beta}{\sum_{l \in J_{i,k}} \tau_{il}^\alpha \left(\frac{1}{D_{il}}\right)^\beta}, & j \in J_{i,k}, \\ 0, & \text{если } j \notin J_{i,k} \end{cases} \quad (12)$$

где: τ_{ij} – количество виртуального феромона на ребре (i, j); D_{ij} – расстояние между точками; $J_{i,k}$ – список точек, которые необходимо посетить муравью k ; α и β – регулируемые параметры, определяющие вес феромонного следа и видимость при выборе маршрута. При нулевом значении α будет выбрана ближайшая точка, что характеризует жадный алгоритм в классической теории оптимизации. При нулевом значении β работает лишь усиление феромона, что приводит к быстрому сведению маршрутов к одному субоптимальному решению. Стоит обратить внимание, что в формуле (12) определена только лишь вероятность выбора той или иной точки. Непосредственный выбор точки осуществляется согласно методу «колеса рулетки»: каждой точке на ней принадлежит некоторый сектор с площадью, пропорциональной вероятности, которая рассчитывается по формуле (1). Для выбора точки необходимо «бросить шарик на рулетку», то есть сгенерировать случайное число, и определить сектор, где остановится данный «шарик». Изначально все точки имеют одинаковый вес. Первичное значение матрицы феромонов вычисляется по формуле:

$$\tau_{ij}^0 = \frac{1}{(n+1) * \min D_{ij}}, \quad (13)$$

где D_{ij} – расстояние между двумя точками; n – количество точек доставки. Когда k -ый муравей завершает маршрут, он откладывает на ребре (i, j) некоторое количество феромона. Если ребро (i, j) не входит в построенный маршрут, то увеличения не происходит, если же данное ребро является частью маршрута k -ого муравья, то данная величина определяется по формуле:

$$\Delta\tau_{ij} = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & (i, j) \in T_k \\ 0, & (i, j) \notin T_k, \end{cases} \quad (14)$$

где T_k – маршрут, построенный муравьем k ; L_k – длина данного маршрута; Q – регулируемый параметр, порядок устанавливаемого значения которого, как правило, такой же, как и у длины оптимального маршрута (отсюда и название метода Q -обучения).

Для того чтобы исследовать все пространство решений, нужно обеспечить испарение феромона, то есть уменьшение количества феромона, накопившегося в результате предыдущих итераций с течением времени. Принято величину обновления феромона на итерации $t + 1$ вычислять по следующей формуле:

$$\tau_{ij}(t + 1) = (1 - p) * \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}, \quad (15)$$

где p – коэффициент испарения феромона, который принимает значение от 0 до 1; $\Delta\tau_{ij}$ – увеличение феромона на ребре (i, j).

По формуле (15) выполняется глобальное обновление феромона. Однако в последних работах исследователей, предлагается обновлять феромон после завершения маршрута каждым k -ым муравьем [7]. Тогда локальное обновление вычисляется по формуле:

$$\tau_{ij}(t + 1) = (1 - p_2) * \tau_{ij}(t) + p_2\tau_0, \quad (16)$$

где: p_2 – параметр, влияющий на локальную коррекцию феромона; τ_0 – малая положительная константа, характеризующая начальный уровень феромона на ребрах, зависящая от длины маршрута:

$$\tau_0 = \frac{1}{(n+1)*L_k}, \quad (17)$$

где: n – количество точек доставки; L_k – длина маршрута.

Таким образом, принимая во внимание рассмотренные характеристики алгоритма муравьиной колонии, необходимо разработать алгоритм для решения асимметричной ЗМТ с ограничением грузоподъемности, длительности маршрута и с разнородным парком ТС. В табл. 1 представлены основные ограничения поставленной задачи и способы их реализации, используя алгоритм муравьиной колонии.

