

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ВАГОНОПОТОКОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСЧЕТНЫХ ПЕРИОДОВ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Мишкурлов П. Н.¹

*(Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И.Носова, г. Магнитогорск)*

Представлена постановка задачи динамической оптимизации параметров вагонопотоков в железнодорожных транспортных узлах или на путях необщего пользования промышленных предприятий.

Ключевые слова: вагонопоток, железнодорожный транспортный узел, динамическое программирование, период оптимизации, оперативное управление.

Результаты анализа работы железнодорожного транспорта промышленных предприятий показывают, что в течение последних семи лет время нахождения железнодорожных вагонов на путях необщего пользования промышленных предприятий увеличилось в среднем на 20%. Также наблюдается усложнение структуры вагонопотоков в результате возникновения и развития компаний-операторов собственных вагонов и появления большого числа нерегулярных струй вагонопотоков малой мощности [8, 9]. Это приводит к возникновению потерь в среднем до 20-30 млн. рублей для предприятий со среднесуточным вагонооборотом 2 тыс. вагонов в результате перепростоя вагонов и нерационального использования транспортной инфраструктуры [5,6,10,11].

Основная причина возникновения подобных явлений заключается в том, что принятая в настоящее время форма орга-

¹ Павел Николаевич Мишкурлов, аспирант (mishkuroff@mail.ru).

низации управления вагонопотоками недостаточно точно в оперативном режиме учитывает усложнение их структуры [3].

Современным инструментом управления вагонопотоками являются методы динамической оптимизации [1,4,6]. Известный метод «динамического согласования» производства, транспорта и потребления основан на применении многоэтапного (многошагового) подхода при решении задачи оптимизации и представляет собой развитие содержательной постановки задачи линейного программирования в динамическую область, позволяет учитывать распределение объемов производства и потребления во времени, изменение запасов продукта в конечных и промежуточных пунктах [4]. Несовершенством методов динамического согласования является недостаточная точность решения задачи управления вагонопотоками на этапе оперативного планирования, если этапы оптимизации (расчетные периоды) имеют фиксированные границы (продолжительность). В случае возникновения на путях необщего пользования нерегулярных вагонопотоков, отличных от расчетных по мощности и времени обращения, использование фиксированных расчетных периодов приводит к ожиданию вагонопотоков следующего (текущего) периода (рис.1). Задержки в принятии управленческого решения по продвижению нерегулярных вагонопотоков являются причиной увеличения времени оборота вагонов на путях необщего пользования промышленных предприятий.

Для повышения эффективности перевозочного процесса промышленного предприятия необходимо управлять вагонопотоками с момента их появления в железнодорожном транспортном узле до момента «вывода», учитывая возникновение нерегулярных вагонопотоков на этапе оперативного планирования перевозочного процесса. Инструментом принятия решений по управлению вагонопотоками в таких условиях предлагается использовать разработанную математическую модель, основанную на усовершенствованном методе «динамического согласования» и учитывающую изменение длительности расчетных периодов оптимизации.

Задача динамической оптимизации с использованием расчетных периодов переменной длительности формулируется следующим образом. Пусть $Gr = \{P, E\}$ есть связный, неориен-

тированный и не имеющий петель граф, где $P = \{i = 1, \dots, m \mid p_i\}$ – множество вершин (m – количество вершин), $E = \{i, j \mid e_{ij}\}$ – множество дуг (e_{ij} – дуга транспортной сети от начальной вершины p_i до p_j), $[t, t_0]$ – расчетный период переменной длительности, $[0, T]$ – период оптимизации. Отображение $d_{ij}(t)$ и $d_i(t)$ будем называть резервом пропускной способности дуги и вершины соответственно на каждый момент времени t расчетного периода, т.е. каждой дуге e_{ij} сопоставлено неотрицательное число $d_{ij}(t)$, называемое резервом пропускной способности дуги, а каждой вершине p_i сопоставлено неотрицательное число $d_i(t)$, называемое резервом перерабатывающей способности i -ой вершины (рис. 2) [7].

