

Оптимизация внутризаводских перевозок по контактному графику



Алексей ПОПОВ
Alexey T. POPOV

Ольга СУСЛОВА
Olga A. SUSLOVA



Ольга ВОРОНИНА
Olga V. VORONINA

Попов Алексей Тимофеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации перевозок Липецкого государственного технического университета (ЛГТУ), Липецк, Россия. Суслова Ольга Анатольевна – кандидат технических наук, доцент ЛГТУ, Липецк, Россия. Воронина Ольга Вадимовна – аспирант ЛГТУ, Липецк, Россия.

Optimization of Plant Internal Transportation According to the Contact Schedule

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 171)

Представленная статья является продолжением исследований по разработке альтернативной модели организации перевозок по контактному графику в условиях металлургического предприятия.

В основу математической модели положена динамическая транспортная задача с задержками (ДТЗЗ). Показано, каким путём получается оптимальный план перевозок и обеспечивается минимизация транспортных расходов при согласованных производственных программах цехов-поставщиков и цехов-потребителей.

Ключевые слова: динамическая транспортная задача с задержками, внутризаводские перевозки, оптимизация перевозок, контактный график, металлургический комбинат, железнодорожный транспорт.

Особенностью металлургического предприятия является наличие устойчивой и непрерывной связи между производственным процессом и транспортными потоками [1]. Транспорт выступает связующим звеном в ходе производства металлургической продукции. Готовая продукция одних подразделений становится сырьём для других (перевозка жидкого чугуна, стали, шлака) [2]. С агломерационной фабрики в доменные цеха поступает агломерат, с коксохимического производства или с внешней сети – кокс, с той же сети – известняк (используется в качестве флюса). Жидкий чугун вместе со скрапом, известью и доломитом направляются в сталеплавильные цеха. Затем сталь транспортируется на установки непрерывной разливки и далее на прокатные станы. Свой оборот имеют и многочисленные виды отходов [3, 4].

В структуре транспортных потоков по контактному графику чётко выделяются мощные однородные струи агломерата, отходов производства: отсева агломерата, от-

вагонов; $X_j^B(t)$ – количество вагонов с грузом, находящихся в резерве на B_j ; t_{ji} – технологические задержки (время погрузки/выгрузки, межоперационные простои) на A_i и B_j .

В основу математической модели положена модификация ДТЗЗ, разработанная в [5–7]. Оптимальный план перевозок получим путём минимизации транспортных расходов при согласованных производственных программах цехов-поставщиков и цехов-потребителей $J = J_1 + J_2$.

$$J_1 = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y S_{ij}^*(t) \cdot v_{ij}^*(t) \cdot \Delta t + \sum_{t=0}^T \sum_{j=1}^y S_j^B(t) \cdot X_j^B(t) \cdot \Delta t, \quad (1)$$

$$J_2 = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y S_{ji}^{**}(t) \cdot v_{ji}^{**}(t) \cdot \Delta t + \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^x S_i^A(t) \cdot X_i^A(t) \cdot \Delta t \quad (2)$$

при условии соблюдения следующих ограничений:

- динамики запасов порожних вагонов:

$$X_i^A(t+1) = X_i^A(t) + \sum_{j=1}^y v_{ji}^{**}(t - t_{ji}) - Z_i^A(t); \quad (3)$$

- динамики запасов гружёных вагонов:

$$X_j^B(t+1) = X_j^B(t) + \sum_{i=1}^x v_{ij}^*(t - t_{ij}) - Z_j^B(t); \quad (4)$$

- процесса перехода порожних вагонов в вагоны с грузом:

$$Z_i^A(t - t_{ii}) = \sum_{j=1}^y v_{ij}^*(t); \quad (5)$$

- процесса перехода гружёных вагонов в порожние:

$$Z_j^B(t - t_{jj}) = \sum_{i=1}^x v_{ji}^{**}(t); \quad (6)$$

- неотрицательности резервов и объёмов подач $v_{ij}^*(t) \geq 0$; $t + t_{ij} \leq T$; $X_j^B(t) \geq 0$; $v_{ji}^{**}(t) \geq 0$; $t + t_{ji} \leq T$; $X_i^A(t) \geq 0$.

В пункты производства и потребления A_i и B_j вагоны не пребывают в интервалах времени $[0; \min t_{ji} - 1]$ и $[0; \min t_{ij} - 1]$. Согласно равенству (5) в пунктах A_i резервы вагонов с грузом не образуются, согласно равенству (6) дополнительные резервы порожних вагонов в пунктах B_j не появляются. По истечении времени t_{ii} заканчивается

погрузка вагонов $Z_i^A(0)$ на A_i , по истечении времени t_{jj} – выгрузка вагонов $Z_j^B(0)$ на B_j . Отправление из A_i заканчивается в момент времени $t = T - \min t_{ij}$, а из B_j – в момент $t = T - \min t_{ji}$. Выражение (5) действительно в интервале времени $[t_{ii}; T - \min t_{ij}]$, выражение (6) верно для интервала времени $[t_{jj}; T - \min t_{ji}]$.

В момент времени $t_2 = \min(t_{jj} + t_{ji})$ на A_i прибывают выгруженные на B_j вагоны. В $t_1 = \min(t_{ii} + t_{ij})$ на B_j прибывают первые загруженные на A_i вагоны. Условия динамики запасов порожних и гружёных вагонов (3) и (4) указаны для временных интервалов $[t_2, T]$ и $[t_1, T]$.

В промежутках времени $[0; t_2 - 1]$ и $[0; t_1 - 1]$ поставок не происходит, и пункты A_i и B_j должны функционировать за счёт собственных резервов:

$$X_i^A(0) = \sum_{t=0}^{t_2-1} Z_i^A(t), \quad X_j^B(0) = \sum_{t=0}^{t_1-1} Z_j^B(t).$$

Примем, что $X_i^A(t_2) = X_j^B(t_1) = 0$. Пункты A_i и B_j связаны единым замкнутым технологическим процессом с момента прибытия подвижного состава с других производственных цехов $[\min(t_{ij} + t_{ji}); T - t_{ii} - \min t_{ij}]$ и до окончания технологических операций в рассматриваемом цехе $[\min(t_{ii} + t_{ij}); T - t_{jj} - \min t_{ji}]$.