Таблица 1. Способы реализации основных ограничений задачи

№	Ограничение	Описание способа реализации
1	Асимметричность	Предполагается использовать асимметричные матрицы расстояний и времени движения между депо и точками доставки, построенные с помощью данных получаемых API Google Maps. В алгоритме муравьиной колонии также предполагается использовать асимметричную относительно главной диагонали матрицу феромонов.
2	Ограничение грузоподъемности ТС	При построении маршрута муравьем предполагается обеспечить возвращение его в депо при достижении предельного значения грузоподъемности ТС.
3	Ограничение максимальной длительности маршрутов	В процессе построения маршрута вместе с грузоподъемностью ТС осуществляется проверка длительности маршрута, если она превышает максимальное значение, муравей возвращается в депо.
4	Фиксированное количество видов ТС	Количество доступных ТС задается пользователем. При построении маршрутов муравьями учитывается наличие доступного ТС. Если же есть свободные ТС, тогда маршруты предполагается распределять между ними, постепенно уменьшая пространство поиска и строя маршрут для следующего ТС уже для меньшего количества точек.
5	Разнородность парка ТС	Имеющиеся ТС характеризуются различной грузоподъемностью. Муравьиная колония строит оптимальные маршруты для каждого ТС, учитывая грузоподъемность каждого. При этом если же имеется более одного ТС с различной грузоподъемностью, предполагается учесть рациональное заполнение, чтобы ТС были заполнены более равномерно.

Для демонстрации решения поставленной задачи было разработано web-приложение, в котором реализован предложенный алгоритм решения данной задачи, основанный на

методе муравьиной колонии. Сам алгоритм поиска оптимального маршрута реализован на языке Python.

Результаты и их обсуждения. С целью оптимизации алгоритма проводились эксперименты с различными значениями управляющих параметров α , β и количества муравьев. В результате экспериментов с изменением параметра α были получены следующие средние значения целевой функции, представленные в табл. 2. Значения суммарной длины маршрутов получены для 15 точек доставки. Как видно, лучшее значение суммарной длины маршрутов (55623 км) наблюдалось при $\alpha = 0,2$. Далее рассматривалось влияние параметра β . Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 2. Влияние параметра α на значение целевой функции

Значение параметра α	Суммарная длина маршрутов (км)
0.2	55623
0.4	55894
0.6	56052
0.8	56334
1	55934

Наименьшая суммарная длина маршрутов (55284 км) получена при $\beta = 0,6$. Следует отметить, что в данном случае оценивалось влияние каждого параметра отдельно, то есть при определении влияния одного параметра значение другого принималось равным нулю. Однако целесообразным будет определить при каких значениях α , β значение суммарной длины маршрутов будет минимальным.

Таблица 3. Влияние параметра β на значение целевой функции

Значение параметра β	Суммарная длина маршрутов (км)
0,2	55879
0,4	55739
0,6	55284
0,8	55734
1	55578

В результате экспериментов, проведенных с изменением обоих параметров, было выявлено, что при $\alpha = 0,2$ и $\beta = 0,8$ просматриваются в среднем лучшие значения целевой функции (54779 км).

Также проводились эксперименты с различным количеством муравьев. Было выявлено, что увеличение количества муравьев позволяет находить лучшие результаты. В табл. 4 представлена зависимость суммы длин полученных маршрутов от количества муравьев. По итогам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что при значениях параметров $\alpha = 0,2$, $\beta = 0,8$ и количестве муравьев равным 30 получены лучшие результаты.

Таблица 4. Влияние количества муравьев на значение целевой функции

Количество муравьев	Суммарная длина маршрутов (км)
10	55934

20	55408
30	54894

Чтобы проследить, как происходит процесс поиска оптимальных маршрутов, были проведены тесты с изменением количества итераций. Было выявлено, что с увеличением количества итераций до 1000 прослеживается улучшение решения, однако далее значение уже практически не меняется. Следовательно, оптимальные решения могут быть найдены на итерациях 500...1000. Однако увеличение числа итераций приводит к увеличению времени работы алгоритма. Стоит отметить, что время работы может изменяться в зависимости от скорости подключения к сети Интернет, так как он необходим для получения данных о расстояниях между точками доставки. Однако это влияние не столь ощутимо, как влияние количества ТС, отличающихся грузоподъемностью и влияние количества точек доставки. Изменение времени работы от количества точек для различного количества видов ТС представлено на рис. 2. Из рис. 2 видно, что при малом количестве точек доставки время работы алгоритма при увеличении количества видов ТС существенно не изменяется, хоть прослеживается прямая зависимость. Однако видно значительное увеличение времени при увеличении количества точек доставки, что вполне ожидаемо при решении NP-трудных задач. Несмотря на это, решение для 25 точек и 3 различных видов ТС было получено не более чем за 7 секунд, что говорит о том, что алгоритм все же справился с решением задачи.

