

На правах рукописи

Ковалев Игорь Александрович



**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОЗКАМИ  
МАССОВЫХ ГРУЗОВ КОЛЬЦЕВЫМИ МАРШРУТАМИ**

05.22.08 – Управление процессами перевозок

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (УрГУПС) Федеральное агентство железнодорожного транспорта.

Научный руководитель –

кандидат технических наук, доцент  
Александров Александр Эрнстович

Официальные оппоненты:

доктор экономических наук, профессор Куренков Петр Владимирович  
кандидат технических наук, профессор Вальт Эрвин Брунович

Ведущее предприятие – Российский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи Министерства путей сообщения Российской Федерации (ВНИИАС МПС России)

Защита состоится «25» мая 2007 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 при Уральском государственном университете путей сообщения» (УрГУПС) по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, ауд. 283. Факс: (343) 358-47-66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» апреля 2007 г.

Отзывы на автореферат, в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять в адрес диссертационного совета по почте.

Ученый секретарь

диссертационного совета



В.Р. Асадченко

## ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность проблемы.**

В современных условиях проблема транспортного обслуживания предприятий остается актуальной. Возрастают требования, предъявляемые к надежности и эффективности перевозок.

Важным звеном в обеспечении потребителей массовыми грузами остаются кольцевые маршруты. Целесообразность их использования объясняется надежным транспортным обслуживанием предприятий.

Для эффективной организации процесса управления перевозками кольцевыми маршрутами необходимо наличие своевременной и точной информации о нахождении подвижного состава, наличии грузов у поставщиков и потребителей. При этом вариантов возможных схем обращения маршрутов значительно больше, чем реально может проанализировать диспетчер.

Многовариантность требует автоматизации выбора рационального варианта плана. Это позволит повысить надежность транспортных связей, добиться эффективного взаимодействия между участниками перевозочного процесса.

Таким образом, назрела необходимость разработать современную методическую основу для автоматизированного управления обращением кольцевых маршрутов. Это позволит принимать обоснованные решения в вопросах транспортного обслуживания поставщиков и потребителей, а также обеспечивать доставку груза с минимумом затрат.

**Целью диссертационной работы** является разработка и реализация научно-методических принципов автоматизации процесса управления перевозками массовых грузов кольцевыми маршрутами на основе автоматизированного построения оптимизационной модели. Оптимизационная модель обеспечит составление плана регламентированного по времени подвода маршрутов к пунктам погрузки и выгрузки в условиях неравномерности интервалов производства и потребления.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить **следующие задачи:**

- 1) изучить особенности организации перевозок массовых грузов кольцевыми маршрутами на дорогах сети;
- 2) представить математическую постановку задачи, позволяющую моделировать полные обороты кольцевых маршрутов, увязав в единый цикл выполнение технологических операций с разнородными продуктами (грузом, гружеными и порожними составами);
- 3) разработать методические положения по построению модели оптимального в динамике планирования и управления работой кольцевых маршрутов;
- 4) описать принципы автоматизированного построения оптимизационной модели управления перевозками кольцевыми маршрутами;

- 5) разработать методику использования оптимизационной модели для автоматизации процесса управления обращением кольцевых маршрутов;
- 6) проверить предложенные подходы и методики путем их внедрения на конкретном объекте;
- 7) сделать расчеты ожидаемой эффективности от автоматизации процесса управления перевозками кольцевыми маршрутами по отношению к существующей технологии.

**Объектом исследования** в настоящей работе является система перевозок массовых грузов кольцевыми маршрутами.

**Методы исследования.** В ходе исследования применялись методы математической статистики, экспертных оценок, моделирования сложных систем, математического программирования, системного подхода. Поставленные задачи решались путем натурного обследования технологии работы кольцевых маршрутов.

Теоретической и методологической основой для исследования послужили труды, направленные на совершенствование организации эксплуатационной работы железнодорожного транспорта, и проводимые в различное время докторами технических наук Акулиничевым В.М., Батуриным А.П., Бернгардом К.А., Боровым В.А., Бородиным А.Ф., Буяновым В.А., Грунтовым П.С., Дьяковым Ю.В., Козловым П.А., Козловым И.Т., Кудрявцевым В.А., Левиным Б.А., Некрашевичем В.И., Осиповым В.Т., Осьмининым А.Т., Петровым А.П., Сотниковым Е.А., Тишкиным Е.М., Тулуповым Л.П., Шаровым В.А.; кандидатами технических наук Александровым А.Э., Былинским Ю.В., Гоманковым Ф.С., Новиковой И.П., Тушиным Н.А., Шавзисом С.С., Шумской О.А. и другими исследователями.

**Научная новизна работы.** Предложены принципы автоматизации процесса управления обращением кольцевых маршрутов.

Впервые в научной литературе применена к рассматриваемой проблеме оригинальная постановка динамической транспортной задачи с задержками (ДТЗЗ) – позволяющая учесть в одном расчете груженые и порожние рейсы маршрутов. В результате одного расчета получается оптимальный по критерию транспортных затрат план перевозок на требуемый период. Особенность модели состоит в том, что в ней удалось объединять и разъединять между собой разнородные потоки грузов и подвижного состава, моделировать технологические операции «погрузка» и «выгрузка». В результате этого появилась возможность и в задаче закольцовывать груженые и порожние рейсы маршрутов, неоднократно повторяя их на периоде расчета.

Ручное составление задач подобной сложности трудоемко. Поэтому процесс построения оптимизационной модели необходимо автоматизировать. Принципы автоматизированного построения оптимизационной модели включают:

- представление структуры железнодорожного полигона обращения кольцевых маршрутов в автоматизированной оптимизационной модели;
- алгоритм расчета календарного плана погрузки/выгрузки кольцевых маршрутов;
- получение из информационных подсистем (АСОУП, ГИД и др.) оперативной информации о нахождении подвижного состава на полигоне.

В работе предложена автоматизированная система с двухуровневой подсистемой управления, состоящей из решающей и проверяющей части. В решающей части находится оптимизационная модель. Представлена методика использования оптимизационных моделей для построения автоматизированного процесса управления обращением кольцевых маршрутов. Для использования в качестве проверяющей части имитационной модели разработана новая методика ее построения. Используемая в автоматизированной системе имитационная модель полигона и процесса обращения кольцевых маршрутов создана с помощью системы «Истра», которая ранее применялась только для расчета станций и узлов.

**Практическая значимость исследования.** Результаты исследования могут быть использованы при создании автоматизированных систем управления. Эффективность перевозок грузов кольцевыми маршрутами может быть повышена за счет оптимизации назначений маршрутов. В результате можно сократить количество маршрутов в обороте, снизить транспортные издержки от простоев маршрутов в ожидании погрузки/выгрузки. Кроме этого эффект от работы следует ожидать в производственной сфере в связи с повышением надежности транспортного обслуживания поставщиков и потребителей.

**На защиту выносятся** методика построения автоматизированного процесса управления обращением кольцевых маршрутов, в том числе:

1. новый вариант постановки ДТЗЗ с возможностью оптимизации полных оборотов кольцевых маршрутов;
2. принципы автоматизированного построения оптимизационной модели;
3. метод управления погрузочным ресурсом;
4. методика использования оптимизационных моделей для автоматизации процесса управления обращением кольцевых маршрутов.