Из уравнений динамики запасов гружёных вагонов (4) и перехода порожних вагонов в вагоны с грузом (5) следует:

$$\sum_{j=1}^y \sum_{t=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_j^B(t) \leq \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y \sum_{t=0}^{\delta-t_{ii}-t_{ij}} Z_i^A(t). \quad (7)$$

Выражение (7) означает, что в предыдущий момент времени $(\delta - t_{ii} - t_{ij})$ потребность в порожних вагонах больше или равна потребности в гружёных вагонах в последующий момент времени δ . Аналогично из уравнений динамики запасов порожних вагонов (3) и перехода гружёных вагонов в порожние вагоны (6) получим:

$$\sum_{i=1}^x \sum_{t=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_i^A(t) \leq \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y \sum_{t=0}^{\delta-t_{jj}-t_{ji}} Z_j^B(t). \quad (8)$$

Для промежутка времени $\delta \in [0, T]$ одновременное выполнение условий $\delta > t_{ii} + t_{ij}$; $\delta > t_{jj} + t_{ji}$; $\delta - t_{ii} - t_{ij} > \min(t_{ij} + t_{ji})$; $\delta - t_{jj} - t_{ji}$

Внутризаводские перевозки по обслуживанию ДЦ-1 и КХП

№ графика	Наименование груза	Станция отправления	Станция назначения	Род вагона
24	колошниковая пыль	Доменная	Заводская	п/в
24	аспирационная пыль	Доменная	Заводская	п/в
28	коксовая мелочь	Сырьевая	Заводская	п/в
29	коксовая мелочь	Сырьевая	Заводская	п/в
31	коксовая пыль	Сырьевая	Заводская	п/в
32	коксовая пыль	Сырьевая	Заводская	п/в
30	коксовые отходы	Сырьевая	Заводская	п/в
15	коксовые отходы	Сырьевая	Заводская	п/в
33	коксовые отходы	Доменная	Заводская	п/в
36	отсев агломерата, окатышей	Сырьевая	Агломератная	хоппер

$> \min(t_{ij} + t_{ji})$ обеспечивает обмен между цехами-поставщиками и цехами-потребителями. Из неравенств (7) и (8) следует:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^x \sum_{t=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_i^A(t) \leq \\ & \leq \sum_{j=1}^y \left(\sum_{t=0}^{\min(t_{ij}+t_{ji})} Z_j^B(t) + \sum_{t=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_j^B(t) \right) \leq \\ & \leq \sum_{j=1}^y X_j^B(0) + \sum_{j=1}^y \sum_{t=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_j^B(t) \leq \\ & \leq \sum_{j=1}^y X_j^B(0) + \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} & + \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y \sum_{t=0}^{\delta-t_{ij}-t_{ji}} Z_i^A(t); \\ & \sum_{j=1}^y \sum_{t=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_j^B(t) \leq \sum_{i=1}^x X_i^A(0) + \\ & + \sum_{i=1}^x \sum_{t=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_i^A(t) \leq \\ & \leq \sum_{i=1}^x X_i^A(0) + \sum_{j=1}^y \sum_{i=1}^x \sum_{t=0}^{\delta-t_{ij}-t_{ji}} Z_j^B(t). \end{aligned} \tag{10}$$

Эти неравенства (9) и (10) показывают наличие согласованной связи единого технологического процесса с производственными программами:

$$\sum_{i=1}^x \sum_{t=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_i^A(t) - \sum_{j=1}^y \sum_{t=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_j^B(t) \leq \sum_{j=1}^y X_j^B(0); \tag{11}$$

$$\sum_{j=1}^y \sum_{t=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_j^B(t) - \sum_{i=1}^x \sum_{t=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_i^A(t) \leq \sum_{i=1}^x X_i^A(0). \tag{12}$$

Из неравенств (11) и (12), полученных из выражений (9) и (10), следует, что первоначальные резервы обладают весьма значительным сглаживающим эффектом, позволяющим выходить из ситуаций, в которых программы цехов-поставщиков и цехов-потребителей не согласованы.

В моделируемой ситуации принимаем, что количество вагонов с грузом, находящихся в резерве на B_j , и запас порожних вагонов на A_i равны нулю.

В случае, когда гружёные или порожние вагоны поступают в пункт назначения без временных задержек $t_{jn} - t_{im} \geq t_{ij}$, транспортно-производственные расходы находим по формуле:

$$S(C(A_{im}, B_{jn})) = S_{ij} + S_j^X \cdot (t_{jn} - t_{im} - t_{ij}), \tag{13}$$

где $C(A_{im}, B_{jn})$ – связи между цехами-поставщиками и цехами-потребителями;

S_{ij} – стоимость транспортировки единицы подвижного состава от i -го цеха-производителя до j -го цеха-потребителя;

S_j^X – затраты на хранение единицы подвижного состава в течение единицы времени y -го цеха-потребителя;

$(t_{jn} - t_{im} - t_{ij})$ – время нахождения продукции в резерве;

$(t_{jn} - t_{im})$ – интервал времени между моментом производства груза и моментом его потребления [8].

Формула (13) позволяет учитывать расходы на транспортировку единицы продукции S_{ij} и транспортно-производственные затраты, приходящиеся на простой вагонов и хранение грузов в течение времени $(t_{jn} - t_{im} - t_{ij})$ до момента возникновения спроса на них цехом-потребителем.



Внутризаводские перевозки по обслуживанию ДЦ-2

№ графика	Наименование груза	Станция отправления	Станция назначения	Род вагона
50 (ДП-6)	колошниковая пыль	Южная	Заводская	п/в
50 (ДП-7)	колошниковая пыль	Северная	Заводская	п/в
50 (ДП-6)	аспирационная пыль	Южная	Заводская	п/в
50 (ДП-7)	аспирационная пыль	Южная	Заводская	п/в
5	коксовые отходы	Южная	Заводская	п/в
36	отсев агломерата, окатышей	Южная	Агломератная	хоппер

Таблица 3

Время начала погрузки грузов и количество спроса на порожние вагоны под погрузку отсеков в сутки

Потребитель	Цеха-потребители порожних вагонов	Количество выпусков в сутки					
		1	2	3	4	5	6
B1	ДЦ-1 (24 – колошниковая пыль)	8–30	–	–	–	–	–
B2	ДЦ-1 (24 – аспирационная пыль)	12–00	–	–	–	–	–
B3	ДЦ-1 (33 – коксовые отходы)	11–30	–	–	–	–	–
B4	КХП (28 – коксовая мелочь)	01–00	09–00	17–00	–	–	–
B5	КХП (29 – коксовая мелочь)	01–00	05–00	09–00	13–00	17–00	21–00
B6	ДЦ-1 (30 – коксовые отходы)	02–00	10–00	18–00	–	–	–
B7	ДЦ-1 (15 – коксовые отходы)	13–30	01–30	–	–	–	–
B8	КХП (31 – коксовая пыль)	10–00	–	–	–	–	–
B9	КХП (32 – коксовая пыль)	17–00	–	–	–	–	–
B10	ДЦ-1 (36 – отсев агломерата с ДП-5)	13–30	01–30	–	–	–	–
B11	ДЦ-1 (36 – отсев агломерата с ДП-3,4)	02–00	10–00	18–00	–	–	–

В случае, когда гружёные или порожние вагоны поступают на фронт погрузки/выгрузки с опозданием на время $(t_{im} + t_{ij} - t_{jn})$, транспортно-производственные затраты находим по формуле:

$$S(C(A_{im}, B_{jn})) = S_{ij} + S_j^o \cdot (t_{im} + t_{ij} - t_{jn}), \quad (14)$$

где S_j^o – стоимость затрат j -го цеха-потребителя из-за несвоевременного прибытия единицы подвижного состава;

$(t_{im} + t_{ij} - t_{jn})$ – время опоздания продукции к моменту спроса на неё [8].

Формула (14) позволяет учитывать потери производства из-за несвоевременной подачи порожних или гружёных вагонов на погрузо-разгрузочные фронты в соответствии с потребностями производства.

