

О.В. КАРСАЕВ, В.Ю. КУЛЕМИН, Б.М. МОРОЗОВ  
**ПЛАНИРОВАНИЕ ДОСТАВКИ СБОРНЫХ ГРУЗОВ**

---

*Карсаев О.В. Кулемин В.Ю., Морозов Б.М. Планирование доставки сборных грузов.*

**Аннотация.** В работе рассматривается задача оперативного планирования перевозок сборных грузов. Организация перевозок сборных грузов в реальной практике выполняется на основе априори составленного расписания рейсов. В соответствии с этим задача оперативного планирования рассматривается как адаптивная коррекция рейсов по текущей ситуации.

**Ключевые слова:** сборные грузы, оперативное планирование, адаптивная коррекция рейсов

*Karsaev O.V. Kulemin V.Y., Morozov B.M. Assorted Cargo Delivery Scheduling.*

**Abstract.** The problem of assorted cargo delivery scheduling in real time is considered at the paper. In practice a transportation of assorted cargo is performed using a priori computed time table and trips. Accordingly the problem is considered as adaptive correction of time table and trips in context of current situation.

**Keywords:** assorted cargo, dynamic scheduling, adaptive correction of trips

---

**1. Введение.** На практике используется много различных вариантов перевозки грузов. Одним из них и наиболее эффективным является вариант перевозки сборных грузов. Этот вариант подразумевает консолидацию грузов от различных заказчиков в одном направлении. Такой способ перевозки выгоден как заказчикам, так и перевозчикам. Для заказчика это самый выгодный и быстрый способ доставить груз небольшого размера из одной точки в другую. Для перевозчика это продажа услуг доставки грузов по модели В2С, т.е. достаточно объемный рынок продаж. Схема перевозки сборных грузов широко используется на практике. Например, при доставке почтовой корреспонденции, в частности в «Почте России», и в транспортно-экспедиторских компаниях.

Доставка сборных грузов выполняется по схеме «дверь-терминал», «терминал-терминал», «терминал-дверь». Фокусом внимания в данной статье является основной этап доставки сборных грузов, «терминал-терминал», и связанная с этим этапом задача автоматического планирования и маршрутизации межтерминальных перевозок.

В последнее время на рынке стали появляться коммерческие сервисы автоматического планирования и маршрутизации ресурсов для доставки грузов. Однако, они не являются универсальными в том смысле, что могут использоваться для любой схемы доставки. Для решения задач планирования и управления различными вариантами доставки грузов рассматриваются различные математические модели и постановки задач, и в зависимости от их сложности на индустриаль-

ном уровне они решаются с различной степенью эффективности. В наибольшей степени развиты индустриальные сервисы, предназначенные для решения задач класса VRP (Vehicle Routing Problem) [1]. На практике эта задача лежит, в частности, в основе вариантов доставки при дистрибуции товаров и в интернет торговле. Значительно менее развиты коммерческие сервисы, предназначенные для решения задач класса PDP (Pickup and Delivery Problem) [2, 3]. Это обусловлено тем, что задачи PDP относятся к более высокому уровню сложности, т.к. в задачах этого класса необходимо учитывать дополнительную специфику (дополнительные типы ограничений) относительно задач VRP.

Планирование доставки сборных грузов сводится к одной из наиболее сложных вариаций задачи PDP, к задаче PDP-T (Pickup and Delivery Problem with Transfer) [2]. В этой постановке рассматривается дополнительная возможность, трансфер груза. Это означает, что маршрут доставки груза может состоять из нескольких последовательных этапов, на которых перевозка груза выполняется разными ресурсами. В соответствии с этим в задачах PDP-T по сравнению с задачами PDP возникает дополнительная подзадача, где и между какими рейсами использовать операцию трансфера грузов для достижения плана перевозок с более высокими показателями целевых критериев. Пример эффективности использования операции трансфера грузов между рейсами приведен на рисунке 1. В данном примере сравнивается два варианта доставки грузов между двумя пунктами во встречных направлениях, без использования и с использованием операции трансфера. В примере полагается, что из-за временных ограничений выполнение обоих заказов одним транспортным средством (ТС) является невозможным. В данном случае использование операции трансфера позволяет сократить суммарный пробег ТС в 2 раза за счет исключения порожних пробогов.