**Реализация результатов работы.** Разработанные в результате исследований теоретические и методические подходы были реализованы при построении автоматизированной системы управления дорожно-кольцевыми маршрутами (АСУ ДКМ) для Свердловской железной дороги. В результате расчетов было установлено, что из пятидесяти восьми кольцевых маршрутов, перевозящих строительные грузы на Свердловской железной дороге, можно

исключить из оборота восемь составов или освоить ими дополнительный объем перевозок.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации были доложены и получили одобрение на научно-технической конференции молодых ученых «Молодые ученые – транспорту» (УрГАПС, г. Екатеринбург, 1999г.); научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования – транспорту» (УрГУПС, г. Екатеринбург, 2001г.); IV научно-технической конференции «Молодые ученые – транспорту» (УрГУПС, г. Екатеринбург, 2003г.); международной научно-технической конференции «Наука, инновации и образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России» (УрГУПС, г. Екатеринбург, 2006г.). Всего на 4 конференциях.

Результаты диссертационных исследований были доложены на кафедре «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения.

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы опубликованы в 8-ми печатных работах. Общий объем публикаций около 4 п.л., из которых автору принадлежит 3,4 п.л. **Одна статья опубликована в журнале «Транспорт Урала», входящем в Перечень изданий рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций**, остальные статьи опубликованы в сборниках научных трудов УрГУПС.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и трех приложений. Содержание изложено на 177 машинописных страницах, в том числе включая 54 рисунка на 50 страницах и 7 таблиц на 8 страницах. Библиографический список содержит 86 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование важности и актуальности проблемы исследования.

**В первой главе** рассматривается роль кольцевых маршрутов в организации перевозок массовых грузов на различных дорогах, проводится анализ теоретических исследований по данной теме.

Наличие значительных постоянных потоков массовых грузов каменного угля, руды, строительных материалов, нефтепродуктов и т.д. создает условия для маршрутизации перевозок. На многих дорогах сети перевозки этих грузов осуществляются кольцевыми маршрутами. По некоторым оценкам, доля непригодных под погрузку песка и щебня полувагонов составляет до 40-50 процентов от общего потока порожних, а на формирование нового состава маршрута уходит до двух суток. Это обстоятельство ограничивает возможности обычной отправительской маршрутизации.

Перевозки кольцевыми маршрутами характеризуются высокой степенью неравномерности интервалов погрузки и выгрузки. К причинам, затрудняющим управление и влияющим на неравномерность, следует отнести: неравномерность подачи заявок, сложность структуры полигона, некратность протяженности полигона длине груженых и порожних рейсов маршрутов.

Неравномерность, которой характеризуется взаимодействие поставщиков, потребителей и транспорта, является неуправляемым, дезорганизирующим фактором. Снизить негативное воздействие этого фактора можно за счет автоматизированного управления процессом перевозки кольцевых маршрутов.

Для автоматизации процесса необходимо использовать математический аппарат, который позволит оптимизировать взаимодействие между поставщиками, потребителями и транспортом.

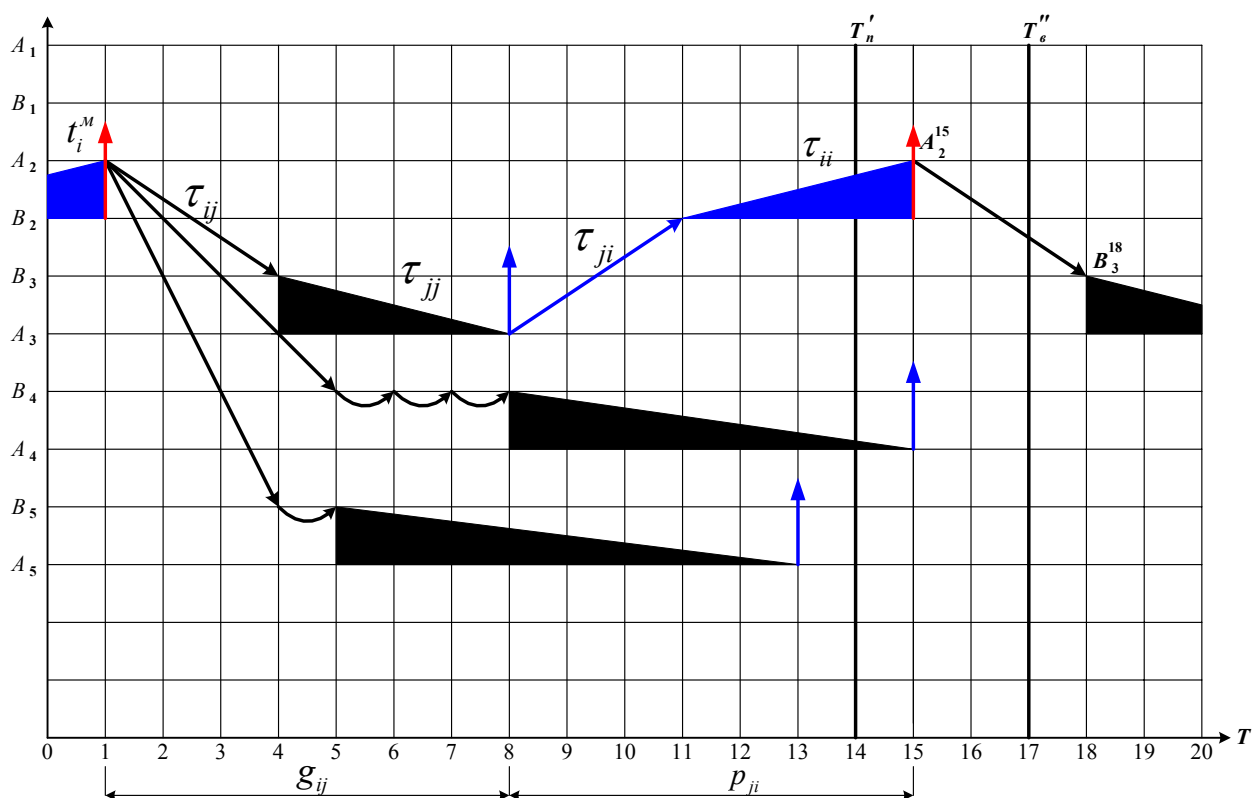
Применение математического аппарата значительно увеличивает множество возможных решений, из которых выбирается рациональное. На практике диспетчер использует, как правило, интуитивные схемы обращения кольцевых маршрутов. При этом количество составов неоправданно велико и может быть снижено за счет эффективного управления, основанного на применении математических моделей.

Проблемой автоматизации управления перевозками занимался ряд ученых в МГУПС-МИИТе, ПГУПСе, ВНИИЖТе, УрГУПСе, на Дальневосточной и Октябрьской дорогах. Известны модели управления и планирования работы маршрутов, разработанные Александровым А.Э., Амелиным В.П., Бородиным А.Ф., Буяновой В.Е., Былинским Ю.В., Садовским Л.Е., Тушиным Н.А., Шумской О.А., Яковлевым В.Ф. Основу предлагаемых систем оперативного планирования составляют либо методы линейного программирования, либо эвристические алгоритмы.

В исследованиях рассматривались различные постановки транспортной задачи. Однако существующие подходы не позволяют учитывать груженные и порожние рейсы маршрутов в одном расчете. В результате:

- возникает необходимость ручной передачи информации между разными этапами расчета груженых и порожних рейсов;
- структурой полигона накладывается ограничение на продолжительность расчета.