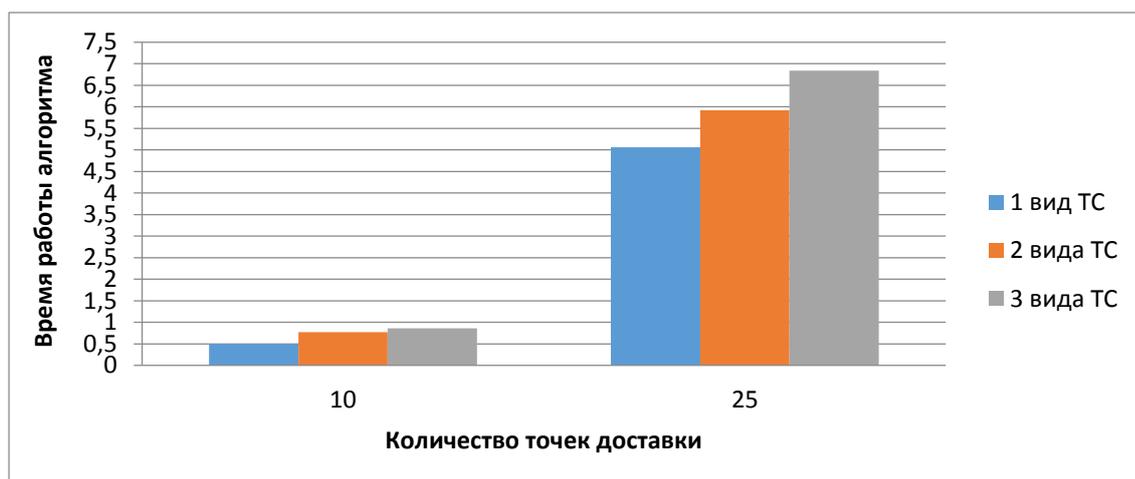


Рисунок 2. Зависимость времени работы алгоритма от количества точек доставки и ТС

Заключение. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что задача маршрутизации транспорта, которая учитывает такие ограничения, как асимметричность данных, грузоподъемность ТС, максимальная длительность маршрута и разнородный по грузоподъемности парк ТС, может быть решена за счет применения алгоритма муравьиной колонии. Разработанный алгоритм позволяет построить маршруты, используя оптимизацию муравьиной колонии, и при построении учитывать ограничение грузоподъемности ТС и максимальной длительности маршрута. Для того чтобы маршруты строились для различных транспортных средств, происходит постепенное уменьшение пространства поиска за счет удаления точек уже построенных маршрутов. Выбор маршрутов для

конкретного ТС осуществляется в зависимости от загруженности ТС: выбирается маршрут, который содержит большее количество грузов. Это также способствует более рациональной загрузке транспорта, а постепенное уменьшение пространства поиска приводит к уменьшению времени работы алгоритма. Проведенные эксперименты при различном количестве итераций позволили определить, что с увеличением количества итераций наблюдаются улучшения решения, но это также приводит к увеличению времени работы приложения, что особенно заметно при изменении количества разнотипных ТС в большую сторону. Несмотря на это, для задач небольших размерностей решение определяется за небольшой промежуток времени. Таким образом, дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию рассмотренного алгоритма решения поставленной задачи для уменьшения его времени работы при большом наборе данных. Уменьшение пространства поиска способствует некоторому росту производительности, однако одновременное увеличение точек доставки и количества различных ТС приводит к увеличению времени работы алгоритма.