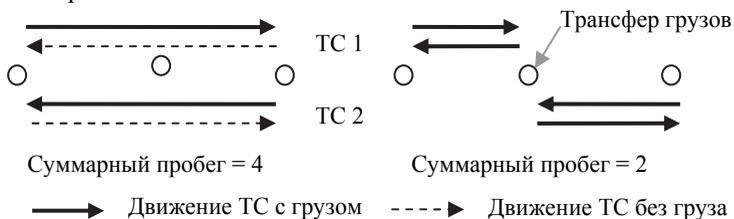


Рис. 1. Пример использования операции трансфера грузов

Задачи PDP-T в связи с их высокой практической значимостью являются объектом активных исследований [4, 5]. Несмотря на это эффективных решений этой задачи, реализованных на индустриальном уровне и используемых в реальной практике, пока не существует. Бо-

лее того, поиск решения задачи PDP-T даже в автоматизированном, а не в автоматическом режиме, значительно более сложная проблема по сравнению с таким же режимом поиска решений задач VRP и PDP. Поэтому в реальной практической деятельности поиск вариантов доставки сборных грузов выполняется на основе априори разработаемого расписания рейсов межтерминальных перевозок. В соответствии с этим в основе планирования перевозок сборных грузов рассматривается другая задача, задача планирования в рамках модели Hub-and-Spokes Network [6]. Эта модель рассматривается во многих предметных областях. В частности, она лежит в основе задачи формирования расписаний рейсов авиакомпаний [7], которая по своей сути аналогична задаче перевозки сборных грузов. Аналогия состоит в том, что составление маршрутов и расписания рейсов выполняется с поиском наиболее эффективных вариантов использования операции трансфера. В случае доставки сборных грузов это трансфер грузов, в случае авиаперевозок пассажиров это стыковка рейсов и трансфер пассажиров между рейсами.

**2. Задача планирования доставки сборных грузов.** Постановку задачи планирования доставки сборных грузов в рамках модели Hub-and-Spokes Network на содержательном уровне можно описать следующим образом.

Имеется множество терминалов и множество рейсов перевозки грузов между терминалами. Описание рейсов включает описание маршрутов и расписания выполнения рейсов. Описание маршрута рейса содержит указание начального и конечного терминалов, и перечисление последовательных промежуточных терминалов, через которые проходит маршрут. Расписание рейса содержит планируемые временные параметры: дни недели и время начала выполнения рейса, время нахождения в промежуточных терминалах маршрута и время прибытия в конечный пункт (терминал) маршрута.

На терминалах динамически формируются потоки заявок на доставку грузов до других терминалов. Заявки с общими терминалами погрузки и доставки объединяются в партии грузов. Каждой партии грузов сопоставляется два значения: требуемое время, до которого она должна быть доставлена до терминала назначения, и суммарная стоимость доставки партии грузов.

Основными критериями планирования доставки сборных грузов являются: достижение наибольшей рентабельности перевозок, и соблюдение временных ограничений по доставке грузов. Рентабельность перевозок *Profit* рассчитывается как разница:

$$Profit = Value - Cost,$$

где *Value* – суммарная стоимость всех заявок на доставку грузов, а *Cost* – суммарная себестоимость всех перевозок. Увеличение значения

*Value* за счет увеличения стоимости предоставляемых услуг влечет снижение конкурентоспособности, поэтому повышение рентабельности может достигаться главным образом за счет снижения себестоимости перевозок *Cost*.

Очевидно, что при строгом соблюдении расписания, маршрутов и графиков выполнения рейсов, возможности по снижению себестоимости перевозок минимальны. Они ограничены только выбором транспортных средств с наименьшей грузоподъемностью при назначении на рейсы, так как стоимость фрахта транспортного средства зависит от его грузоподъемности. Однако, и этот выбор также в большинстве случаев ограничен, так как для межтерминальных перевозок, как правило, используются однотипные транспортные средства с наибольшей грузоподъемностью. Иные возможности по снижению себестоимости перевозок связаны с адаптивной коррекцией расписания рейсов - изменением маршрутов и/или расписания рейсов в зависимости от текущей ситуации.

Эффективность такого подхода на основе экспериментальных исследований показана в работе [8]. В этой работе поиск вариантов коррекции расписания осуществляется с помощью многоагентной системы (МАС), состоящей из множества легких агентов грузов и терминалов. МАС такого типа образно сравнивают с роем пчел. В этой работе агенты терминалов владеют знаниями об элементах расписания. В частности, агент терминала знает время отправления ТС только до соседних терминалов. Агенты грузов, используя знания агентов терминалов, исследуют множество вариантов достижения конечной цели, выбирают из них наилучший, и сообщают о своих намерениях агентам терминалов. Последние в свою очередь на основе анализа и обобщения полученной информации могут принимать решения о коррекции расписания. Эта информация сообщается агентам грузов, которые с учетом этого повторяют поиск вариантов доставки. Таким образом, в этой работе адаптивная коррекция расписания выполняется на основе случайного поиска. В настоящей статье для поиска адаптивной коррекции расписания также используется многоагентный подход, но в отличие от работы [8] сценарии поведения и взаимодействия агентов определяются целенаправленным поиском решения.