Рассмотрим ситуацию представленную на рис.1. Поставщики обозначены буквами  $A$ , потребители буквами  $B$ . Моменты погрузки и выгрузки кольцевых маршрутов, отмечены вертикальными стрелками. Для всех станций погрузки расчетной сети являющихся поставщиками груженых маршрутов и потребителем порожних определяется величина периода планирования не превышающая значение  $T'_n$ . На рисунке представлено два расчета, для груженых рейсов, и – порожних. Для увязки оборота маршрутов в конечных пунктах необходимо корректировать имеющуюся программу производства и



Условные обозначения:

$A$  – поставщик;  $\tau_{ij}$  – время хода груженого маршрута;  $\tau_{jj}$  – полное время оборота на  $j$ -той станции выгрузки;  
 $B$  – потребитель;  $\tau_{ji}$  – время хода порожнего маршрута;  $\tau_{ii}$  – полное время оборота на  $i$ -той станции погрузки;  
 $T_n'$  – период планирования для поставщиков;  $T_n''$  – период планирования для потребителей.

Рис. 1. Выбор периода планирования для поставщиков.

потребления, внося в нее моменты появления новых маршрутов из предыдущих расчетов. При чем моменты прибытия маршрутов должны отстоять от моментов их отправления на величину времени обработки в этом конечном пункте. Для того, чтобы рассчитать план по порожним необходимо дополнить ими программу производства порожних и сделать расчет. Те моменты, которые не попали в период планирования для поставщиков порожних, должны быть учтены при следующем расчете. Момент производства у поставщика  $A_2^{15}$  в 15 такт должен быть исключен из периода планирования груженых, т.к. на момент расчета плана о нем нет информации. В связи с этим период планирования уменьшен на единицу. Обобщая рассуждения, заключаем, что максимальное значение времени «производства» из включаемых в интервал планирования для поставщиков не должно превышать:

– для станций погрузки

$$T_n' = \min_{i,j} \{t_i^M + g_{ij} + p_{ji}\} - 1,$$

где  $t_i^M$  – модельный момент «производства» груженого маршрута;

$g_{ij}$  – время от момента «производства» груженого маршрута на  $i$ -той станции погрузки до момента его возможного «превращения» в порожний маршрут на  $j$ -той станции выгрузки, т.е.  $g_{ij} = \tau_{ij} + \tau_{jj}$ ;

$\tau_{ij}$  – время хода груженого маршрута;



$\tau_{jj}$  – оборот маршрута по  $j$ -той станции выгрузки;

$p_{ji}$  – время от момента «производства» порожнего маршрута на  $j$ -той станции до его возможного «превращения» в груженный на  $i$ -той станции, т.е.  $p_{ji} = \tau_{ji} + \tau_{ii}$ ;

$\tau_{ji}$  – время хода порожнего маршрута;

$\tau_{ii}$  – оборот маршрута по  $i$ -той станции погрузки;

– для станций выгрузки

$$T'_s = \min_{i,j} \{t_j^M + p_{ji} + g_{ij}\} - 1,$$

где  $t_j^M$  – модельный момент «производства» порожнего маршрута.

Для потребителей интервал, на котором корректно может быть задано потребление, ограничен значениями времени:

– для станций погрузки

$$T_n'' = \min_{i,j} \{t_j^M + p_{ji} + g_{ij} + \tau_{ji}\} - 1;$$

– для станций выгрузки

$$T_s'' = \min_{i,j} \{t_j^M + g_{ij} + p_{ji} + \tau_{ij}\} - 1.$$

Для решения проблемы увеличения периода расчета при построении модели полигона обращения кольцевых маршрутов предлагается новый вариант динамической транспортной задачи с задержками (ДТЗЗ). Известно несколько вариантов ДТЗЗ, разработанных проф. Козловым П.А.

Современный уровень информатизации и вычислительной техники позволяют вывести решение рассматриваемой задачи на качественно иной уровень. *Во-первых*, представляется возможным специальным образом адаптировать известный математический аппарат ДТЗЗ под ограничения, описывающие несколько оборотов маршрута за период расчета. *Во-вторых*, сегодня возможно автоматизировать процесс построения оптимизационных моделей.

**Вторая глава** посвящена формализованному описанию процесса управления кольцевыми маршрутами.

Содержательная постановка задачи трактуется следующим образом.

Пусть в рамках некоторой дороги имеется сложившаяся структура корреспонденций кольцевых маршрутов, перевозящих однородный груз. Известны объемы и ритмы погрузки и выгрузки маршрутов на конечных станциях в течение периода планирования, времена хода маршрутов от поставщиков к потребителям в груженом и порожнем направлении, возможные технологические способы ускорения оборота маршрутов в конечных пунктах и время ускорения. Имеется информация о нахождении маршрутов в пути и на конечных станциях на основе, которой можно прогнозировать моменты и объемы «производства» и «потребления».

Необходимо найти оптимальное в динамике распределение маршрутов по станциям погрузки и выгрузки в условиях неритмичной работы отправителей и

получателей. Критерием оптимальности является минимум суммарных затрат на хранение и перевозку груженых и порожних маршрутов, затрат на хранение, погрузку и выгрузку груза.

Для решения поставленной задачи предлагается аппарат оптимизации – динамическая транспортная задача с задержками в кольцевой постановке.

В соответствии с принятым аппаратом представлена формальная постановка задачи управления кольцевыми маршрутами.

В процессе моделирования используются следующие обозначения множеств:

- $T = \{0, 1, \dots, t-1, t, t+1, \dots, T\}$  – множество временных тактов задачи;
- $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{s-1}, S_s, S_{s+1}, \dots, S_{k_s}\}$  – множество всех железнодорожных станций;
- $G = \{G_1, G_2, \dots, G_{g-1}, G_g, G_{g+1}, \dots, G_{k_g}\}$  – множество всевозможных грузов, производимых на предприятиях.

Индексы переменных означают следующее: индекс  $g$  – переменная относится к грузу  $G_g$ ; индекс  $s$  – переменная относится к железнодорожной станции  $S_s$ .

Моделируемое взаимодействие разворачивается во времени. Для того чтобы смоделировать такое взаимодействие, разобьем все время задачи на равные промежутки времени – такты. Один такт равен одному часу. Будем считать, что любое действие занимает целое неотрицательное число тактов. Любое действие начинается одновременно с началом некоторого такта и заканчивается по завершению некоторого, возможно другого, такта.

Пусть  $[0, T]$  интервал оптимизации. Обозначим для каждого момента времени  $t$ ,  $t \in \{0, 1, 2, \dots, T\}$ :

- $a_{gs}(t)$  – количество груза  $G_g$  в составах, произведенное в такт  $t$  на предприятии, связанном со станцией  $S_s$ ;
- $b_{gs}(t)$  – количество груза  $G_g$  в составах, потребленного в такт  $t$  на предприятии, связанном со станцией  $S_s$ ;
- $P_{gs}^{nop}(t - \theta_{gs})$  – количество погруженного на предприятии для станции  $S_s$  груза  $G_g$  в составах, причем погрузка начата в такт  $(t - \theta_{gs})$  и закончена к такту  $t$ ;
- $V_{gs}^{exp}(t - \theta_{gs})$  – количество выгруженного груза  $G_g$ , пришедшего на станцию  $S_s$ , в адрес предприятия связанного с этой станцией, причем выгрузка была начата в такт  $(t - \theta_{gs})$ , и закончена к такту  $t$ ;

$U_{gs_1s_2}^{n.c}(t)$  – количество порожних железнодорожных составов, пригодных для груза  $G_g$ , отправленных от станции  $S_{s_1}$  к станции  $S_{s_2}$  в такт  $t$ ;

$U_{gs_1s_2}^{cp.c}(t)$  – количество железнодорожных составов, груженых грузом  $G_g$ , отправленных от станции  $S_{s_1}$  к станции  $S_{s_2}$  в такт  $t$ .