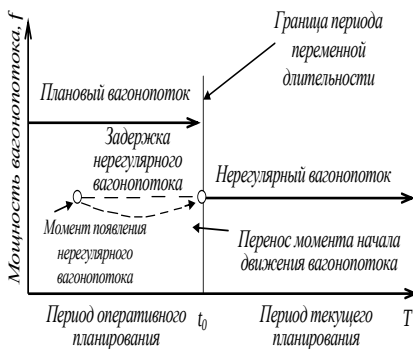
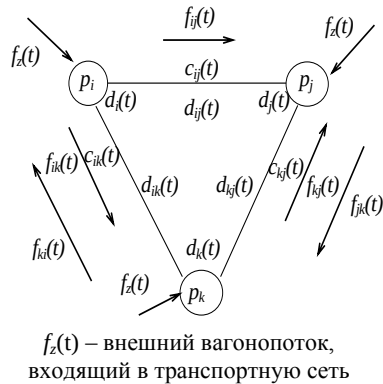


Рис. 1. Схема переноса вагонопотока



$f_z(t)$ – внешний вагонопоток, входящий в транспортную сеть

Рис. 2. Фрагмент транспортной сети

Таким образом, $D_{ij} = \{d_{ij}(t) \mid i \in [1, n], j \in [1, n]\}$ – множество резервов пропускных способностей дуг и $D_i = \{d_i(t) \mid i \in [1, n]\}$ – множество резервов перерабатывающих способностей вершин, где $d_{ij}(t), d_i(t) \in \mathbb{R}^+$ есть значения резервов пропускных способностей дуги и i -ой вершины, определенных на множестве действительных неотрицательных чисел. Тогда $G = \{P, E, D_{ij}, D_i\}$ есть транспортная сеть.

Отображение $f_{ij}(t)$ будем называть вагонопоток в дуге i из начальной вершины p_i в конечную вершину p_j , а $F_{ij} = \{i \in [1, n], j \in [1, n] \mid f_{ij}(t)\}$ – есть множество вагонопотоков в дугах сети G , где $f_{ij}(t) \in \mathbb{R}^+$ – значения вагонопотока, определенные на множе-

стве действительных неотрицательных чисел, $c_{ij}(t)$ – затраты на движение единицы мощности вагонопотока $f_{ij}(t)$.

Пусть величина мощности вагонопотока $f_{ij}(t)$ имеет случайный разброс, тогда в каждый момент отправления t оно будет $f_{ij}(t) \pm y_i(t)$, где $y_i(t)$ – случайная величина. В этом случае (рис. 4), если мощность вагонопотока будет $(f_{ij}(t) - y_i(t))$, возникают потери в результате нерационального использования транспортной инфраструктуры. Следовательно, маршрут движения вагонопотока целесообразно скорректировать, выбрать и учесть на этапе оперативного планирования маршрут, удовлетворяющий условию $f_{ij}(t) \leq d_{\min}$, где $d_{\min}$ – граница поля допуска, т.е. минимальный резерв пропускной $d_{ij}(t)$ и перерабатывающей $d_i(t)$ способности дуг и вершин транспортной сети на каждом маршруте движения вагонопотока.

Однако в этом случае необходимо учитывать дополнительные затраты, связанные с корректировкой маршрута движения вагонопотока. Таким образом, если мощность вагонопотока будет $(f_{ij}(t) + y_i(t))$, то наблюдаются:

1. Недостаток резерва пропускной способности на маршруте движения вагонопотока, в результате чего возникают дополнительные затраты на корректировку этого маршрута (рис. 3);