Определяющим моментом для построения начального плана перевозок служит ответ на вопрос: является ли требующая решения задача закрытой? Ответить помогает уравнение статического баланса объёмов (мощностей) производства и потребления [8]:

$$\sum_{i=1}^x \sum_{m=1}^{k_i} a_i(t_{im}) = \sum_{j=1}^y \sum_{n=1}^{l_j} b_j(t_{jn}). \quad (15)$$

Если равенство (15) выполняется, то задача считается закрытой, в противном случае – открытой, что, в свою очередь, требует приведения её к закрытому виду. Осуществить это можно путём введения в условия транспортной задачи фиктивного поставщика или потребителя [9].

Фиктивный поставщик – условный цех-производитель $a_{i+j}(t_{im})$ с объёмом поставок, идентичным недостающему количеству для выполнения равенства (15).

Фиктивный потребитель – условный цех-потребитель $b_{j+j}(t_{jn})$ с объёмом потребления, равным недостающему количеству для выполнения равенства (15).

Фиктивный поставщик/потребитель не меняет решения транспортной задачи, не «ломает» её. Введение фиктивных поставщиков или потребителей с нулевыми показателями затрат даёт возможность одно-

Таблица 4

Объёмы производства в сутки (в вагонах) для КХП и ДЦ-1

Цеха-поставщики	Количество выпусков в сутки					
	1	2	3	4	5	6
ДЦ-1 (24 – колошниковая пыль)	1–9	–	–	–	–	–
ДЦ-1 (24 – аспирационная пыль)	1	–	–	–	–	–
ДЦ-1 (33 – коксовые отходы)	1–2	–	–	–	–	–
КХП (28 – коксовая мелочь)	1–2	1–2	1–2	–	–	–
КХП (29 – коксовая мелочь)	1–2	1–2	1–2	1–2	1–2	1–2
КХП (31 – коксовая пыль)	1	–	–	–	–	–
КХП (32 – коксовая пыль)	1	–	–	–	–	–
ДЦ-1 (30 – коксовые отходы)	1–4	1–4	1–4	–	–	–
ДЦ-1 (15 – коксовые отходы)	1–4	1–4	–	–	–	–
ДЦ-1 (36 – отсев агломерата с ДП-5)	1–7	1–7	–	–	–	–
ДЦ-1 (36 – отсев агломерата с ДП-3,4)	1–7	1–7	1–7	–	–	–

Таблица 5

Время начала выгрузки грузов и количество предложений порожних вагонов под погрузку отсевов в сутки

Поставщик	Цеха-поставщики порожних вагонов	Количество предложений порожних вагонов под погрузку отсевов					
		1	2	3	4	5	6
A1	АГП (24 – колошниковая пыль)	23–00	06–00	–	–	–	–
A2	АГП (24 – аспирационная пыль)	23–00	–	–	–	–	–
A3	АГП (33 – коксовые отходы)	16–30	–	–	–	–	–
	АГП (28 – коксовая мелочь)	06–00	16–30	–	–	–	–
	АГП (29 – коксовая мелочь)	06–00	16–30	–	–	–	–
	АГП (31 – коксовая пыль)	06–00	16–30	–	–	–	–
	АГП (32 – коксовая пыль)	06–00	16–30	–	–	–	–
	АГП (30 – коксовые отходы)	06–00	16–30	–	–	–	–
A4	АГП (36 – отсев агломерата с ДП-5)	06–30	18–30	–	–	–	–
	АГП (36 – отсев агломерата с ДП-3,4)	00–30	06–30	12–30	–	–	–

x (кол-во вагонов в подаче)

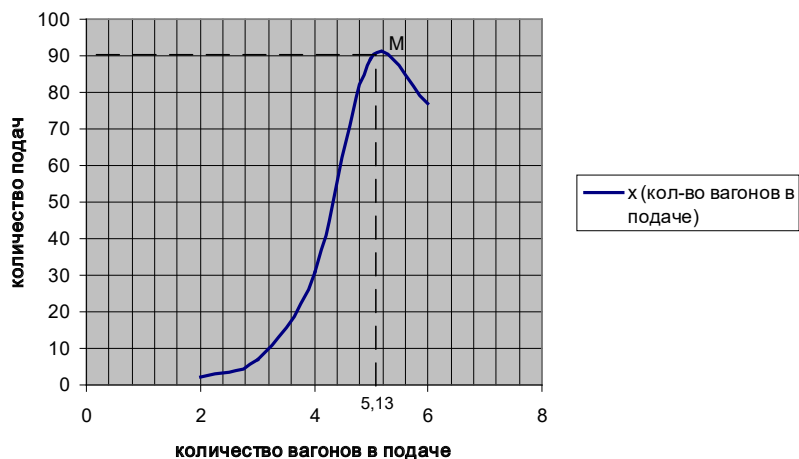


Рис. 2. Выборка по актам для контактного графика № 36 – отсев агломерата, окатышей с ДЦ-1 (ДП-3,4) при погрузке.



Объёмы спроса в сутки (в вагонах) для КХП и ДЦ-1

Цеха-потребители	Количество спроса на гружёные вагоны					
	1	2	3	4	5	6
АГП (24 – колошниковая пыль)	1–4	3–9	–	–	–	–
АГП (24 – аспирационная пыль)	1	–	–	–	–	–
АГП (33 – коксовые отходы)	1–2	–	–	–	–	–
АГП (28 – коксовая мелочь)	9–22	7–18	–	–	–	–
АГП (29 – коксовая мелочь)	9–22	7–18	–	–	–	–
АГП (31 – коксовая пыль)	9–22	7–18	–	–	–	–
АГП (32 – коксовая пыль)	9–22	7–18	–	–	–	–
АГП (30 – коксовые отходы)	9–22	7–18	–	–	–	–
АГП (15 – коксовые отходы)	9–22	7–18	–	–	–	–
АГП (36 – отсев агломерата с ДП-5)	2–15	1–10	–	–	–	–
АГП (36 – отсев агломерата с ДП-3,4)	5–15	2–15	5–15	–	–	–

Таблица 7

Время начала погрузки грузов и количество спроса на порожние вагоны под погрузку отсевов в сутки

Потребитель	Цеха-потребители порожних вагонов	Количество выпусков в сутки					
		1	2	3	4	5	6
V12	ДЦ-2 (50 – колошниковая пыль с ДП-6)	13–00	–	–	–	–	–
V13	ДЦ-2 (50 – колошниковая пыль с ДП-7)	12–01	–	–	–	–	–
V14 (1 грузовой фронт); V15 (2 грузовой фронт)	ДЦ-2 (50 – аспирационная пыль с ДП-6)	12–00	12–00	–	–	–	–
V16 (1 грузовой фронт); V17 (2 грузовой фронт)	ДЦ-2 (50 – аспирационная пыль с ДП-7)	12–30	12–30	–	–	–	–
V18	ДЦ-2 (5 – коксовые отходы с ДП-6)	00–30	06–30	12–30	18–30	–	–
V19	ДЦ-2 (5 – коксовые отходы с ДП-7)	01–00	05–00	09–00	13–00	17–00	21–00
V20	ДЦ-2 (36 – отсев агломерата, окатышей ДП-6)	00–30	06–30	12–30	18–30	–	–
V21	ДЦ-2 (36 – отсев агломерата, окатышей ДП-7)	01–00	05–00	09–00	13–00	17–00	21–00

Примечание: ячейки, выделенные цветом, означают, что погрузка производится одновременно на разных грузовых фронтах, разных путях.