Список литературы

1. Wei L, Zhang Z, Zhang D, Leung SC (2018) A simulated annealing algorithm for the capacitated vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research* 265(3): 843-859 .
2. Rabbouch B, Saâdaoui F, Mraïhi R (2020) Empirical-type simulated annealing for solving the capacitated vehicle routing problem // *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence* 32(3): 437-452.
3. Sabar, N.R., Bhaskar, A., Chung, E., Turky, A., Song, A., A self-adaptive evolutionary algorithm for dynamic vehicle routing problems with traffic congestion, *Swarm and Evolutionary Computation*, 44, 1018-1027, 2019.
4. A. Prakasam and N. Savarimuthu, "Novel local restart strategies with hyper-populated ant colonies for dynamic optimization problems," *Neural Comput. Appl.*, vol. 31, no. 1, pp. 63–76, Jan. 2019.
5. Faiz A, Subiyanto S, Arief UM. An efficient meta-heuristic algorithm for solving capacitated vehicle routing problem. *International Journal of Advances in Intelligent Informatics* 2018; 4 (3): 212-225. doi: 10.1016/j.cor.2004.07.009.
6. Alinaghian M, Tirkolaee EB, Dezaki ZK, Hejazi SR, Ding W (2021) An augmented tabu search algorithm for the green inventory-routing problem with time windows. *Swarm and Evolutionary Computation* 60:100802. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100802>.
7. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э Баумана, 2017. – 445 с.
8. Ю.Ю. Дюличева. Алгоритмы роевого интеллекта и их применение для анализа образовательных данных, 2019 DOI: <http://dx.doi.org/10.21686/1818-4243-2019-5-33-43>.
9. Д. О. Сидоренко, А. Ю. Городилов. О решении задачи маршрутизации транспорта с помощью подвижного генетического алгоритма, 2021 DOI: 10.17072/1993-0550-2021-4-43-48
10. Hongbin Wang, Jianqiang Zhang, Jiao Dong. Application of ant colony and immune combined optimization algorithm in path planning of unmanned craft, 2022 DOI: 10.1063/5.0077858.
11. Modhi Lafta Mutara, M.A. Burhanuddina, Asaad Shakir Hameeda, Norzihani Yusofa, Hussein Jameel Mutashar. An efficient improvement of ant colony system algorithm for handling capacity vehicle routing problem, 2020 DOI: 10.5267/j.ijiec.2020.4.006.
12. Dorigo M., Stützle T. Ant colony optimization: overview and recent advances // *Handbook of metaheuristics*. Springer, Cham, 2019. pp. 311-351.
13. Borcinova, Zuzana. Two models of the capacitated vehicle routing problem. *Croatian Operational Research Review*, 2017 DOI: 10.17535/crorr.2017.0029.
14. Ban Bang, Nguyen Phuong. A hybrid metaheuristic for Solving Asymmetric Distance-Constrained Vehicle Routing Problem, 2021 DOI: 10.1186/s40649-020-00084-7.
15. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы // *Exponenta Pro. Математика в приложениях*. – 2003. – № 4. – С. 70-75.
16. Кононов, Н. А. Проектирование архитектуры веб-приложения, реализующего паттерн MVC на

- языке PHP / Н. А. Кононов // Теоретический и практический потенциал современной науки: Сборник научных статей / Науч. редактор Н.А. Шайденко. – М.: Издательство "Перо", 2020. – С. 92-94.
17. Кубил В.Н. Обзор обобщений и расширений задачи маршрутизации транспорта // Вестник РГУПС. – 2018. – № 2. – С. 97-109.
18. Irnich S., Toth P., Vigo D. The family of vehicle routing problems // In: Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications / Ed. by Toth P., Vigo D. SIAM. – 2014. – Pp. 1-35.