Производственные программы поставщиков и потребителей заданы наперед и сбалансированы по объему. Однако эти программы могут быть не сбалансированы по времени и с возможностями транспорта. В этом случае моделируется ситуация, в которой возникает конфликт между интересами производства и возможностями транспорта. Для разрешения этого конфликта вводятся понятия количества недостающего для потребления груза и количества невостребованного груза – количество произведенного груза, которое невозможно оставить на хранение и невозможно отправить на погрузку. В предположении о приоритете потребителей поставщики должны подстраиваться под них. Механизм запасов моделирует простой маршрутов в ожидании погрузки или выгрузки при сгущенном подводе маршрутов и недостатке производственных мощностей. Возможны ситуации, в которых с помощью запасов описывается хранение груза в ожидании погрузки из-за отсутствия порожних маршрутов или после выгрузки в ожидании момента потребления.

Обозначим для каждого момента времени  $t$ ,  $t \in \{0, 1, 2, \dots, T\}$ :

$X_{gs}^{cp}(t)$  – количество груза  $G_g$ , хранимого на предприятии, связанном со станцией  $S_s$  в такт  $t$ ;

$X_{gs}^{cp.c}(t)$  – количество железнодорожных составов, груженых  $G_g$  видом груза, хранимых на станции  $S_s$  в такт  $t$ ;

$X_{gs}^{n.c}(t)$  – количество порожних железнодорожных составов, хранимых на станции  $S_s$  в такт  $t$ , пригодных для  $G_g$  вида груза;

$H_{gs}(t)$  – количество невостребованного груза  $G_g$ , произведенного на предприятии, связанного со станцией  $S_s$  в такт  $t$ ;

$K_{gs}(t)$  – количество недопоставленного груза  $G_g$  на предприятии, связанном со станцией  $S_s$  в такт  $t$ .

Введем стоимостные коэффициенты:

$C_{gs}^{нозр}$  – стоимость погрузки на предприятии для станции  $S_s$  груза  $G_g$ , причем погрузка начата в такт  $(t - \theta_{gs})$  и закончена к такту  $t$ ;

$C_{gs}^{вызр}$  – стоимость выгрузки груза  $G_g$ , пришедшего на станцию  $S_s$ , в адрес предприятия связанного с этой станцией, причем выгрузка была начата в такт  $(t - \theta_{gs})$ , и закончена к такту  $t$ ;

- $C_{gs_1s_2}^{n.c}$  — стоимость перевозки порожних железнодорожных составов, пригодных для груза  $G_g$  от станции  $S_1$  к станции  $S_2$  в такт  $t$ ;
- $C_{gs_1s_2}^{zp.c}$  — стоимость перевозки железнодорожных составов груженых грузом  $G_g$  от станции  $S_1$  к станции  $S_2$  в такт  $t$ ;
- $C_{gs}^{zp}$  — стоимость хранения груза  $G_g$ , на предприятии, связанном со станцией  $S_s$  в такт  $t$ ;
- $C_{gs}^{zp.c}$  — стоимость хранения на станции  $S_s$  в такт  $t$  железнодорожных составов, груженых  $G_g$  видом груза;
- $C_{gs}^{n.c}$  — стоимость хранения порожних железнодорожных составов, хранимых на станции  $S_s$  в такт  $t$ , пригодных для  $G_g$  вида груза;
- $C_{gs}^H$  — стоимость производства излишней единицы груза  $G_g$  на предприятии, связанного со станцией  $S_s$  в такт  $t$ ;
- $C_{gs}^K$  — стоимость недопоставки единицы груза  $G_g$  на предприятии, связанном со станцией  $S_s$  в такт  $t$ .

Оптимизация транспортных потоков решается минимизацией целевой функции:

$$\begin{aligned} \Omega &= \sum_{i=1}^9 \Omega_i \rightarrow \min \\ \Omega &= \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t=\theta_{gs}}^T P_{gs}^{nozp}(t-\theta_{gs}) \cdot C_{gs}^{nozp} + \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t=\theta_{gs}}^T V_{gs}^{bzp}(t-\theta_{gs}) \cdot C_{gs}^{bzp} + \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t=0}^T X_{gs}^{zp}(t) \cdot C_{gs}^{zp} + \\ &+ \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t=0}^T X_{gs}^{zp.c}(t) \cdot C_{gs}^{zp.c} + \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t=0}^T X_{gs}^{n.c}(t) \cdot C_{gs}^{n.c} + \sum_{g \in G} \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \sum_{t \in T} U_{gs_1s_2}^{n.c}(t) \cdot C_{gs_1s_2}^{n.c} + \\ &+ \sum_{g \in G} \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \sum_{t \in T} U_{gs_1s_2}^{zp.c}(t) \cdot C_{gs_1s_2}^{zp.c} + \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} H_{gs}(t) \cdot C_{gs}^H + \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} K_{gs}(t) \cdot C_{gs}^K \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Здесь  $\Omega$  задает суммарные затраты на выполнение плана перевозок. Критерием оптимальности является минимум суммарных затрат на хранение и перевозку груженых и порожних маршрутов, затрат на хранение, погрузку и выгрузку груза, недопоставку и недопотребление.

При балансовых ограничениях:

– груза на станции погрузки

$$(X_{gs}^{zp}(t) - X_{gs}^{zp}(t+1)) + a_{gs}(t) - H_{gs}(t) - P_{gs}^{nozp}(t) = 0;$$

– груза на станции выгрузки

$$(X_{gs}^{zp}(t) - X_{gs}^{zp}(t+1)) - b_{gs}(t) + K_{gs}(t) + V_{gs}^{bzp}(t - \theta_{gs}) = 0;$$

– груженых железнодорожных составов на станции погрузки

$$(X_{gs}^{zp.c}(t) - X_{gs}^{zp.c}(t+1)) - \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{zp.c}(t) + P_{gs}^{nozp}(t - \theta_{gs}) = 0;$$

– груженых железнодорожных составов на станции выгрузки

$$(X_{gs}^{zp.c}(t) - X_{gs}^{zp.c}(t+1)) + \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{zp.c}(t) - V_{gs}^{6ызр}(t) = 0;$$

– груженых железнодорожных составов на транзитной станции

$$(X_{gs}^{zp.c}(t) - X_{gs}^{zp.c}(t+1)) - \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{zp.c}(t) + \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{zp.c}(t - t_s) = 0;$$

– порожних железнодорожных составов на станции погрузки

$$(X_{gs}^{n.c}(t) - X_{gs}^{n.c}(t+1)) + \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{n.c}(t - \theta_{gs_1s_2}) - P_{gs}^{nozр}(t) = 0;$$

– порожних железнодорожных составов на станции выгрузки

$$(X_{gs}^{n.c}(t) - X_{gs}^{n.c}(t+1)) - \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{n.c}(t) + V_{gs}^{6ызр}(t - \theta_{gs}) = 0;$$

– порожних железнодорожных составов на транзитной станции

$$(X_{gs}^{n.c}(t) - X_{gs}^{n.c}(t+1)) - \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{n.c}(t) + \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{n.c}(t - t_s) = 0.$$

При ограничениях на неотрицательность переменных и пропускную способность:

$$d_s^{nozр}(t) \geq P_{gs}^{nozр}(t) \geq 0; \quad d_s^{zp}(t) \geq X_{gs}^{zp}(t) \geq 0;$$

$$d_s^{6ызр}(t) \geq V_{gs}^{6ызр}(t) \geq 0; \quad d_s^{zp.c}(t) \geq X_{gs}^{zp.c}(t) \geq 0;$$

$$d_{s_1s_2}^{zp.c}(t) \geq U_{gs_1s_2}^{zp.c}(t) \geq 0; \quad d_s^{n.c}(t) \geq X_{gs}^{n.c}(t) \geq 0;$$

$$d_{s_1s_2}^{n.c}(t) \geq U_{gs_1s_2}^{n.c}(t) \geq 0.$$

Метод решения основан на сведении динамической транспортной задачи с задержками к транспортной задаче в сетевой постановке по известному алгоритму Форда – Фалкерсона.