Таблица 8

Объёмы производства в сутки (в вагонах)

Цеха-поставщики	Количество выпусков в сутки					
	1	2	3	4	5	6
ДЦ-2 (50 – колошниковая пыль с ДП-6)	1–3	–	–	–	–	–
ДЦ-2 (50 – колошниковая пыль с ДП-7)	1–3	–	–	–	–	–
ДЦ-2 (50 – аспирационная пыль с ДП-6)	1–3	1–3	–	–	–	–
ДЦ-2 (50 – аспирационная пыль с ДП-7)	1–3	1–3	–	–	–	–
ДЦ-2 (5 – коксовые отходы с ДП-6)	1–4	1–4	1–4	1–4	–	–
ДЦ-2 (5 – коксовые отходы с ДП-7)	2–5	2–5	2–5	2–5	2–5	2–5
ДЦ-2 (36 – отсев агл-та, окатышей ДП-6)	4–8	4–8	4–8	4–8	–	–
ДЦ-2 (36 – отсев агл-та, окатышей ДП-7)	5–8	5–8	5–8	5–8	5–8	5–8

Таблица 9

Время начала выгрузки грузов и количество предложений порожних вагонов под погрузку отсевов в сутки

Поставщик	Цеха-поставщики порожних вагонов	Количество предложений порожних вагонов под погрузку отсевов					
		1	2	3	4	5	6
A5	АГП (50 – колошниковая пыль с ДП-6, 7)	23–00	–	–	–	–	–
A6	АГП (50 – аспирационная пыль с ДП-6, 7)	03–30	–	–	–	–	–
A7	АГП (5 – коксовые отходы с ДП-6, 7)	03–30	15–30	–	–	–	–
A8	АГП (36 – отсева агломерата, окатышей ДП-6)	03–30	10–00	15–30	22–00	–	–
	АГП (36 – отсева агломерата, окатышей ДП-7)	03–30	10–00	15–30	22–00	–	–

Таблица 10

Объёмы спроса в сутки (в вагонах)

Цеха-потребители	Количество спроса на гружёные вагоны					
	1	2	3	4	5	6
АГП (50 – колошниковая пыль с ДП-6, 7)	2–6	–	–	–	–	–
ДЦ-2 (50 – аспирационная пыль с ДП-6, 7)	4–12	–	–	–	–	–
АГП (5 – коксовые отходы с ДП-6, 7)	8–23	8–23	–	–	–	–
АГП (36 – отсева агл-та, окатышей ДП-6)	9–15	10–15	9–15	10–15	–	–
АГП (36 – отсева агл-та, окатышей ДП-7)	9–15	10–15	9–15	10–15	–	–

x (кол-во вагонов в подаче)

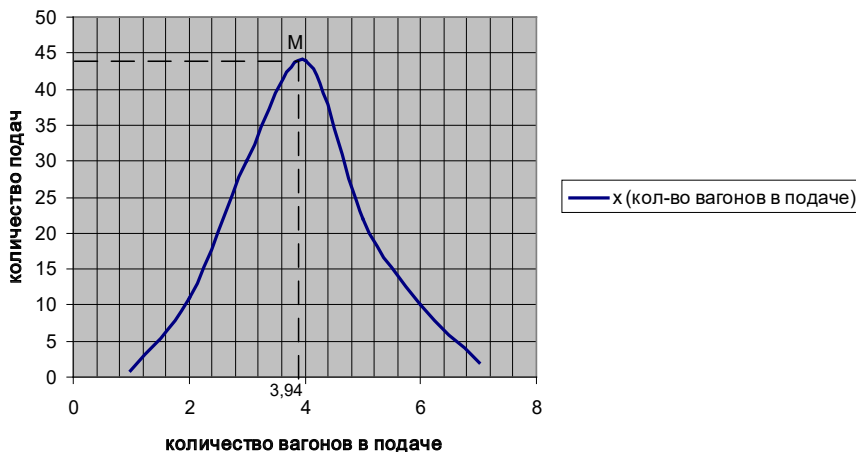


Рис. 3. Выборка по актам для контактного графика № 36 – отсева агломерата, окатышей с ДЦ-1 (ДП-5) при погрузке.

значно определить объёмы и моменты рассогласования, не изменяя при этом функционал [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Несмотря на разнообразие номенклатуры технологических грузов на комбинате, внутризаводские перевозки можно

объединить в группы по следующим признакам:

- однородные по виду груза;
- однородные или взаимозаменяемые по роду подвижного состава, используемого для транспортировки этих грузов;
- по территориальному признаку, с совпадающими станциями назначения



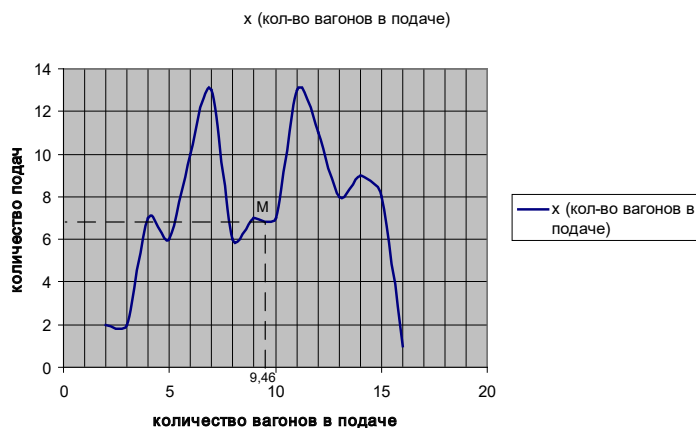


Рис. 4. Выборка по актам для контактного графика № 36 – отсев агломерата, окатышей с ДЦ-1 (ДП-3,4,5) при выгрузке.

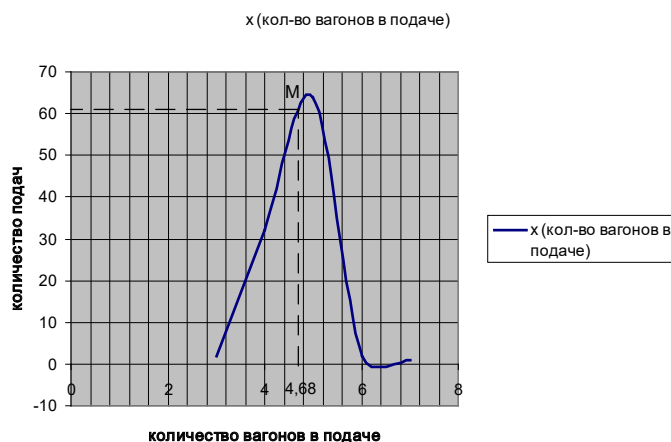


Рис. 5. Выборка по актам для контактного графика № 36 – отсев агломерата, окатышей с ДП-6 (ДЦ-2) при погрузке.

и станциями отправления, а следовательно, и одинаковым маршрутом транспортировки.