Объективные причины необходимости и возможности использования адаптивной коррекции расписания состоят в следующем. Расписание рейсов рассчитывается на долгосрочной основе исходя из среднестатистической модели грузопотоков между терминалами. Но в каждой конкретной ситуации в той или иной степени возникает отличие текущей карты грузопотоков между терминалами от среднестатистической модели. В соответствии с этим цель адаптивной коррекции расписания можно уточнить следующим образом. Изменение маршрутов и/или расписания рейсов в зависимо-

сти от текущей ситуации - расхождения среднестатистической модели и текущей карты грузопотоков. Следует отметить, что значительную долю в себестоимости транспортировки грузов (более 60%) составляют амортизация ТС и зарплата водителя, начисляемые во время простоев. Поэтому оптимизация расписания может давать существенные результаты.

**3. Декомпозиция маршрутной сети межтерминальных перевозок.** Содержание и эффективность методов адаптивной коррекции расписания зависят от логики составления маршрутов и расписания рейсов, и маршрутной сети межтерминальных перевозок. Под маршрутной сетью будем понимать граф. Вершинами графа являются терминалы. Две вершины графа *A* и *B* соединены дугой, если выполняется следующее условие. Существует рейс, в маршруте которого есть этап перевозки между терминалами, сопоставленными вершинам графа *A* и *B*.

Необходимо отметить, что составление расписания и рейсов и планирование перевозок с использованием имеющегося расписания это две взаимосвязанные, но решаемые по отдельности задачи как в теоретических исследованиях моделей Hub-and-Spokes Network, так и в реальной практике. В частности, в транспортно-экспедиторских компаниях расписание рейсов составляется и/или корректируется несколько раз в год в зависимости от динамики изменения направлений грузопотоков, а планирование перевозок с использованием составленного расписания выполняется ежедневно.

Логика составления маршрутов и расписания рейсов главным образом определяется возможностями использования операций трансфера грузов между рейсами. Для формального описания этих возможностей далее вводятся следующие понятия и определения, приведенные в таблице 1. Здесь и далее для обозначения множеств используется полужирный шрифт, для обозначения элементов множеств – обычный шрифт.

Таблица 1. Понятия и обозначения

<b>T</b>	Множество всех терминалов
<b>L</b>	Множество всех рейсов между терминалами
<b>Hub</b>	Подмножество терминалов, из которых начинается несколько рейсов в разных направлениях. Эти терминалы далее называются как хабы
<b>Line</b>	Подмножество рейсов, маршруты которых начинаются и заканчиваются в хабах, и могут проходить через несколько хабов.
<b>Trip</b>	= $L - \text{Line}$ , подмножество всех остальных рейсов
<b>Term</b>	= $T - \text{Hub}$ , подмножество всех остальных терминалов (не хабов), через которые проходят маршруты из подмножества Line
<b>Term*</b>	Терминалы, через которые проходит N рейсов из Line
<b>Term<sup>1</sup></b>	Терминалы, через которые проходит 1 рейс из Line
<b>Term<sup>0</sup></b>	Терминалы, через которые не проходят рейсы из Line

На основании введенных понятий и определений всю маршрутную сеть межтерминальных перевозок можно разбить на два уровня и на несколько фрагментов сети (рисунок 2).

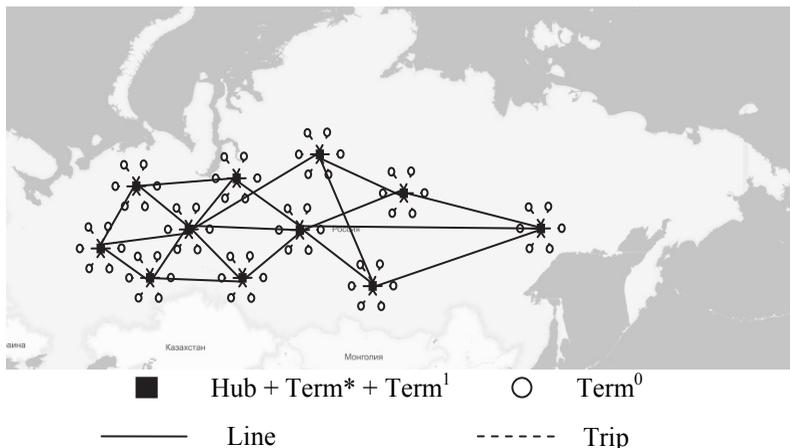


Рис. 2. Декомпозиция маршрутной сети

Первый уровень состоит из одного фрагмента маршрутной сети:

$$(\text{Hub} + \text{Term}^* + \text{Term}^1, \text{Line}),$$

в рамках которого выполняются перевозки партий грузов между терминалами из множеств Hub, Term\* и Term<sup>1</sup> на основе рейсов из множества Line. Второй уровень состоит из нескольких фрагментов маршрутной сети:

$$\{(\text{Hub} + \text{Term}^0, \text{Trip}(\text{Hub}))\},$$

в каждом из которых выполняются межтерминальные перевозки в районе одного хаба из множества Hub на основе подмножества рейсов Trip(Hub) из множества Trip. В подмножество Trip(Hub) входят рейсы из множества Trip, которые начинаются или заканчиваются в терминале Hub.