При использовании ДТЗЗ в кольцевой постановке для планирования перевозок кольцевыми маршрутами в динамике отсутствует необходимость выбора периода расчета и периодов планирования для поставщиков и потребителей. Величина периода расчета ограничивается аппаратными средствами вычислительной техники и зависит от количества переменных (размерности) в задаче.

Основные отличия предлагаемой постановки состоят в следующем:

1. Полные обороты маршрутов оптимизируются в одной задаче.
2. В качестве транспортируемой единицы используется несколько видов продукта (груз, груженный маршрут и порожний маршрут).
3. Один и тот же узел выполняет функции поставщика одного вида продукции и потребителя другой. К такту начала погрузки на станции должен находиться груз и порожний состав. В такт окончания погрузки возникает новый продукт – груженный состав, который следует на станцию выгрузки. После его прибытия происходит выгрузка, которая представляет собой процесс деления груженого состава на два продукта – груз и порожний состав.

Технологические операции, которые производятся с кольцевыми маршрутами, в модели характеризуют дуги между узлами. На рис. 2 продемонстрированы составляющие оборота кольцевого маршрута.

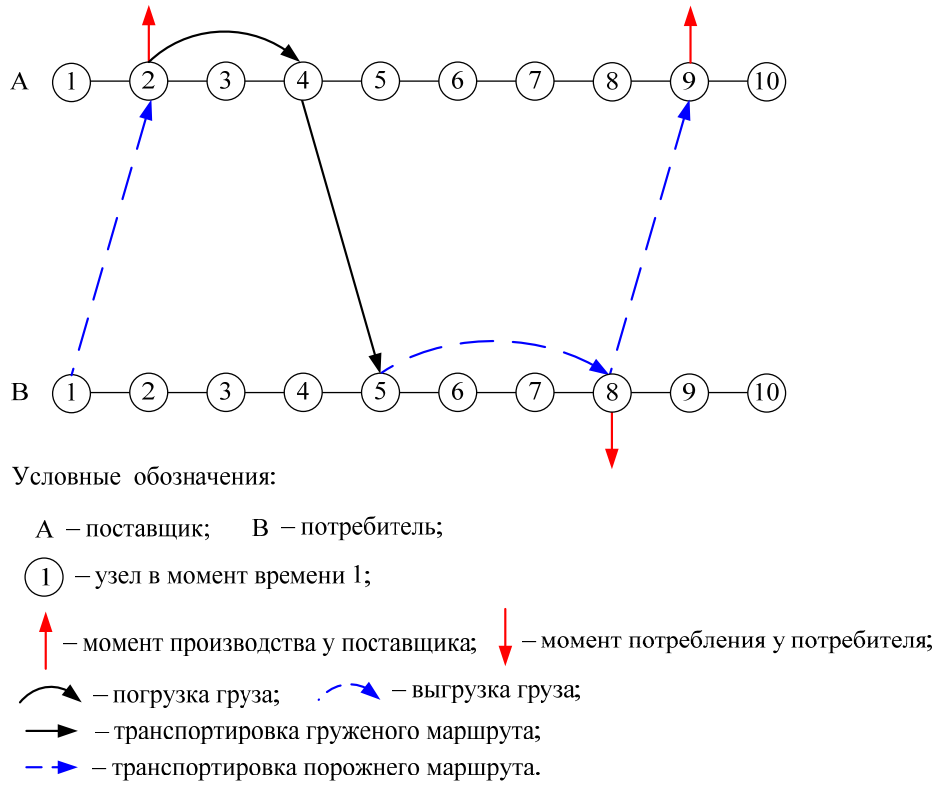


Рис. 2. Элементы оборота кольцевого маршрута.

Для упрощения описания технологических особенностей оборота маршрута по предприятию в модели введены дуги, имитирующие нахождение маршрута на предприятии и имеющие совокупные характеристики дуг отображающих оборот маршрута по обслуживаемому станцией предприятию, см. рис. 3.

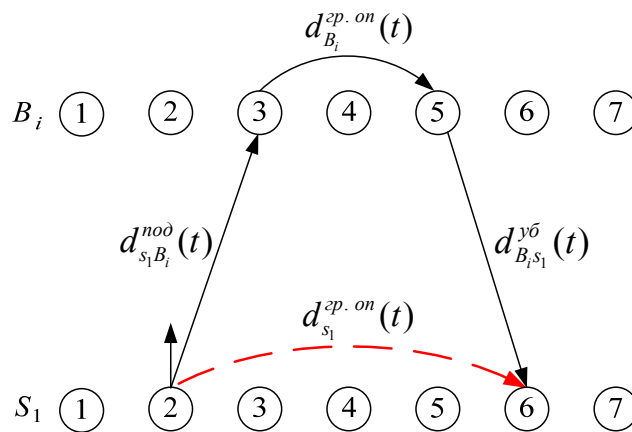


Рис. 3. Представление обслуживания станцией предприятий в модели.

Ограничение на общую пропускную способность таких дуг, выражается следующим образом:

$$U_{s_1 B_i}(t) \leq d_{s_1 B_i}(t) ,$$

$$\sum_{i=1}^m U_{s_1 B_i}(t) \leq d_{s_1}(t) ,$$

где  $U_{s_1 B_i}(t)$  – величина подачи от станции  $S_1$  на предприятие  $B_i$ ;

$d_{s_1 B_i}(t)$  – пропускная способность дуги.

Как видно из рис. 3, длина дуги, имитирующей нахождение маршрута на предприятии, отображает выполнение трех технологических операций для предприятия  $B_i$ : подачу маршрута на предприятие, грузовую операцию (погрузку/выгрузку), уборку маршрута с предприятия. Для описания такой ситуации используем ограничение общей пропускной способности дуги:

$$d_{s_1}^{zp. on}(t) = \min \{d_{s_1 B_i}^{nod.}(t), d_{B_i}^{zp. on}(t), d_{B_i s_1}^{yb.}(t)\}.$$

**В третьей главе** приводится методика автоматизированного построения оптимизационной модели управления кольцевыми маршрутами. Методика излагается на примере перевозок щебня на одной из крупнейших дорог России. В ходе анализа объекта исследования были определены поставщики и потребители щебня, установлены возможные транспортные связи.

На основе представленной математической модели, а также результатов анализа существующей организации перевозок строительных грузов кольцевыми маршрутами была разработана автоматизированная система управления обращением дорожно-кольцевых маршрутов (АСУ ДКМ) на полигоне сети железных дорог.