Выделим две достаточно мощные струи в перевозках грузов по критерию обслуживания одного и того же производственного цеха (по территориальному признаку). В первой группе объединены перевозки по обслуживанию доменного цеха № 1 (ДЦ-1) и коксохимического производства (КХП) (см. таблицу 1), во второй группе – по обслуживанию доменного цеха № 2 (ДЦ-2) (см. таблицу 2), за исключением перевозок агломерата, которые выделены в отдельную категорию.

Данные по объёму производства и потребления в сутки цехами-поставщиками и цехами-потребителями (в вагонах); моменты времени возникновения «предложения» на груз, «спроса» на груз и их количество определены на основе проведённых

исследований с использованием статистических данных и существующего графика организации внутривозовских перевозок на комбинате. Все они представлены в таблицах 3–10. Среднее время доставки гружёного T_H и порожнего вагона T_Q от цехов-потребителей к цехам-поставщикам, стоимость перевозки вагонов, их хранения и опоздания рассчитаны с помощью методики, приведённой в [8]. Расчёт стоимости опоздания порожнего/гружёного вагона учитывает потери производства от недопоставленного подвижного состава или груза, показывает размер возможных убытков производства, внетранспортный эффект.

ПЕРВАЯ ГРУППА КХП, ДЦ-1

Принятые в таблицах 3–10 аббревиатуры: ДЦ-1 – доменный цех № 1, ДЦ-2 – доменный цех № 2, КХП – коксохимическое производство, ДП-3,4 – доменные печи



Рис. 6. Выборка по актам для контактного графика № 36 – отсев агломерата, окатышей с ДП-7 (ДЦ-2) при погрузке.

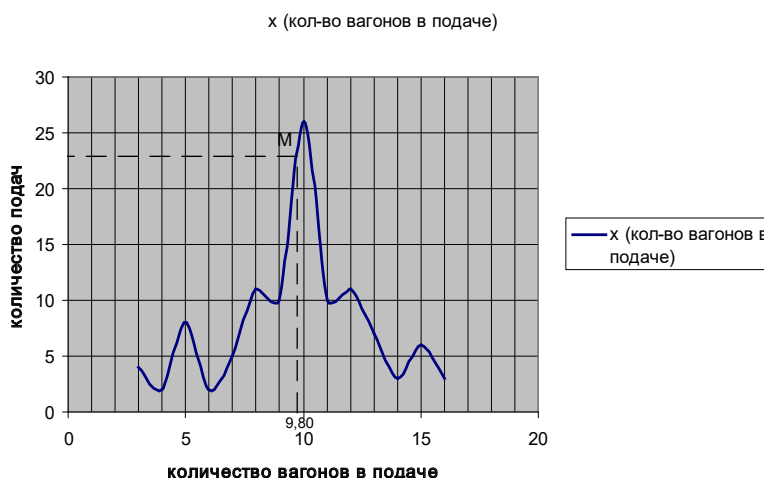


Рис. 7. Выборка по актам для контактного графика № 36 – отсев агломерата, окатышей с ДП-6, ДП-7 (ДЦ-2) при выгрузке.

№ 3 и № 4, ДП-5 – доменная печь № 5, ДП-6,7 – доменные печи № 6 и № 7, АГП – агломерационное производство.

ВТОРАЯ ГРУППА ДЦ-2

В связи с тем, что объёмы производства и потребления грузов цехами предприятия изначально заданы в определённых разрешённых интервалах (таблицы 4, 6, 8, 10), а не в фиксированных значениях, это заставило провести дополнительное исследование и рассчитать частоту подач вагонов на грузовые фронты с фиксированным их количеством.

Для примера приведена часть исследования для контактного графика № 36 – отсев агломерата, окатышей. На рис. 2–7 представлена частота осуществления подач

вагонов с фиксированным их количеством.

Приведённые данные позволяют наглядно определить, какое количество вагонов в подаче находится максимально часто, и используются при расчёте контактного графика с помощью ДТЗЗ.

Решение ДТЗЗ осуществляется с помощью метода потенциалов [11].

Для порожнего грузопотока доменных цехов вводим фиктивного поставщика А9 с объёмом поставки, равным 21 единице порожних вагонов. Это связано с тем, что в модели, сформированной из статистических данных, максимально часто возникающих в реальной действительности, поставщики готовы предоставить 275 единиц порожних вагонов, а потребителям требуется 296 единиц подвижного состава.





Результаты решения ДТЗЗ

Объём перевозок, ваг.	Время опоздания, ваг/ч	Время хранения, ваг/ч	Стоимость перевозки, руб.	Стоимость опоздания, руб.	Стоимость хранения, руб.	Общая стоимость, руб.
296	91	66	56046	4448690	49433	4554169

Для гружёного грузопотока сверхку условия статического баланса (15) предоставляемых и потребляемых гружёных вагонов следует производить с учётом рода груза (аспирационная пыль, колошниковая пыль, отсев кокса, агломерата, окатышей).

Рассматриваемый период оптимизации 48 часов. Стоимость начального плана перевозок – 11101879 руб. В процессе решения ДТЗЗ выполнено 123 итерации. Стоимость оптимального плана перевозок составила 4554169 руб.

Проанализировав, видим, что имеются случаи рассогласования производственных программ цехов-поставщиков и цехов-потребителей, связанные с несвоевременным прибытием порожних вагонов на грузовые пути (53 случая) или с нахождением подвижного состава в ожидании погрузки на путях (36 случаев).

Рассчитанный программой оптимальный план подачи порожних вагонов на фронты погрузки производственных цехов представляет собой таблицу, в ячейках которой указывается стоимость перевозки (первая цифра) и количество вагонов (вторая цифра), поставляемых i -м поставщиком j -му потребителю в момент времени t .

Итоговые результаты решения транспортной задачи сведены в таблицу 11.

Выводы

Усовершенствование системы перевозок порожнего грузопотока по контактному графику с помощью ДТЗЗ позволило отказаться от строгого закрепления вагонов за конкретной перевозкой, подача порожних вагонов осуществляется по наиболее выгодному для потребителя варианту (с минимумом транспортно-производственных затрат). Вагоны могут быть поданы потребителю под погрузку на грузовой фронт из-под любого используемого груза.

Применение динамической транспортной задачи с задержками в качестве основы математической модели для разработки оптимального плана перевозок вагонов по контактному графику помогает более чем вдвое сократить транспортно-производственные затраты цехов металлургического комбината.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баландюк Г. С., Куртуков Я. М. Технология работы железнодорожного транспорта металлургических заводов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
2. Новиков А. С. Оптимизация рабочего парка вагонов промышленных предприятий на основе системы приоритетов управления перевозочным процессом / Дис... канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2008. – 155 с.
3. Сулова О. А., Рагулина Ю. С. Контактный график // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета: в 2-х частях. – Липецк: ЛГТУ, 2017. – С. 622–624.
4. Рахмангулов А. Н., Трофимов С. В., Корнилов С. Н. Методы развития систем промышленного железнодорожного транспорта в изменяющихся условиях деятельности предприятий: Монография. – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – 235 с.
5. Попов А. Т. Оптимизация взаимодействия технологического железнодорожного транспорта и производства (на примере металлургического комбината) / Дис... канд. техн. наук. – М., 1984. – 237 с.
6. Миловидов С. П., Козлов П. А. Динамическая транспортная задача с задержками в сетевой постановке // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1982. – № 1. – С. 211–212.
7. Козлов П. А., Миловидов С. П., Попов А. Т. Организация работы технологического транспорта в промышленных системах // Экономика и математические методы. – 1986. – № 4. – С. 697–703.
8. Попов А. Т., Воронина О. В. Оценка последствий несвоевременного транспортного обслуживания цехов предприятия // Мир транспорта. – 2018. – № 1. – С. 66–81.
9. Котова И. В. Динамическая оптимизация величины и структуры парка подвижного состава для отгрузки готовой продукции металлургического комбината / Дис... канд. техн. наук. – Липецк, 2014. – 185 с.
10. Попов А. Т., Гнедаш М. А. Оптимизация транспортных потоков в системе «производство–транспорт–потребление»: Монография. – Липецк: ЛГТУ, 2006. – 179 с.
11. Гольштейн Е. Г., Юдин Д. Б. Задачи линейного программирования транспортного типа. – М.: Наука, 1969. – 384 с. ●