Фрагменты маршрутной сети, определенные таким образом, обладают следующими свойствами. Каждый фрагмент сети второго уровня имеет только одну общую вершину с фрагментом сети первого уровня. Фрагмент сети первого уровня предполагает возможности использования операций трансфера партий грузов между рейсами. Фрагменты сети второго уровня не предусматривают возможности использования операций трансфера. В соответствии с этими свойствами маршрут доставки партии груза может быть частично предопределен в

зависимости от того, к какой категории относятся терминал отправки  $A$  и терминал доставки  $B$  этой партии груза. В частности, если оба терминала являются элементами множества  $Term^0$ , тогда маршрут состоит из трех частей. Первая и третья части маршрутов проходят в соответствующих фрагментах сети второго уровня, а вторая часть – во фрагменте первого уровня. При этом терминалы (хабы), в которых соединяются части маршрута, предопределены терминалами получения и доставки партии груза и структурой маршрутной сети.

В соответствии с описанной декомпозицией маршрутной сети на фрагменты и на два уровня можно рассматривать декомпозицию задачи адаптивной коррекции рейсов. В рамках каждого фрагмента маршрутной сети эта задача может рассматриваться независимо. При этом содержание задачи зависит от того, какому уровню сети принадлежит фрагмент.

Как уже было отмечено, фрагменты маршрутной сети второго уровня не предусматривают возможности операций трансфера, поэтому планирование перевозок в данном случае сводится к задаче VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows). В этом случае использование методов решения задачи VRPTW априори позволяет формировать планы перевозок с меньшей себестоимостью, чем использование заранее составленных маршрутов и расписания рейсов. Как уже было отмечено в первой части статьи, для решения задач этого класса существуют эффективные решения, реализованные на индустриальном уровне.

Методы адаптивной коррекции рейсов при планировании перевозок партий грузов на первом уровне маршрутной сети рассматриваются в следующем пункте.

**4. Адаптивная коррекция рейсов.** Для решения задачи адаптивной коррекции рейсов предлагается два метода: метод «отмены убыточных рейсов», и метод «создания новых внеплановых рейсов». Эти методы реализуются с помощью МАС, состоящей из агентов партий грузов и агентов рейсов.

Агент каждой партии груза  $Cargo$  обладает следующими данными и знаниями.  $Volume(Cargo)$  – суммарный объем грузов, включенных в партию грузов, и  $Value(Cargo)$  – суммарная стоимость услуг доставки этих грузов. По мере поступления и добавления в партию новых грузов эти данные постоянно уточняются.  $Variant(Cargo)$  – упорядоченное по увеличению времени перевозки множество возможных вариантов доставки, которые рассчитываются на основе планируемого множества рейсов. Описание каждого варианта  $Variant(Cargo)$  включает указание одного рейса  $Route^*$ , либо при использовании операций

трансфера - последовательности рейсов  $Route^1 \dots Route^N$ , на которых при выборе этого варианта будет выполняться доставка партии груза. Временем доставки партии груза в варианте является планируемое время прибытия рейса  $Route^*/Route^N$  в терминал доставки партии груза. При поиске вариантов доставки рассматриваются все возможные варианты без нарушения срока доставки до конечного терминала, а также - варианты с допустимым нарушением срока доставки.

Агент каждого планируемого рейса  $Route$  обладает следующими данными и знаниями.  $Start(Route)$  – время начала выполнения рейса,  $Cost(Route)$  – себестоимость выполнения рейса,  $Load(Route)$  – объем перевозимых грузов, и  $Value(Route)$  - суммарная стоимость услуг перевозки партий грузов на рейсе. Значения  $Load(Route)$  и  $Value(Route)$  рейсов рассчитываются в соответствии с выбранными вариантами доставки партий грузов. При этом значение  $Value(Route)$  определяется следующим образом. При выборе варианта доставки партии груза  $Cargo$ , состоящего из одного рейса  $Route$ , при расчете значения  $Value(Route)$  используется вся стоимость услуги доставки  $Value(Cargo)$ . При выборе варианта доставки партии груза  $Cargo$ , состоящего из последовательности рейсов  $Route^1 \dots Route^N$ , стоимость услуги доставки  $Value(Cargo)$  распределяется между этими рейсами пропорционально расстояниям перевозки партии груза  $Cargo$  на этих рейсах.