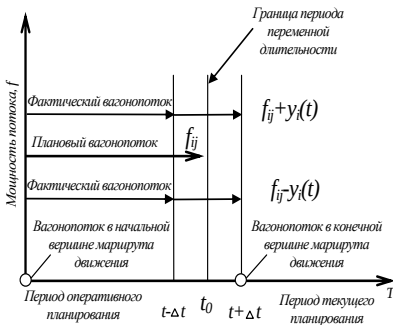


Рис. 3. Схема изменения границы периода оперативного планирования

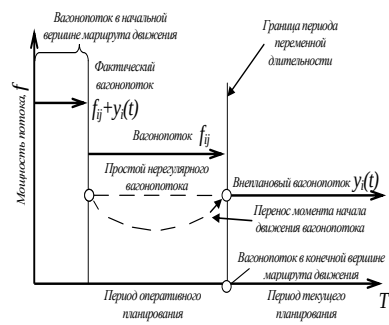


Рис. 4. Схема переноса нерегулярного вагонопотока

2. Потери от простоя нерегулярного вагонопотока мощностью $y_i(t)$ в результате разделения фактического вагонопотока (рис. 4);

3. Затраты при движении нерегулярного вагонопотока мощностью $y_i(t)$ по транспортной сети (рис. 5).

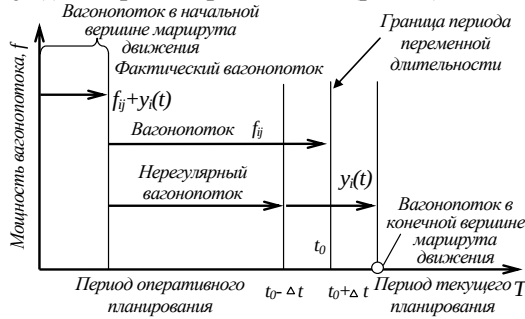


Рис. 5. Схема движения фактического вагонопотока

Требуется найти минимальную сумму затрат на движение, простой и изменение структуры вагонопотоков с учетом дополнительных затрат на корректировку их маршрутов [9]. То есть функционал имеет вид

$$(1) J_1 + J_2 + J_3 + J_4 \rightarrow \min,$$

где транспортные расходы рассчитываются по формуле

$$(2) J_1 = \sum_{t=0}^T \sum_{p_i, p_j \in P} c_{ij}(t) \cdot f_{ij}(t),$$

затраты на задержку регулярного вагонопотока в начальной вершине маршрута его движения

$$(3) J_2 = \sum_{t=0}^T \sum_{p_i, p_j \in P} c_i(t) \cdot f_{ij}(t) \cdot$$

Составляющие J_3 и J_4 зависят от вида и параметров закона распределения. Обозначим границу периода динамической оптимизации моментом t_0 . Если момент завершения движения фактического вагонопотока t произойдет раньше t_0 (т.е. $t < t_0$), то возникают потери от задержки вагонопотока в течение времени $t_0 - t$ в ожидании начала следующего периода оптимизации. В противном случае появляются дополнительные расходы на корректировку маршрута продвижения фактического вагонопотока.

Пусть $c_{1,(i)}$ – единичные потери от задержки фактического вагонопотока в ожидании следующего периода оптимизации, $c_{2,(i,j)}$ – единичные расходы на корректировку маршрута движе-

ния фактического вагонопотока, тогда потери от задержки фактического вагонопотока в ожидании следующего периода оптимизации определяются как

$$(4) J_3 = \sum_{t_0=0}^T f_{ij}(t) \cdot c_{1,(i)}(t_0 - t), t \in [0; t_0],$$

а расходы на корректировку маршрута движения нерегулярного вагонопотока

$$(5) J_4 = \sum_{t_0=0}^T f_{ij}(t) \cdot c_{2,(ij)}(t - t_0) \cdot t \in [t_0; T].$$