Координаты авторов: **Попов А. Т.** – popov@stu.lipetsk.ru, **Сулова О. А.** – suslova_2003@mail.ru, **Воронина О. В.** – lelechka7@bk.ru.

Статья поступила в редакцию 24.07.2018, принята к публикации 03.09.2018.

OPTIMIZATION OF PLANT INTERNAL TRANSPORTATION ACCORDING TO THE CONTACT SCHEDULE

Popov, Alexey T., Lipetsk State Technical University (LSTU), Lipetsk, Russia.
 Suslova, Olga A., Lipetsk State Technical University (LSTU), Lipetsk, Russia.
 Voronina Olga V., Lipetsk State Technical University (LSTU), Lipetsk, Russia.

ABSTRACT

The presented article is a continuation of research on development of an alternative model for organization of transportation according to the contact schedule in the conditions of a metallurgical enterprise. The mathematical model is based on a dynamic transport problem with delays (DTPD). It is shown in what way an optimal transportation plan is obtained and minimization of transportation costs is ensured with the agreed production programs of supply shops and consumer shops.

The improvement of the system of transportation of empty cargo flow according to the contact

schedule with the help of DTPD, as the authors argue, allows to abandon the strict assignment of cars to a specific transportation, supply of empty cars is carried out according to the most favorable option for a consumer (with a minimum of transport and production costs). The cars can be delivered to the consumer for loading onto the cargo front from under any used load.

The use of a dynamic transportation problem with delays as the basis of a mathematical model for development of an optimal plan for transportation of cars according to the contact schedule helps to more than halve the transport and production costs of the shops of the metallurgical plant.

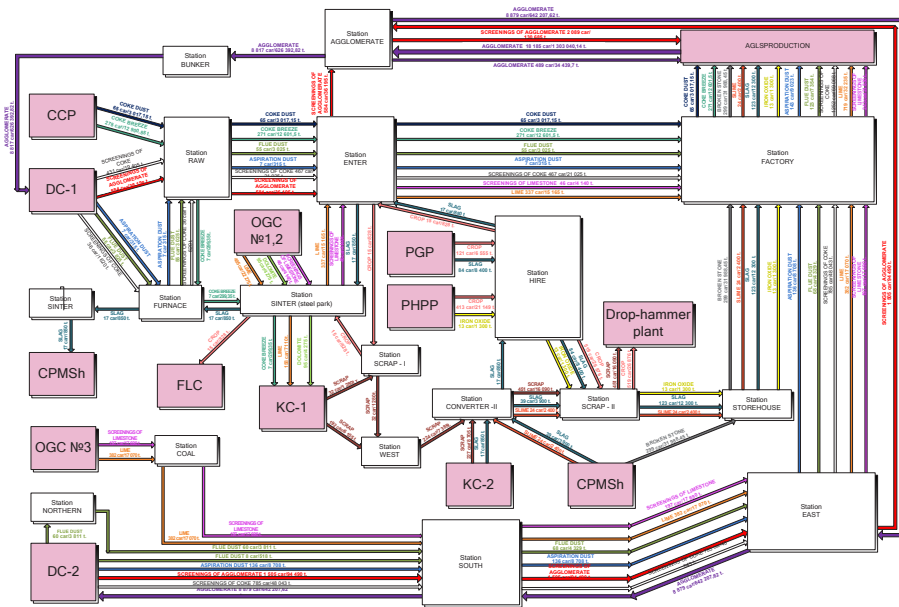
Keywords: dynamic transport problem with delays, internal transportation, optimization of transportation, contact schedule, metallurgical plant, railway transport.

Background. The peculiarity of a metallurgical enterprise is presence of a stable and continuous connection between the production process and transport flows [1]. Transport serves as a link in production of metallurgical products. Finished products of some units become raw materials for others (transportation of molten iron, steel, slag) [2]. Sinter comes from a sintering plant to blast furnaces, from coke-chemical production or from external network – coke, from the same network – limestone (used as a flux). Liquid iron together with scrap, lime and dolomite are sent to steel-smelting shops. Then steel is transported to a continuous casting plant and then to rolling mills. Numerous types of waste have their own turnover [3, 4].

According to the contact schedule, powerful homogeneous jets of agglomerate and production waste are clearly distinguished in the structure of transport flows: screenings of agglomerate,

screenings of coke, limestone, blast furnace dust and aspiration dust (Pic. 1). Fluctuations in production waste depend on the quality and quantity of the main raw material. The use of raw materials and materials of inadequate quality aggravates irregularity of the work of production workshops. For example, excess arrival of cheap imported coke leads to a sharp increase in the volume of coke waste, an increase in agglomerate production contributes to the growth of transportation of its agglomerate screenings.

The dynamic transport problem with delays (DTPD), proposed as the basis for a mathematical model of intra-factory transportation optimization, promises an order of their organization with minimal transport and production costs, consisting of the cost of transporting and storing goods, as well as losses due to late delivery of loaded or empty cars in shop consumers.



Pic. 1. Scheme of cargo flows according to the contact schedule.



Objective. The objective of the authors is to consider optimization of internal transportation according to the contact schedule.

Methods. The authors use general scientific methods, comparative analysis, graph construction, mathematical methods, statistical analysis.

Results.

Statement of a mathematical apparatus

The production volumes x of manufacturing shops A_p , $i = \overline{1, x}$ and the demand volumes of y production shops B_p , $j = \overline{1, y}$ are known. Optimization period $[0; T]$, $T \in Z_0$, $Z_0 = \{0, 1, 2, \dots\}$. We take $v_y^*(t)$ – the number of cars with cargo sent from A_i and arriving in B_j at the moment of time $(t + t_{ij})$, and $t + t_{ij} \leq T$, t_{ij} – duration of transportation from A_i to B_j ; $v_{ji}^{**}(t)$ – number of empty cars sent from B_j and arriving at A_i at the moment of time $(t + t_{ji})$, with $t + t_{ji} \leq T$, t_{ji} – duration of transportation from B_j to A_i ; $S_{ij}^*(t)$ – cost of transporting the car with a load from A_i to B_j ; $S_{ji}^{**}(t)$ – cost of transporting an empty car from B_j to A_i ; $S_j^B(t)$ – cost of storing a unit of cargo at the moment of time t at the j -th consumer shop; $S_i^A(t)$ – cost of storing a unit of rolling stock at time t at the i -th supply shop; $Z_i^A(t)$ – required number of empty cars; $X_i^A(t)$ – reserve of empty cars on A_p ; $Z_j^B(t)$ – required number of loaded cars; $X_j^B(t)$ – number of cars with cargo in reserve on B_p ; t_{ip} , t_{jp} – technological delays (loading / unloading time, inter-operation downtime) on A_i and B_j .