Система представляет собой комплекс, состоящий из четырех подсистем:

1. Подсистема формирования транспортной сети полигона обращения (ПФТС), предназначенная для создания модели транспортной сети полигона обращения ДКМ и постановки задач планирования.
2. Подсистема календарного планирования (ПКП) предназначена для анализа заявок на грузовые перевозки и автоматизации разработки календарного плана погрузки и подвода ДКМ к потребителям.
3. Подсистема оперативного планирования (ПОП) предназначена для распределения погрузочного ресурса между предприятиями грузоотправителями в зависимости от плана погрузки. Погрузочным ресурсом считаются ДКМ рабочего парка в порожнем состоянии, находящиеся на дороге.
4. Подсистема контроля движения и анализа использования ДКМ (ПКДА) предназначена для:
  - определения текущей дислокации и истории движения ДКМ как в порожнем, так и в груженом состояниях;
  - расчета оборота маршрута и оценки эффективности использования маршрутов грузоотправителями и грузополучателями.

Применение математической модели, в которой закольцованы груженные и порожние рейсы маршрутов требует адаптации к существующей методике планирования. На практике способ планирования погрузки и доставки грузов маршрутами определяется договорными отношениями между поставщиками и потребителями. В подаваемых отправителями заявках на погрузку может быть указано конкретное время отправления груза. Поэтому имеется определенное противоречие между свойствами математического аппарата и практикой планирования. Предлагается при помощи специального алгоритма

предварительно определить рейсы груженных маршрутов и в оптимизационной закольцованной задаче использовать их как константы, а не искомые переменные. Искомыми величинами будут являться длительности нахождения маршрутов на станциях погрузки/выгрузки и порожних рейсов. При таком подходе наиболее важными элементами решения являются рейсы порожних маршрутов, поэтому такой подход получил название – метод управления погрузочным ресурсом (МУПР).

Укрупненно алгоритм определения моментов погрузки и выгрузки заключается в следующем. Суммарное распределение объемов между поставщиками и потребителями задается с помощью заявок на погрузку. Заявки могут подаваться с указанием даты погрузки или быть со свободной датой. Маршруты должны отправляться в указанное в заявках время. Целью расчета является согласованный несгущенный подвод маршрутов к потребителям в течение планируемого периода.

С помощью подсистемы формирования транспортной сети полигона обращения технологические данные о железнодорожной сети преобразовываются в исходные данные задачи. Данные подразделяются на несколько функциональных групп.

Первую группу составляют данные, которые можно классифицировать как нормативно-справочную информацию (НСИ).

Вторую группу параметров составляют программы производства и потребления (ППП) грузов в узлах сети.

Третью группу параметров составляют результаты расчетов, проведенных ранее и внешние данные, полученные в результате работы системы слежения за перевозочным процессом.

Формирование модели железнодорожной сети осуществляется инженером-технологом. Для этого в установленном порядке в модель объекта вносятся данные из НСИ:

- описывается топология сети железных дорог, см. рис. 4;
- на заданной топологии определяется состав и параметры звеньев пути (неразветвляющихся участков маршрутов следования);
- описываются интегральные характеристики узлов транспортной сети (станций, связанных с предприятиями поставщиками и потребителями грузов);
- с помощью определенной последовательности звеньев задается структура и определяются параметры дуг транспортной сети (возможных маршрутов следования).



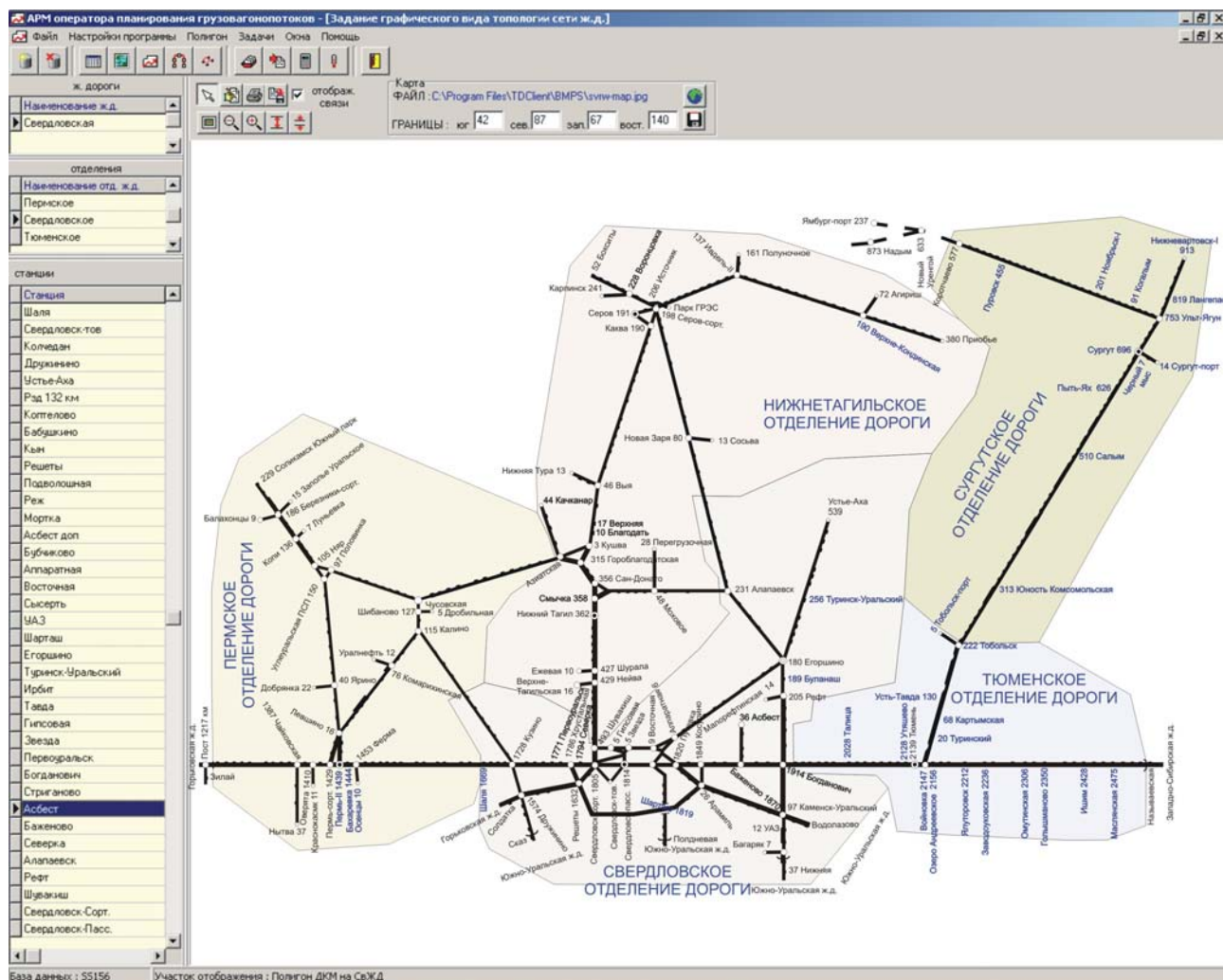


Рис. 4. Графическое представление топологии полигона.

После создания полигона обращения маршрутов, с помощью подсистемы календарного планирования, автоматически рассчитывается календарный план развоза груза кольцевыми маршрутами. Результатом планирования является составление программы производства/потребления (ППП) грузов в узлах транспортной сети.

Для исполнения сформированного плана и управления погрузочным ресурсом необходимы сведения о нахождении на сети порожних кольцевых маршрутов. Данные об их дислокации берутся из АСОУП. На начало периода планирования определяются времена и станции выполнения последних операций с маршрутами.