Если единичный ущерб от задержки нерегулярного вагонопотока в ожидании следующего периода оптимизации $c_{1,(i)}$ больше единичных затрат на корректировку маршрута движения фактического вагонопотока $c_{2,(ij)}$, то целесообразно корректировать маршруты движения вагонопотоков путем изменения границ периодов динамической оптимизации. Пусть $\varphi(t)$ функция дискретного распределения мощности фактического вагонопотока. Если $c_{1,(i)}$ пропорционален $(t_0 - t)$, то математическое ожидание потерь от задержки вагонопотока в ожидании следующего периода оптимизации будет равно

$$(6) \varphi(t) \cdot c_{1,(i)}(t_0 - t).$$

В случае корректировки маршрута движения фактического вагонопотока математическое ожидание потерь будет равно

$$(7) \varphi(t) \cdot c_{2,(ij)}(t - t_0).$$

Выбор рациональной границы периода динамической оптимизации t_0 предлагается осуществлять на основе решения уравнения

$$(8) \varphi(t) \cdot c_{1,(i)}(t_0 - t) = \varphi(t) \cdot c_{2,(ij)}(t - t_0).$$

Результатом решения уравнения (8) является оптимальное соотношение величины минимальных суммарных затрат $c_{\min}(t_0)$ на задержку вагонопотока в ожидании следующего периода оптимизации и затрат на корректировку маршрута движения фактического вагонопотока (рис. 6)

$$(9) c_{\min}(t_0) = \frac{c_{2,(ij)}(t - t_0)}{c_{1,(i)}(t_0 - t)}.$$

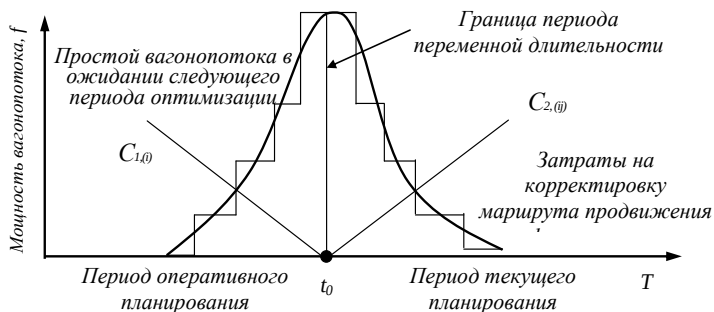


Рис. 6. Определение оптимальной границы периода динамической оптимизации

На целевую функцию (1) накладываются следующие ограничения:

1. Уравнение динамики изменения мощности вагонопотока

$$f_{ij}(t+1) = f_{ij}(t) + y_i(t+1) - y_i(t);$$

2. Начальное и конечное условия задачи

$$f_{ij}(0) = f_{ij}^0 + f_{ij}(t) = 0; \quad y_i(t) = 0;$$

3. Условия неотрицательности переменных

$$f_{ij}(t) \geq 0; \quad i \neq j; \quad y_i(t) \geq 0;$$

4. Ограничения на наличие резервов пропускной способности $0 \leq f_{ij}(t) \leq d_{ij}(t)$, $0 \leq f_{ij}(t) \leq d_i(t) \cdot K_u$, $0 \leq f_{ij}(t) \leq d_{\min}(t)$, где K_u - поправочный коэффициент, учитывающий сложность управления вагонопотоками на железнодорожной станции на основе расчета количества управленческой информации по методике, изложенной в работе [2].

Предлагаемая задача динамической оптимизации, основанная на использовании расчетных периодов переменной длительности, позволяет учитывать в оперативном режиме изменения маршрутов движения вагонопотоков по транспортной сети и влияние этих изменений на величину пропускной способности дуг транспортной сети.

Рассмотрим пример решения задачи динамической оптимизации с использованием предлагаемого способа.

Пусть известны мощности расчетных фактических вагонопотоков $f_{12}(0) = 4$, $f_{12}(10) = 2$, $f_{12}(20) = 2$, $f_{32}(0) = 2$, $f_{23}(13) = 2$, $f_{31}(21) = 1$. Примем расчетный период $[0; T] = 30$, который разделен на периоды оптимизации с границами $t_{0,1} = 10$ мин., $t_{0,2} = 20$ мин., $t_{0,3} = 30$ мин. Схема расчетной транспортной сети представлена на рисунке 7.