The mathematical model is based on DTPD modification developed in [5–7]. The optimal transportation plan will be obtained by minimizing transportation costs with agreed production programs of supply shops and consumer shops $J = J_1 + J_2$.

$$J_1 = \sum_{i=0}^T \sum_{j=1}^y S_{ij}^*(t) \cdot v_{ij}^*(t) \cdot \Delta t + \sum_{i=0}^T \sum_{j=1}^y S_j^B(t) \cdot X_j^B(t) \cdot \Delta t, \quad (1)$$

$$J_2 = \sum_{i=0}^T \sum_{j=1}^y S_{ji}^{**}(t) \cdot v_{ji}^{**}(t) \cdot \Delta t + \sum_{i=0}^T \sum_{j=1}^y S_i^A(t) \cdot X_i^A(t) \cdot \Delta t \quad (2)$$

subject to the following restrictions:

- stock dynamics of empty cars

$$X_i^A(t+1) = X_i^A(t) + \sum_{j=1}^y v_{ji}^{**}(t - t_{ji}) - Z_i^A(t); \quad (3)$$

- stock dynamics of loaded cars

$$X_j^B(t+1) = X_j^B(t) + \sum_{i=1}^x v_{ij}^*(t - t_{ij}) - Z_j^B(t); \quad (4)$$

- process of transfer of empty cars into cars with cargo

$$Z_i^A(t - t_{ii}) = \sum_{j=1}^y v_{ij}^*(t); \quad (5)$$

- process of transition of loaded cars to empty

$$Z_j^B(t - t_{jj}) = \sum_{i=1}^x v_{ji}^{**}(t); \quad (6)$$

- no negative reserves and delivery volumes $v_{ij}^*(t) \geq 0$; $t + t_{ij} \leq T$; $X_j^B(t) \geq 0$; $v_{ji}^{**}(t) \geq 0$; $t + t_{ji} \leq T$; $X_i^A(t) \geq 0$.

At the production and consumption points A_i and B_p the cars do not stay in time intervals $[0; \min t_{ij} - 1]$

and $[0; \min t_{ji} - 1]$. According to equation (5) in points A_p reserves of cars with cargo are not formed, according to equation (6) additional reserves of empty cars in points B_j do not appear. Upon expiration of time t_{ij} loading of cars $Z_i^A(0)$ to A_i ends, after expiration

of time t_{ji} – unloading of cars $Z_j^B(0)$ to B_j . The departure from A_i ends at time $t = T - \min t_{ij}$ and from B_j – at time $t = T - \min t_{ji}$. Expression (5) is valid in the time interval $[t_{ij}; T - \min t_{ij}]$, expression (6) is true for the time interval $[t_{ji}; T - \min t_{ji}]$.

At the time $t_2 = \min(t_{ij} + t_{ji})$, the cars loaded onto B_j arrive at A_i . At $t_1 = \min(t_{ij} + t_{ji})$, the first cars loaded onto A_i arrive at B_j . The conditions of the stock of empty and loaded cars (3) and (4) are indicated for the time intervals $[t_2, T]$ and $[t_1, T]$.

In the intervals $[0; t_2 - 1]$ and $[0; t_1 - 1]$ deliveries do not occur, and points A_i and B_j must function at the expense of own reserves

$$X_i^A(0) = \sum_{i=0}^{t_1-1} Z_i^A(t), \quad X_j^B(0) = \sum_{i=0}^{t_1-1} Z_j^B(t).$$

Let us accept that

$$X_i^A(t_2) = X_j^B(t_1) = 0.$$

Points A_i and B_j are connected by a single closed technological process from the moment of rolling stock arrival from other production workshops $[\min(t_{ij} + t_{ji}); T - t_{ij} - \min t_{ij}]$ and until the end of technological operations in the workshop under consideration $[\min(t_{ij} + t_{ji}); T - t_{ij} - \min t_{ij}]$.

From the equations of the dynamics of stocks of loaded cars (4) and transition of empty cars into cars with cargo (5) it follows:

$$\sum_{j=1}^y \sum_{i=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_j^B(t) \leq \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y \sum_{i=0}^{\delta-t_{ij}-t_{ji}} Z_i^A(t). \quad (7)$$

The expression (7) means that at the previous point in time $(\delta - t_{ij} - t_{ji})$ the need for empty cars is greater than or equal to the need for loaded cars at the next time point δ . Similarly, from the equations of stock dynamics of empty cars (3) and the transition of loaded cars into empty cars (6) we get

$$\sum_{i=1}^x \sum_{i=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_i^A(t) \leq \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y \sum_{i=0}^{\delta-t_{ij}-t_{ji}} Z_j^B(t). \quad (8)$$

For the time interval $\delta \in [0, T]$ the simultaneous fulfillment of the conditions $\delta > t_{ij} + t_{ji}$; $\delta > t_{ij} + t_{ji}$; $\delta - t_{ij} - t_{ji} > \min(t_{ij} + t_{ji})$; $\delta - t_{ij} - t_{ji} > \min(t_{ij} + t_{ji})$ ensures the exchange between supply shops and consumer shops. From inequations (7) and (8) it follows:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^x \sum_{i=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_i^A(t) &\leq \sum_{j=1}^y \left(\sum_{i=0}^{\min(t_{ij}+t_{ji})} Z_j^B(t) + \sum_{i=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_j^B(t) \right) \leq \\ &\leq \sum_{j=1}^y X_j^B(0) + \sum_{j=1}^y \sum_{i=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_j^B(t) \leq \sum_{j=1}^y X_j^B(0) + \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$+ \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y \sum_{i=0}^{\delta-t_{ij}-t_{ji}} Z_i^A(t);$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^y \sum_{i=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_j^B(t) &\leq \sum_{i=1}^x X_i^A(0) + \sum_{i=1}^x \sum_{i=\min(t_{ij}+t_{ji})}^{\delta} Z_i^A(t) \leq \\ &\leq \sum_{j=1}^y X_j^B(0) + \sum_{j=1}^y \sum_{i=1}^x \sum_{i=0}^{\delta-t_{ij}-t_{ji}} Z_j^B(t). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Table 1

Internal transportation for servicing of DC-1 and CCP

No. of the schedule	Name of cargo	Departure station	Destination station	Type of a car
24	blast dust	Blast	Factory	g/c
24	aspiration dust	Blast	Factory	g/c
28	coke breeze	Raw	Factory	g/c
29	coke breeze	Raw	Factory	g/c
31	coke dust	Raw	Factory	g/c
32	coke dust	Raw	Factory	g/c
30	coke waste	Raw	Factory	g/c
15	coke waste	Raw	Factory	g/c
33	coke waste	Blast	Factory	g/c
36	screenings of agglomerate, pellets	Raw	Agglomerate	hopper