Оптимальный план подвода порожних маршрутов к пунктам погрузки строится автоматически с помощью ПОП на основе ранее рассчитанного плана груженых перевозок (календарного плана). Структура информационных потоков для расчета оптимального плана представлена на рис. 5.

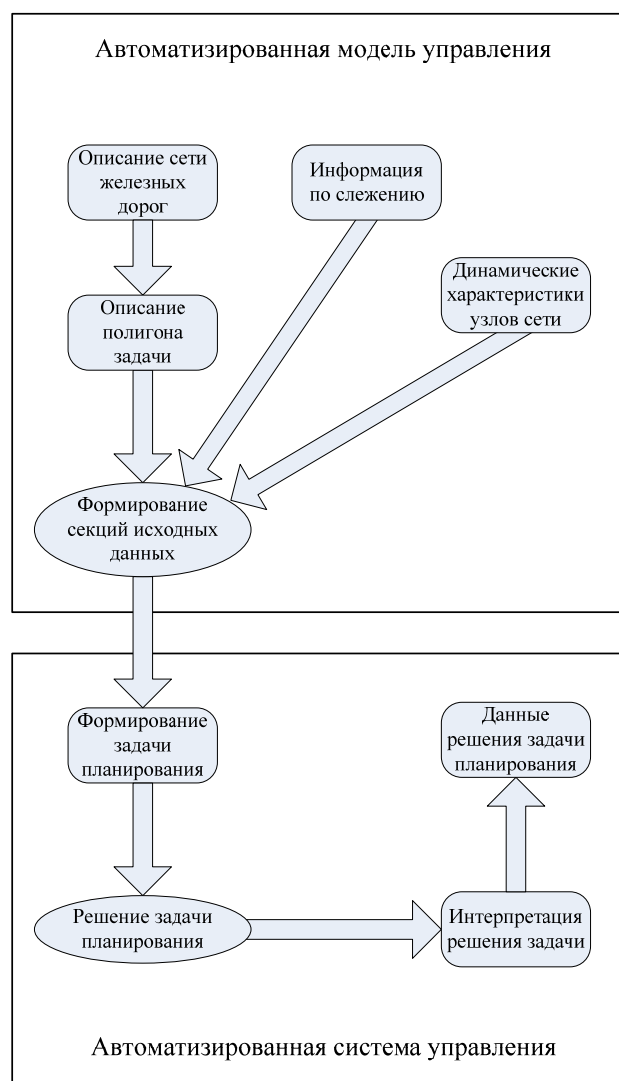


Рис. 5. Структура информационных потоков.

Слежение за продвижением маршрутов осуществляется по графику исполненного движения. Контроль и анализ с использованием ПКДА ДКМ.

**В четвертой главе** обосновано применение имитационной модели для проверки реализуемости плана подвода порожних маршрутов к пунктам погрузки, проводится оценка адекватности применения автоматизированного управления перевозками массовых грузов кольцевыми маршрутами, исследуется эффективность автоматизированного управления АСУ ДКМ.

Оптимизационные модели в значительной степени абстрактны и отображают объект с известным приближением. Нерассмотренные ограничения можно учесть с помощью имитационной модели, которая позволяет исследовать закономерности функционирования объекта с учетом трудно формализуемых конкретных особенностей: схемы путевого развития, принятой технологии, парка локомотивов и вагонов.

Структура управляющей подсистемы состоит из двух частей: решающей и проверяющей. В решающей части находится оптимизационная модель, базирующаяся на динамической транспортной задаче с задержками в кольцевой постановке, позволяющая найти оптимальную в динамике схему потоков. В проверяющей части используется имитационная модель, построенная с

помощью имитационной системы «ИСТРА», которая подробно имитирует работу объекта и проверяет реализуемость оптимальной схемы работы. Схематично структуру управляющей подсистемы можно представить следующим образом, см. рис. 6.

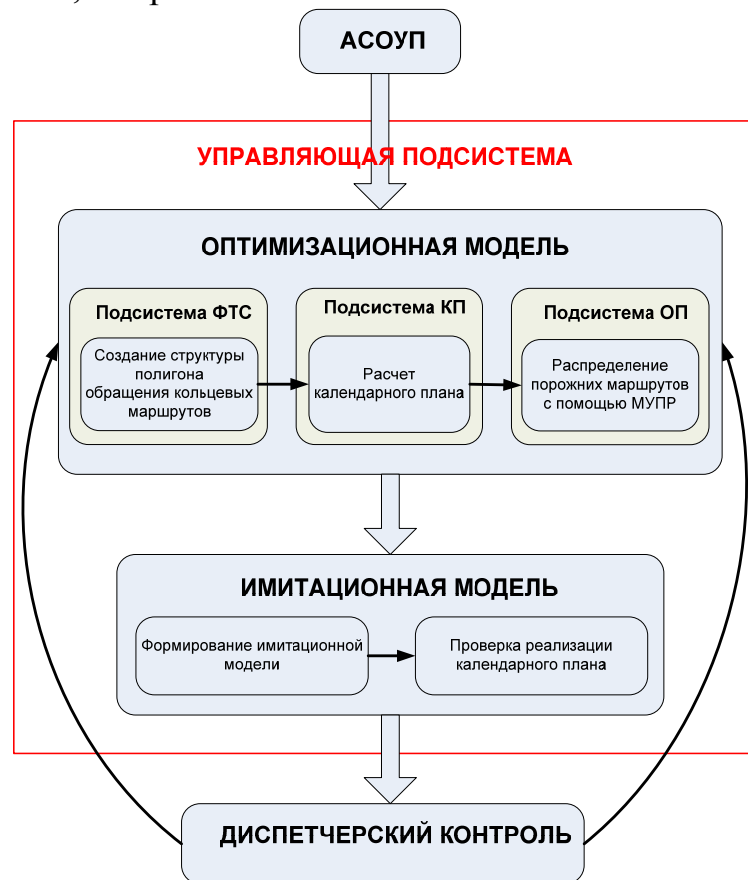


Рис. 6. Структура АСУ ДКМ.

Взаимодействие двух частей управляющей подсистемы показано на рис.

7.



Рис. 7. Функции управляющей подсистемы.

В задачу исследования входила разработка принципов и методики автоматизированного построения модели управления кольцевыми маршрутами на основе динамической транспортной задачи в кольцевой постановке. Оценку

экономического эффекта от автоматизированного управления будем проводить путем сравнительного анализа показателей работы, полученных при ручном управлении с результатами, полученными при использовании АСУ ДКМ.

Ручное управление характеризуется тем, что диспетчер старается максимально точно выполнить план, составленный по заявкам грузоотправителей. При этом управление маршрутами не обеспечивает выбора назначения каждого маршрута из условия оптимальности плана в целом. Так как назначения этого плана выбирались изолированно, то его можно улучшить, применив транспортную задачу с задержками в кольцевой постановке для получения оптимальной схемы обеспечения станций погрузки порожними составами.

Управление, основанное на применении автоматизированной системы, заключается в исполнении построенного подсистемой планирования календарного плана. Календарный план по распределению груженых маршрутов между станциями погрузки и выгрузки составляется на основе заявок на погрузку щебня. Оптимальную схему распределения порожних составов маршрутов получаем, при решении транспортной задачи с задержками в кольцевой постановке с использованием МУПР.

Для сравнения приведем основные показатели работы по вариантам на интервале декады в установившемся режиме работы, см. табл. 1.