В реальной практике процесс управления перевозками сборных грузов можно представлять в виде последовательности чередования двух фаз: накопления и формирования грузов, и принятия решений о выполнении рейсов. Решения о выполнении рейсов принимаются за определенный интервал времени до начала выполнения рейсов в зависимости от наличия поступивших грузов.

В соответствии с этим функционирование МАС состоит в следующем. На фазе накопления и формирования партий грузов создаются агенты партий грузов. После создания агенты партий грузов рассчитывают возможные варианты доставки на основе расписания планируемых рейсов. Из числа всех вариантов агенты партий грузов изначально выбирают наилучший вариант доставки. С учетом этого происходит предварительная оценка рентабельности выполнения планируемых рейсов, которая сводится к оценке показателей  $Load(Route)$  и  $Value(Route)$  этих рейсов. Рентабельность  $Profit(Route)$  рейсов оценивается по формуле

$$Profit (Route) = Value (Route) - Cost (Route).$$

На фазе принятия решений о выполнении планируемых рейсов целью работы МАС является расчет предложений по адаптивной коррекции планируемых рейсов на основе оценок загруженности и рента-

бельности рейсов. Расчет предложений выполняется на основе двух сценариев поведения агентов, выполняемых последовательно.

Первый сценарий имеет целью расчет предложений по переназначению партий грузов между рейсами для отмены нерентабельных рейсов (листинг 1).

```
Procedure remove unprofitable routes
Begin
1  costDecrease :=0
2  Routes* ← { R ∈ Route, profit(R) < α & start(R) < β }
3  foreach R ∈ Route* do flag(R):=false
4  While (exist R ∈ Route, profit(R) < α) do
5    R ← { R ∈ Route*, profit(R) is minimal }
6    Reallocate Cargo from (R)
7    if load(R)=0 then
8      costDecrease := costDecrease + cost(R)
9      remove(R)
10   else
11     flag(R) := true
End
End
```

Листинг 1. Сценарий расчета предложений по отмене рейсов

В соответствии с этим сценарием выявляются рейсы, до начала выполнения которых остается время, меньше заданного порога  $\beta$ , и оценка рентабельности которых меньше заданного порога  $\alpha$  (строка 2). Взаимодействие агентов рейсов и партий грузов при поиске вариантов переназначений описывается процедурой *Reallocate Cargo from* (строка 6), и состоит в следующем. Агент нерентабельного рейса  $R$  сообщает агентам партий грузов, которые забронировали место на этом рейсе, о возможной отмене рейса. Агенты этих партий грузов оценивают возможности изменения маршрута доставки. Для этого они выбирают наилучший по порядку вариант без использования рейса  $R$ , и взаимодействуют с агентами соответствующих рейсов выбранного варианта для проверки наличия свободного места в рейсе. При этом сравнивается объем партий грузов  $Volume(Cargo)$  и наличие свободного места на этих рейсах  $Load(Route)$ . Полученные оценки агенты партий грузов сообщают агенту рейса  $R$ .

В результате обобщения всех полученных оценок может возникнуть две ситуации. В первой ситуации для всех партий грузов есть другой вариант доставки без использования рейса  $R$  и без нарушения срока доставки. Во второй ситуации у агентов некоторых партий грузов наилучший из найденных вариантов имеет нарушение срока доставки. В этом случае решение принимается на основе сравнения двух

критериев: возможное сокращение себестоимости перевозок на величину  $Cost(Route)$  и возникающие при этом нарушения сроков доставок.

MAC рассматривается как система поддержки принятия решений. Поэтому решение о переназначениях партий грузов и отмене рейса в любом случае принимается при взаимодействии агента отменяемого рейса с пользователем системы. Если принимается решение об отмене рейса, то агенты партий грузов получают сообщение об этом, и каждый из них бронирует места у агентов рейсов выбранного варианта доставки.

Второй сценарий имеет целью расчет предложений по созданию новых внеплановых рейсов (листинг 2).

```

Procedure create new routes
Begin
1   $Cargo^* \leftarrow \{ Cargo, KPI(Cargo) > \gamma \}$ 
2   $\{cargo\ cluster\} \leftarrow clustering(Cargo^*)$ 
3  foreach cargo cluster do
4      Create new route (NewR)
5      Reallocate cargo cluster
6      Compute cost (NewR)
7   $extraCost := \sum cost(NewR)$ 
8   $Route := Route \cup New\ Route$ 
9  Remove unprofitable routes (Route, costDecrease)
10 If costDecrease < extraCost then
11     foreach  $R \in New\ route$  do
12         Reallocate cargo from (R)
13         Remove (R)
End
    
```

Листинг 2. Сценарий расчета предложений по созданию новых рейсов

Сценарий начинается с выявления партий грузов, относительно которых может возникать необходимость в оценке формирования новых рейсов (строка 1). К их числу относятся партии грузов, у которых  $KPI$  доставки превышает пороговое значение  $\gamma$ .  $KPI$  доставки рассчитывается как соотношение длины маршрута  $R$  выбранного наилучшего варианта доставки с длиной  $D$  самого короткого пути до терминала назначения партии грузов (рисунок 3).