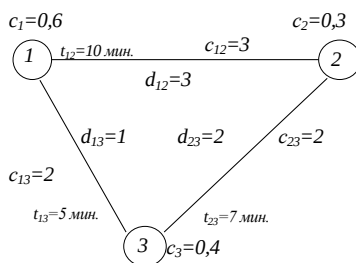


Рис. 7. Расчетная схема транспортной сети

Решение задачи начинается с последнего, третьего, периода оптимизации $[t_{0,2}; T]$. Вагонопотоки на данном периоде: $f_{12}(20) = 2$; $f_{31}(21) = 1$. Предполагается, что вагонопотоки $f_{12}(20)$ и $f_{31}(21)$ регулярные.

Проверка ограничений на наличие резервов пропускной способности элементов транспортной сети по маршрутам движения регулярных вагонопотоков:

$$d_{\min,12} = \min(3) = 3; 0 < f_{12}(20) < 3;$$

$$d_{\min,31} = \min(1) = 1; 0 < f_{31}(21) = 1.$$

Поскольку мощность вагонопотоков $f_{12}(20)$ и $f_{31}(21)$ не превышает пропускную способность, то нет необходимости осуществлять поиск альтернативных маршрутов. В результате движения вагонопотоков $f_{12}(20)$ и $f_{31}(21)$ на третьем периоде оптимизации транспортные расходы составят $J_1=6+2=8$, затраты при задержке регулярного вагонопотока в начальной вершине маршрута его движения $J_2=0$, потери от простоя фактического вагонопотока в ожидании следующего периода оптимизации $J_3=0$, расходы на корректировку маршрута движения нерегулярного вагонопотока $J_4=0$. Суммарные затраты на движение вагонопотоков на третьем периоде оптимизации (формула (1)) составят $J = 8+0+0+0=8$.

Аналогично рассчитываются параметры вагонопотоков на втором периоде, $[t_{0,1}; t_{0,2}]$. Суммарные расходы, с учетом результата на третьем периоде, будут равны 18.

На первом периоде оптимизации $[0; t_{0,1}]$ вагонопоток $f_{12}(0)=4$ является нерегулярным. Проверим ограничение на наличие резервов пропускной способности $f_{32}(0) = 2$; $d_{\min,32} =$

$\min(2) = 2$; $0 < f_{32}(0) = 2$. Поскольку $f_{12}(0) = 4 \neq f_{12}(10) = 3$, следовательно, вагонопоток $f_{12}(0)$ является нерегулярным. Предлагается деление вагонопотока на $f_{12}(0) = 3$ и $y_{12}(0) = 4 - 3 = 1$. В этом случае вагонопоток $f_{12}(0)$ становится регулярным. В результате маршрут движения $f_{12}(0)$ совпадает с маршрутом движения аналогичных вагонопотоков на предыдущих периодах оптимизации, где $d_{\min,12} = \min(3) = 3$; $0 < f_{12}(0) - y_{12}(0) = 3$.

Рассмотрим возможные варианты движения нерегулярного вагонопотока $y_{12}(0)$.

Вариант 1 – движение по стандартному маршруту, запланированному на первом периоде оптимизации по дуге (ij). На первом периоде расчетного маршрута движения вагонопотока $f_{12}(0)$, следовательно, для вагонопотока $y_{12}(0)$ $d_{\min,12} = 0$. Учитывая ограничение на резерв пропускной способности, движение вагонопотока $y_{12}(0)$ возможно только во втором периоде. Следовательно, возникает задержка вагонопотока $y_{12}(0)$ в ожидании следующего периода оптимизации, где суммарные затраты рассчитываются как:

$$J_1 = 3 \cdot 3 + 2 \cdot 2 = 13; \quad J_2 = 0; \quad J_3 = (0,6 \cdot 10) \cdot 1 = 0,6;$$

$$J_4 = 0 \Rightarrow J = 13 + 6 = 19.$$

Вариант 2 – движение по альтернативному маршруту. Проверим ограничения на наличие резервов пропускной способности $d_{\min,132} = \min(1; 2) = 1$, $0 < y_{12}(0) = 1$.