References

1. Wei L, Zhang Z, Zhang D, Leung SC (2018) A simulated annealing algorithm for the capacitated vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research* 265(3):843–859.
 2. Rabbouch B, Saâdaoui F, Mraïhi R (2020) Empirical-type simulated annealing for solving the capacitated vehicle routing problem. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence* 32(3): 437-452.
 3. Sabar, N.R., Bhaskar, A., Chung, E., Turkey, A., Song, A., A self-adaptive evolutionary algorithm for dynamic vehicle routing problems with traffic congestion, *Swarm and Evolutionary Computation*, 44, 1018-1027, 2019.
 4. A. Prakasam and N. Savarimuthu, "Novel local restart strategies with hyper-populated ant colonies for dynamic optimization problems," *Neural Comput. Appl.*, vol. 31, no. 1, pp. 63–76, Jan. 2019.
 5. Faiz A, Subiyanto S, Arief UM. An efficient meta-heuristic algorithm for solving capacitated vehicle routing problem // *International Journal of Advances in Intelligent Informatics* 2018; 4 (3): 212-225. doi: 10.1016/j.cor.2004.07.009.
 6. Alinaghian M, Tirkolaee EB, Dezaki ZK, Hejazi SR, Ding W (2021) An augmented tabu search algorithm for the green inventory-routing problem with time windows. *Swarm and Evolutionary Computation* 60:100802. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100802>.
 7. Karpenko A.P. *Sovremennye algoritmy poiskovoj optimizacii. Algoritmy, vdohnovlennye prirodoj: uchebnoe posobie. – 2-e izd. – M.: Izd-vo MGTU im. N.Je Baumana, 2017. – 445 S.*
 8. Ju.Ju. Djulicheva. Algoritmy roevogo intellekta i ih primeneniye dlja analiza obrazovatel'nyh dannyh, 2019 DOI: <http://dx.doi.org/10.21686/1818-4243-2019-5-33-43>.
 9. D. O. Sidorenko, A. Ju. Gorodilov. O reshenii zadachi marshrutizacii transporta s pomoshh'ju podvizhnogo geneticheskogo algoritma, 2021 DOI: 10.17072/1993-0550-2021-4-43-48.
 10. Hongbin Wang, Jianqiang Zhang, Jiao Dong. Application of ant colony and immune combined optimization algorithm in path planning of unmanned craft, 2022 DOI: 10.1063/5.0077858.
 11. Modhi Lafta Mutara, M.A. Burhanuddina, Asaad Shakir Hameeda, Norzihani Yusofa, Hussein Jameel Mutashar. An efficient improvement of ant colony system algorithm for handling capacity vehicle routing problem, 2020 DOI: 10.5267/j.ijiec.2020.4.00.6.
 12. Dorigo M., Stützle T. *Ant colony optimization: overview and recent advances // Handbook of metaheuristics.* Springer, Cham, 2019. – Pp. 311-351.
 13. Borcinova, Zuzana. Two models of the capacitated vehicle routing problem. *Croatian Operational Research Review*, 2017 DOI: 10.17535/corr.2017.0029.
 14. Ban Bang, Nguyen Phuong. A hybrid metaheuristic for Solving Asymmetric Distance-Constrained Vehicle Routing Problem, 2021 DOI: 10.1186/s40649-020-00084-7.
 15. Shtovba S.D. Murav'inye algoritmy // *Exponenta Pro. Matematika v prilozhenijah*, № 4, 2003. – S. 70-75.
 16. Kononov, N. A. Proektirovanie arhitektury veb-prilozhenija, realizujushhego pattern MVC na jazyke PHP / N. A. Kononov // *Teoreticheskij i prakticheskij potencial sovremennoj nauki: Sbornik nauchnyh statej / Nauchnyj redaktor N.A. Shajdenko. – M.: Izdatel'stvo "Pero", 2020. – S. 92-94.*
 17. Kubil V.N. Obzor obobshchenij i rasshirenij zadachi marshrutizacii transporta // *Vestnik RGUPS. – 2018. – № 2. – S. 97-109.*
 18. Irnich S., Toth P., Vigo D. The family of vehicle routing problems // In: *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications / Ed. by Toth P., Vigo D. SIAM, 2014. – Pp. 1-35.*
-
-