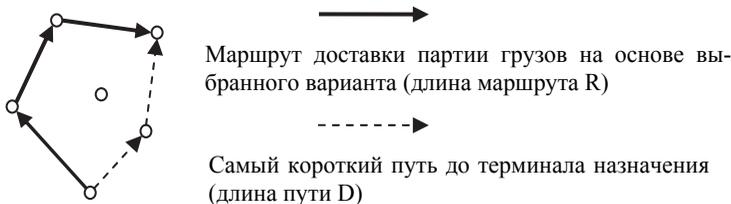


Рис. 3. Пояснение  $KPI$  доставки партии груза

На втором шаге сценария (строка 2) выполняется объединение выбранных партий грузов в группы на основе предварительного разбиения терминалов на несколько групп. Разбиение терминалов на группы выполняется экспертом на основе меры близости терминалов. С учетом этого партии грузов объединяются в одну группу, если их терминалы отправки и терминалы доставки также относятся к общим группам терминалов.

На основе полученных групп партий грузов формируются новые рейсы (строка 4). Агенты этих партий грузов отказываются от текущих вариантов доставки, выбирают новые созданные рейсы, и сообщают свои решения агентам соответствующих рейсов (строка 5). В результате такого взаимодействия происходит оценка загрузки и рентабельности новых рейсов с учетом расчета оценки себестоимости их выполнения (строка 6), и переоценка рентабельности ранее планируемых рейсов в результате снижения их загрузки.

Добавление новых «внеплановых» рейсов влечет увеличение совокупной себестоимости перевозок на величину *extraCost*, сумму значений себестоимости выполнения новых рейсов (строка 7). Поэтому добавление новых рейсов является экономически оправданным, если это увеличение можно компенсировать за счет переназначений партий грузов и отмены списка наименее рентабельных рейсов с суммарной себестоимостью больше значения *extraCost*. Поиск таких рейсов выполняется из объединенного множества рейсов, множества Route ранее планируемых рейсов и из множества New Route созданных новых рейсов (строка 8), с помощью повторения первого сценария – отмены наименее рентабельных рейсов (строка 9). Размер компенсации, который возникает в результате выполнения этого сценария, определяется значением *costDecrease*. Решение об использовании новых рейсов принимается на основе сравнения этого значения со значением *extraCost* (строка 10). Если отмена рейсов не позволяет компенсировать увеличение совокупной себестоимости перевозок, то все новые рейсы отменяются, и восстанавливаются исходные варианты доставки партий грузов, которые рассматривались до начала выполнения сценария поиска новых рейсов (строки 12, 13). При положительном исходе, когда  $costDecrease > extraCost$ , формируется предложение об использовании новых рейсов и отмены выбранного списка рейсов из ранее запланированных рейсов. Как и в первом случае, это предложение содержит информацию для принятия окончательного решения: совокупное снижение себестоимости перевозок на величину  $costDecrease - extraCost$ , и информацию о нарушении сроков доставки некоторых

партий грузов, которые возникают в результате их переназначений на другие рейсы.

**5. Заключение.** Основную проблему, возникающую при перевозке сборных грузов, в обобщенном виде можно сформулировать следующим образом. Есть два основных критерия планирования перевозок: повышение рентабельности перевозок и минимизация сроков доставки грузов. Эти критерии имеют противоположенную зависимость от времени консолидации грузов. Увеличение времени консолидации положительно влияет на повышение рентабельности перевозок за счет более высокой загрузки рейсов, но влечет увеличение сроков доставки. Сокращение времени консолидации влечет сокращение времени доставки, но негативно влияет на рентабельность перевозок из-за меньшей загрузки транспортных средств.

В реальной практике в основе организации перевозок сборных грузов используется расписание рейсов, которое составляется на основе прогнозирования направлений грузопотоков, и используется в относительно долгосрочной перспективе. Использование априори составленного расписания рейсов регламентирует время консолидации партий грузов на терминалах отправки, и как следствие - сроки доставки грузов. Но при этом рентабельность перевозок зависит от направлений и объемов грузопотоков, которые могут иметь существенные отличия от спрогнозированной модели, положенной в основу составления расписания рейсов. Таким образом, обеспечение более высокого уровня рентабельности перевозок можно достигать главным образом за счет адаптивной коррекции рейсов. В основе предложенных в статье методов коррекции рейсов рассматривается поиск вариантов переназначений партий грузов, которые позволяют отменять низкорентабельные рейсы и создавать новые рейсы с более высокой рентабельностью с целью снижения совокупной себестоимости перевозок.