Суммарное время движение вагонопотока $y_{12}(0)$ составляет $t(1,3) + t(2,3) + t(3) = 5 + 7 + 2 = 14$ мин. Время движение вагонопотока $y_{12}(0)$ больше установленной величины периода оптимизации, 10 мин., в результате существует два варианта решения задачи.

Вариант 2.1 – дополнительная задержка нерегулярного вагонопотока $y_{12}(0)$ в вершине 3 в ожидании движения вагонопотока $f_{23}(13)$ по дуге (23). При выборе такого варианта граница периода оптимизации остается неизменной, вагонопоток $y_{12}(0)$ задерживается в вершине 3 в ожидании следующего периода. В результате задержки нерегулярного вагонопотока $y_{12}(0)$ суммарные затраты рассчитываются следующим образом:

$$J_1 = 3 \cdot 3 + 2 \cdot 2 = 13; \quad J_2 = 0; \quad J_3 = 0;$$

$$J_4 = 2 \cdot 1 + (0,4 \cdot (2 + 13)) \cdot 1 + 2 \cdot 1 = 10 \Rightarrow J = 13 + 10 = 23.$$

Вариант 2.2 – задержка регулярного вагонопотока $f_{23}(13)$ в вершине 2 в ожидании движения нерегулярного вагонопотка $y_{12}(0)$ по дуге (23). В этом варианте изменится граница периода оптимизации, в результате повысится точность решения задачи. Таким образом, суммарные затраты рассчитываются следующим образом:

$$J_1 = 3 \cdot 3 + 2 \cdot 2 = 13; \quad J_2 = (0,3 \cdot 1) \cdot 2 = 0,6; \quad J_3 = 0,$$

$$J_4 = 2 \cdot 1 + (0,4 \cdot 2) \cdot 1 + 2 \cdot 1 = 4,8 \Rightarrow J = 13 + 4,8 + 0,6 = 18,4.$$

При выборе варианта 2.1 в качестве оптимального результата решения задачи, где вагонопоток $y_{12}(0)$ задерживается в вершине 3 в ожидании следующего периода оптимизации, суммарные затраты на движение вагонопотоков по транспортной сети составят 37. Однако, при решении задачи на основе использования расчетных периодов переменной длительности (вариант 2.2) повышается точность её решения. Повышение точности достигается в результате увеличения границы периода оптимизации $t_{0,1}$, в этом случае сокращается задержка вагонопотока $y_{12}(0)$ в вершине 3. При выборе варианта 2.2 суммарные затраты на движение вагонопотоков по транспортной сети составят 36,4.

Таким образом, в качестве оптимального варианта решения задачи принимаем: разделение фактического вагонопотока $f_{12}(0)$; корректировку маршрута движения нерегулярного вагонопотока $y_{12}(0)$; изменение границы периода оптимизации $t_{0,1}$. Результат решения задачи динамической оптимизации представлен на рисунке 8, где суммарные затраты на движение вагонопотоков по транспортной сети составляют 36,4.

Пропускная способность дуг транспортной сети	Границы периодов оптимизации:			
	0	14	20	30
	t_0	$t_{0,1}$	$t_{0,2}$	$t_{0,3}$
$d_{12}(t)$	$f_{12}(10)$ 0	0	3	$f_{12}(20)$ 3
$d_{13}(t)$	$f_{12}(0)$ 0	1	1	$f_{12}(21)$ 0
$d_{23}(t)$	$y_{12}(0)$ 0	2	2	$f_{23}(13)$ 2

Рис. 8. Результат решения задачи динамической оптимизации с расчетными периодами переменной длительности

Реализация разработанной математической модели в рамках информационных систем на железнодорожном транспорте позволит руководителям перевозочного процесса корректировать маршруты продвижения вагонопотоков на путях необщего пользования промышленных предприятий или в железнодорожных транспортных узлах, что приведет к ускорению продвижения вагонопотоков в условиях усложнения их структуры и растущего объема грузовых перевозок.