Таблица 1. Основные показатели работы по вариантам управления

Показатели работы кольцевых маршрутов	1 вариант (ручное управление)	2 вариант (автоматизированное управление)
Затраты маршруто-часов на:		
груженые рейсы	2419	2056
порожние рейсы	2267	1954
на погрузку	2488	2352
на выгрузку	4922	4654
межоперационные простои	1884	867
суммарные на выполнение плана	13980	11883
Средний оборот маршрута, сут.	5,39	4,58
Требуемое число составов в обороте	58	50

Расчеты производились на персональном компьютере на базе процессора «Pentium-IV» с тактовой частотой 2,4 ГГц. Продолжительность одного расчета составляет примерно от 1 до 1,5 часов.

В результате анализа данных таблицы можно сделать вывод, что по числу составов в обороте и суммарным затратам маршруто-часов на перевозки лучшим оказался второй вариант, когда диспетчер осуществляет планирование и управление обращением маршрутов с помощью автоматизированной системы. При выполнении плана перевозок важным показателем является число составов в обороте. Попытка улучшить планирование за счет применения автоматизированной системы позволила оптимизировать назначения маршрутов и сократить число составов в обороте на 15% с 58 до 50 составов. Это позволит на протяжении четырех лет сэкономить при перевозке строительных грузов по рассматриваемому полигону примерно 430,6 млн. руб. в ценах 2006 года. Указанный эффект связан со снижением простоев маршрутов в ожидании грузовых операций за счет согласования движения ДКМ с работой погрузочно-разгрузочных фронтов предприятий, а также сокращением уровня эксплуатационных расходов.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате проведенного исследования решены задачи автоматизированного построения оптимизационной модели и автоматизирован процесс управления кольцевыми маршрутами. В том числе, получены следующие результаты:

1. Процесс перевозок грузов дорожно-кольцевыми маршрутами характеризуется высокой степенью неравномерности. Это вызывает сверхнормативные простои в ожидании грузовых операций. Увеличение времени оборота увеличивает необходимое число маршрутов в обороте. Выбор рациональных вариантов обращения маршрутов между многими поставщиками и потребителями должен осуществляться с помощью специального математического аппарата, позволяющего оптимизировать динамические процессы. Известные модификации транспортных задач имеют недостатки при их использовании для решения задач оптимизации перевозок кольцевыми маршрутами.
2. Разработан вариант динамической транспортной задачи с задержками (ДТЗЗ), где план работы кольцевых маршрутов оптимизируется с учетом их полного оборота между пунктами погрузки и выгрузки. В постановке снимается ограничение на длительность периода расчета, обусловленное сложной пространственно-временной структурой полигона обращения маршрутов. Поскольку в закольцованном варианте ДТЗЗ отсутствует необходимость передачи данных между отдельными расчетами рейсов груженых и порожних маршрутов, создаются лучшие условия для построения автоматизированной системы планирования.

3. В новой постановке ДТЗЗ существуют возможности: оптимизации с учетом доставки с разной скоростью, одновременной оптимизации перевозок разных видов груза, наложения групповых и отдельных ограничений на транспортные связи и отдельные перевозки.
4. Автоматизированная система управления кольцевыми маршрутами должна включать подсистемы:
  - формирования транспортной сети;
  - календарного планирования;
  - оперативного планирования;
  - слежения, контроля и анализа движения ДКМ.
5. Разработана методика автоматизированного представления структуры железнодорожного полигона обращения кольцевых маршрутов в оптимизационной модели планирования. Структуру модели определяет граф сети и его параметры. Календарный план поставок строительных грузов строится на основе алгоритма, позволяющего рассчитывать график работы груженых маршрутов, соответствующий принципам согласованного подвода. График работы груженых маршрутов представляется в модели закольцованной ДТЗЗ, как часть оптимальной схемы обращения маршрутов. На этапе решения закольцованной ДТЗЗ в содержательном плане рассматриваются альтернативы заадресовки порожних маршрутов в пункты погрузки, такой подход в решении общей задачи получил название метода управления погрузочным ресурсом (МУПР).
6. Структура системы автоматизированного управления работой кольцевых маршрутов должна быть двухуровневой и состоять из двух частей. Первая часть, используя потоковую модель строгой оптимизации, рассчитывает оптимальную в динамике схему грузопотоков в виде оперативного плана подвода порожних кольцевых маршрутов к станциям погрузки. Вторая часть имитирует технологический процесс, определяет его показатели и необходимые резервы.
7. Проверка реализуемости плана должна осуществляться на имитационной модели. Для построения модели может быть использована система «ИСТРА». Система, в отличие от оптимизационной модели позволяет описать структуру полигона и технологические операции процесса доставки маршрутов значительно подробнее.
8. На основе указанных результатов разработана и внедрена на Свердловской железной дороге автоматизированная система управления дорожными кольцевыми маршрутами (АСУ ДКМ). Ее применение позволяет повысить качество транспортного обслуживания предприятий, улучшить использование подвижного состава, повысить эксплуатационную надежность железных дорог.

## Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Александров А.Э., Ковалев И.А. Построение автоматизированного процесса управления обращением кольцевых маршрутов // Транспорт Урала, 2007. – № 1(12). – С.41 – 47.
2. Ковалев И.А. Управление кольцевыми маршрутами на железнодорожном полигоне /Организация производственных процессов и их элементов в подразделениях ОАО «Российские железные дороги»: Сб. науч. тр./под ред. В.М. Сай. – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – 102 с.
3. Ковалев И.А. Представление структуры полигона обращения кольцевых маршрутов в элементах модели. – М. – : ВИНТИ, 2006. – 14 с. – Деп. в ВИНТИ 28.07.06, № 1017-B2006.
4. Ковалев И.А. Отображение технологических особенностей процесса обращения кольцевых маршрутов в математической модели. – М. – : ВИНТИ, 2006. – 23 с. – Деп. в ВИНТИ 21.08.06, № 1090-B2006.
5. Пермикин В.Ю., Ковалев И.А. Оптимизация структуры и технологии на базе автоматизированных имитационных моделей //Молодые ученые – транспорту: Тез. докл. научно-техн. конф. – Екатеринбург: УрГАПС, 1999. – С.147 – 148.
6. Александров А.Э., Ковалев И.А. Оптимизация диспетчерского управления перевозочным процессом на железнодорожном полигоне. //Фундаментальные и прикладные исследования – транспорту/Молодые ученые – транспорту: Труды научно-техн.конф. – Екатеринбург: УрГУПС. – Том.2 – 2001. – С.77 – 80.
7. Александров А.Э., Ковалев И.А., Пермикин В.Ю. Выбор рационального варианта работы железнодорожной станции на базе автоматизированных имитационных моделей. //Фундаментальные и прикладные исследования – транспорту/Молодые ученые – транспорту: Труды научно-техн.конф. – Екатеринбург: УрГУПС. – Том.2 – 2001. – С.81 – 86.
8. Александров А.Э., Ковалев И.А. Влияние согласованного подвода поездов на работу припортовой станции //Молодые ученые – транспорту: Труды IV научно-техн. конф. – Екатеринбург: УрГУПС, 2003. – С.275 – 280.

Ковалев Игорь Александрович

Автоматизация процесса управления перевозками массовых грузов кольцевыми  
маршрутами

05.22.08 – Управление процессами перевозок

---

Сдано в набор 18.04.07 г.

Подписано к печати 18.04.07 г.

Формат бумаги 60 x 84 1/16

**Объем 1,5 п.л.**

Заказ

Тираж 100 экз.

---

Типография УрГУПС, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66