Экспериментальные исследования разработанных методов являются задачей следующего этапа работ. При этом рассматривается два возможных подхода. Проведение экспериментальных работ методом имитационного моделирования и/или использование данных методов в рамках системы поддержки принятия решений. Второй подход предполагает использование такой системы в контуре реальной работы в экспериментальном режиме. Преимущество второго подхода состоит в том, что пользователь системы может оценивать предлагаемые решения по коррекции рейсов в текущей ситуации и по своему усмотрению учитывать их при принятии решений.

Результаты исследований, описанные в данной статье, выполняются в интересах проекта КАМАТЕЙНЕР, выполняемого в ОАО

КАМАЗ. В рамках этого проекта разрабатывается технология перевозок грузов с помощью съемных ВДФ контейнеров, которая называется как «эстафетная доставка», и суть которой заключается в том, что перевозка контейнера выполняется несколькими ТС. Каждое ТС осуществляет перевозку контейнера на коротком плече, 250-300 км, и далее передает его следующему ТС. Такая технология имеет ряд существенных преимуществ, главное из которых состоит в том, что скорость перевозки грузов увеличивается в 2-3 раза. В связи с этим следует отметить, что использование такой технологии для перевозки сборных грузов может оказать существенное влияние на их логистику. В частности, эта технология создает новые условия для разрешения противоречия: максимизация рентабельности рейсов или минимизация сроков доставки.

### Литература

1. *Caric T., Gold H.* Vehicle Routing Problem // InTech. 2008. 142p.
2. *Berbeglia G., Cordeau J.-F., Gribkovskaia I., Laporte G.* Static pickup and Delivery Problems: a classification scheme and survey // Top. 2007. vol. 15. no. 1. pp. 1–31.
3. *Hosny M. I., Mumford C.L.* The single vehicle pickup and delivery problem with time windows: Intelligent operators for heuristic and metaheuristic algorithms // Journal of Heuristics, Special Issue on Advances in Metaheuristics. 2010. vol. 16(3). pp. 417–439.
4. *Cort'es C., Matamala M., Contardo C.* The pickup and delivery problem with transfers: Formulation and a branch-and-cut solution method // European Journal of Operational Research. 2010. vol. 200(3), pp. 711–724.
5. *Coltin B.* Multi-agent Pickup and Delivery Planning with Transfers // Doctor of Philosophy in Robotics Thesis. 2014. 159 p.
6. *O'Kelly M.E., Miller H.J.* The hub network design problem // Journal of Transport Geography. 1994. pp. 31–40.
7. *Jacobs T.L., Garrow L.A., Lohatepanont M., Koppelman F.S., Coldren G.M., Purnomo H.* Airline Planning and Schedule Development // Quantitative Problem Solving Methods in the Airline Industry. Springer. 2012. pp. 35–99.
8. *Claes R., Holvoet T., Van Compel J.* Coordination in hierarchical pickup and delivery problems using delegate multi-agent systems // Proceedings of the 4th Workshop on Artificial Transportation Systems and Simulation. 2010. pp. 1–7.

### References

1. *Caric T., Gold H.* Vehicle Routing Problem. InTech. 2008. 142p.
2. *Berbeglia G., Cordeau J.-F., Gribkovskaia I., Laporte G.* Static pickup and Delivery Problems: a classification scheme and survey. Top. 2007. vol. 15. no. 1. pp. 1–31.
3. *Hosny M. I., Mumford C.L.* The single vehicle pickup and delivery problem with time windows: Intelligent operators for heuristic and metaheuristic algorithms. Journal of Heuristics, Special Issue on Advances in Metaheuristics. 2010. vol. 16(3). pp. 417–439.
4. *Cort'es C., Matamala M., Contardo C.* The pickup and delivery problem with transfers: Formulation and a branch-and-cut solution method. European Journal of Operational Research. 2010. vol. 200(3), pp. 711–724.

5. Coltin B. Multi-agent Pickup and Delivery Planning with Transfers. Doctor of Philosophy in Robotics Thesis. 2014. 159 p.
6. O'Kelly M.E., Miller H.J. The hub network design problem. *Journal of Transport Geography*. 1994. pp. 31–40.
7. Jacobs T.L., Garrow L.A., Lohatepanont M., Koppelman F.S., Coldren G.M., Purnomo H. *Airline Planning and Schedule Development. Quantitative Problem Solving Methods in the Airline Industry*. Springer. 2012. pp. 35–99.
8. Claes R., Holvoet T., Van Compel J. Coordination in hierarchical pickup and delivery problems using delegate multi-agent systems. *Proceedings of the 4th Workshop on Artificial Transportation Systems and Simulation*. 2010. pp. 1–7.