Литература

1. АЛЕКСАНДРОВ А.Э. ЯКУШЕВ Н.В. *Стохастическая постановка динамической транспортной задачи с задержками с учетом случайного разброса времени доставки и времени потребления* / Управление большими системами. – Выпуск 12-13. -М.: ИПУ РАН, 2006. - С. 5–14.

2. БАГИНОВА В.В., РАХМАНГУЛОВ А.Н., МИШКУРОВ П.Н. *Методика оценки организационной структуры оперативного управления вагонопотоками на путях необщего пользования* / Транспорт: наука, техника, управление, 2012. №2. - С. 19-22.

3. БАГИНОВА В.В., РАХМАНГУЛОВ А.Н., ОСИНЦЕВ Н.А. *Контроль вагонопотоков на пути необщего пользования* // Мир транспорта. -2010. -Вып. 3 (31). - С. 108-113.

4. КОЗЛОВ П.А., МИЛОВИДОВ С.П. *Метод динамического согласования производства и транспорта*: Сб. тр. ИКТП. – Выпуск 105. - М., 1985. - С. 156-163.

5. КОЗЛОВ П.А., ОСОКИН О.В., ПЕРМИКИН В.Ю. *Автоматизированное управление процессами в транспортном узле* // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, 2013. №2. - С. 118-122.

6. МИЛОВИДОВ С.П., КОЗЛОВ П.А. *Динамическая транспортная задача с задержками в сетевой постановке* // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика., 1982. № 1. - С. 211-212.

7. МИШКУРОВ П.Н. *Постановка динамической транспортной задачи с учетом изменения границ расчетных периодов* // Актуальные проблемы современной науки, техники и

образования: материалы 68-й межрегиональной научно-технической конференции. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. №1. - С. 199-202.

8. МИШКУРОВ П.Н. *Энерго- и ресурсосбережение промышленных предприятий на основе рационального управления вагонопотоками* // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международной научно-технической конференции. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. - С. 162-167.

9. РАХМАНГУЛОВ А.Н., МИШКУРОВ П.Н. *Проблемы использования методов динамического программирования при управлении вагонопотоками* // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2012. №2. - С. 279-285.

10. РАХМАНГУЛОВ А.Н., МИШКУРОВ П.Н. *Повышение энергоэффективности промышленного железнодорожного транспорта на основе динамической оптимизации параметров вагонопотоков* // Сборник научных трудов SWorld. 2012. – Выпуск 3. Том 1. - С. 86-91.

11. РАХМАНГУЛОВ А.Н., ОСИНЦЕВ Н.А. *Оценка резервов пропускной и перерабатывающей способности технологических железнодорожных станций с использованием теории нечетких множеств*//Вестник транспорта Поволжья. -2011. - Вып. 1 (23). - С. 45а-49.

12. ТРОФИМОВ С.В., РАХМАНГУЛОВ А.Н. *Выбор оптимальных методов оперативного управления работой промышленных транспортных систем*: Монография. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И.Носова, 2000. - 145 с.

IMPROVING ACCURACY OF RAILWAY CAR TRAFFIC DYNAMIC OPTIMIZATION BASED ON VARYING LENGTHS SETTLEMENT PERIODS USAGE

Pavel N. Mishkurov, Magnitogorsk state technical university named after G.I.Nosov, Magnitogorsk, postgraduate (mishkuroff@mail.ru).

Abstract: The problem statement of railroad car traffic volume parameters dynamic optimization as well as parameters structure

and movement routes changing algorithm for railway transport hubs or industrial enterprises railroad conditions are presented.

Keywords: railway car traffic, rail transportation hub, dynamic programming, optimization period, operational management.