**Карсаев Олег Владиславович** — к-т техн. наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: интеллектуальная поддержка принятия решений, транспортная логистика, многоагентные системы. Число научных публикаций — 90. [karsaev@ips-logistic.com](mailto:karsaev@ips-logistic.com); Санкт-Петербург, 199178, 14 линия, 39; р.т. +79119095270.

**Karsaev Oleg Vladislavovich** — Ph.D., senior researcher, St. Petersburg Institute for informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: intelligent decision support, transportation logistics, agent based systems. The number of publications — 90. [karsaev@ips-logistic.com](mailto:karsaev@ips-logistic.com); 39, 14 line, St.Petersburg, 199178; office phone +79119095270

**Кулемин Владимир Юрьевич** — к-т техн. наук, доцент, директор инженерный центр ОАО «КАМАЗ». Область научных интересов: управление знаниями, транспортная логистика. Число научных публикаций — 60. [kulemin@kamaz.org](mailto:kulemin@kamaz.org); 197110, ул. Красного Курсанта, д.25, офис 408; р.т. +79095875676.

**Kulemin, Vladimir Yurevich** — Ph.D., associate professor, director, the Engineering centre “KAMAZ”. Research interests: knowledge management, transportation logistics. The number of publications — 60. [kulemin@kamaz.org](mailto:kulemin@kamaz.org); Office 408, 25 Krasnogo Kursanta, St.Petersburg, 197110; phone +79095875676.

**Морозов Борис Михайлович** — руководитель, аналитическая служба ОАО «КАМАЗ». Область научных интересов: системный анализ, оценка инвестиций, инновационные бизнес-модели для образования, промышленности и транспорта. Число научных публикаций — 20. [morozov@kamaz.ru](mailto:morozov@kamaz.ru); Набережные Челны, Автозаводский пр.2 офис 400, 423827, Республика Татарстан; р.т. +79600700157

**Morozov Boris Mikhailovich** — director, Analytical Centre “KAMAZ”. Research interests: system analysis, investment appraisal, innovative business models for education, industry and transport. The number of publications — 20. [morozov@kamaz.ru](mailto:morozov@kamaz.ru); Office 400, 2, Avtozavodky Av, Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan; phone +79600700157.

## РЕФЕРАТ

*Карсаев О.В., Кулемин В.Ю., Морозов Б.М.* **Планирование доставки сборных грузов.**

В работе рассматривается задача оперативного планирования межтерминальных перевозок сборных грузов с целью снижения себестоимости перевозок. В реальной практике в основе организации таких перевозок используется модель Hub-and-Spokes. В соответствии с этой моделью существует априори составленное расписание рейсов межтерминальных перевозок. В связи с этим задача планирования сводится к задаче адаптивной коррекции рейсов и расписания.

Эффективность такого подхода существенным образом зависит от логики используемого расписания и рейсов, а именно от возможностей использования операций трансфера партий грузов между рейсами. В связи с этим рассматривается метод декомпозиции маршрутной сети на два уровня. Первый уровень состоит из одного фрагмента, в рамках которого используются операции трансфера. Второй уровень состоит из нескольких независимых фрагментов, в которых операции трансфера не предусматриваются. В соответствии с этим оптимизация перевозок в рамках второго уровня маршрутной сети сводится к решению задачи VRPTW, а методы адаптивной коррекции расписания и рейсов рассматриваются применительно к первому уровню маршрутной сети.

Описываются два метода коррекции. Первый метод сводится к поиску переназначений партий грузов между рейсами, которые позволяют полностью отменить убыточные рейсы. Второй метод сводится к формированию новых внеплановых рейсов, которые рассчитываются в зависимости от текущих заказов на перевозку грузов. При этом выполняется оценка снижения себестоимости перевозок при условии, что использование новых рейсов позволяет отменить ряд рейсов, предусмотренных расписанием.

## SUMMARY

### *Karsaev O.V., Kulemin V.Y, Morozov B.M. Assorted Cargo Delivery Scheduling.*

The problem of assorted cargo delivery scheduling in real time is considered at the paper. At that the main objective of the scheduling is decrease of transportation cost. In practice the “Hub and Spokes” model is basis of assorted cargo transportation. According to this model there is a priority computed time table of trips between terminals. Therefore the problem is considered as adaptive correction of trips and time table.

Effectiveness of such approach is mainly determined by logics of time table and trips, namely by opportunities of cargo transfers between trips. Accordingly a decomposition of route network in two levels is considered. First level consists of one fragment of route network in which cargo transfers are provided and actively executed in practice. Second level consists of some fragments in which cargo transfers are not provided by time table and trips. So at these fragment transportation scheduling is reduced to VRPTW problem statement, and adaptive correction is considered only in regard to first level of route network.

Two methods of adaptive correction are described. First one is search of cargo reallocation between trips that allows cancelling of unprofitable trips. Second method is computation of new trips and cancellation of some planned ones depending on current situation and on condition that it reduces total transportation cost.