Table 2

Internal transportation for servicing DC-2

No. of the schedule	Name of cargo	Departure station	Destination station	Type of a car
50 (DC-6)	flue dust	South	Factory	g/c
50 (DP-7)	flue dust	Northern	Factory	g/c
50 (DP-6)	aspiration dust	South	Factory	g/c
50 (DP-7)	aspiration dust	South	Factory	g/c
5	coke waste	South	Factory	g/c
36	screenings of agglomerate, pellets	South	Agglomerate	hopper

Table 3

The start time of cargo loading and the amount of demand for empty cars for loading of screenings per day

Consumer	Consumer shops of empty cars	Number of releases per day					
		1	2	3	4	5	6
B1	DC-1 (24 – flue dust)	8–30	–	–	–	–	–
B2	DC-1 (24 – aspiration dust)	12–00	–	–	–	–	–
B3	DC-1 (33 – coke waste)	11–30	–	–	–	–	–
B4	CCP (28 – coke breeze)	01–00	09–00	17–00	–	–	–
B5	CCP (29 – coke breeze)	01–00	05–00	09–00	13–00	17–00	21–00
B6	DC-1 (30 – coke waste)	02–00	10–00	18–00	–	–	–
B7	DC-1 (15 – coke waste)	13–30	01–30	–	–	–	–
B8	CCP (31 – coke dust)	10–00	–	–	–	–	–
B9	CCP (32 – coke dust)	17–00	–	–	–	–	–
B10	DC-1 (36 – screenings of agglomerate from DP-5)	13–30	01–30	–	–	–	–
B11	DC-1 (36 – screenings of agglomerate from DP-3,4)	02–00	10–00	18–00	–	–	–

These inequations (9) and (10) show the existence of a coordinated connection of a single technological process with production programs:

$$\sum_{i=1}^x \sum_{t=\min(t_{ij}, t_{ji})}^{\delta} Z_i^A(t) - \sum_{j=1}^y \sum_{t=\min(t_{ij}, t_{ji})}^{\delta} Z_j^B(t) \leq \sum_{j=1}^y X_j^B(0); \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^y \sum_{t=\min(t_{ij}, t_{ji})}^{\delta} Z_j^B(t) - \sum_{i=1}^x \sum_{t=\min(t_{ij}, t_{ji})}^{\delta} Z_i^A(t) \leq \sum_{i=1}^x X_i^A(0). \quad (12)$$

From inequations (11) and (12), obtained from expressions (9) and (10), it follows that the initial reserves have a very significant smoothing effect, which allows to get out of situations in which the programs of supply shops and consumer shops are not coordinated.

In the simulated situation, we assume that the number of cars with cargo that are in reserve at B_j and the stock of empty cars at A_i are equal to zero.

In case when loaded or empty cars arrive at their destination without temporary delays $t_{jn} - t_{im} \geq t_{ij}$, transport and production costs are found by the formula

$$S(C(A_{im}, B_{jn})) = S_{ij} + S_j^x \cdot (t_{jn} - t_{im} - t_{ij}), \quad (13)$$

where $C(A_{im}, B_{jn})$ – communication between supply shops and consumer shops;

S_{ij} – cost of transporting a unit of rolling stock unit from the i -th manufacturing shop to the j -th consumer shop;

S_j^x – costs of storing a unit of rolling stock unit for a unit of time at the j -th consumer shop;



Table 4
Volumes of production per day (in cars) for CCP and DC-1

Supply shops	Number of releases per day					
	1	2	3	4	5	6
DC-1 (24 – flue dust)	1–9	–	–	–	–	–
DC-1 (24 – aspiration dust)	1	–	–	–	–	–
DC-1 (33 – coke waste)	1–2	–	–	–	–	–
CCP (28 – coke breeze)	1–2	1–2	1–2	–	–	–
CCP (29 – coke breeze)	1–2	1–2	1–2	1–2	1–2	1–2
CCP (31 – coke dust)	1	–	–	–	–	–
CCP (32 – coke dust)	1	–	–	–	–	–
DC-1 (30 – coke waste)	1–4	1–4	1–4	–	–	–
DC-1 (15 – coke waste)	1–4	1–4	–	–	–	–
DC-1 (36 – screenings of agglomerate from DP-5)	1–7	1–7	–	–	–	–
DC-1 (36 – screenings of agglomerate from DP-3, 4)	1–7	1–7	1–7	–	–	–

Table 5
The start time of cargo unloading and the number of offers of empty cars for loading of screenings per day

Supplier	Supply shops of empty cars	Number of empty cars for loading of screenings					
		1	2	3	4	5	6
A1	AGP (24 – flue dust)	23–00	06–00	–	–	–	–
A2	AGP (24 – aspiration dust)	23–00	–	–	–	–	–
A3	AGP (33 – coke waste)	16–30	–	–	–	–	–
	AGP (28 – coke breeze)	06–00	16–30	–	–	–	–
	AGP (29 – coke breeze)	06–00	16–30	–	–	–	–
	AGP (31 – coke dust)	06–00	16–30	–	–	–	–
	AGP (32 – coke dust)	06–00	16–30	–	–	–	–
	AGP (30 – coke waste)	06–00	16–30	–	–	–	–
A4	AGP (15 – coke waste)	06–00	16–30	–	–	–	–
	AGP (36 – screenings of agglomerate from DP-5)	06–30	18–30	–	–	–	–
	AGP (36 – screenings of agglomerate from DP-3,4)	00–30	06–30	12–30	–	–	–

Table 6
Volumes of demand per day (in cars) for CCP and DC-1

Consumer shops	Number of demand for laden cars					
	1	2	3	4	5	6
AGP (24 – flue dust)	1–4	3–9	–	–	–	–
AGP (24 – aspiration dust)	1	–	–	–	–	–
AGP (33 – coke waste)	1–2	–	–	–	–	–
AGP (28 – coke breeze)	9–22	7–18	–	–	–	–
AGP (29 – coke breeze)	9–22	7–18	–	–	–	–
AGP (31 – coke dust)	9–22	7–18	–	–	–	–
AGP (32 – coke dust)	9–22	7–18	–	–	–	–
AGP (30 – coke waste)	9–22	7–18	–	–	–	–
AGP (15 – coke waste)	9–22	7–18	–	–	–	–
AGP (36 – screenings of agglomerate from DP-5)	2–15	1–10	–	–	–	–
AGP (36 – screenings of agglomerate from DP-3,4)	5–15	2–15	5–15	–	–	–

Table 7

The start time of cargo loading and the amount of demand for empty cars for loading of screenings per day

Consumer	Consumer shops of empty cars	Number of releases per day					
		1	2	3	4	5	6
B12	DC-2 (50 – flue dust from DP-6)	13–00	–	–	–	–	–
B13	DC-2 (50 – flue dust from DP-7)	12–01	–	–	–	–	–
B14 (1 cargo front); B15 (2 cargo front)	DC-2 (50 – aspiration dust from DP-6)	12–00	12–00	–	–	–	–
B16 (1 cargo front); B17 (2 cargo front)	DC-2 (50 – aspiration dust from DP-7)	12–30	12–30	–	–	–	–
B18	DC-2 (5 – coke waste from DP-6)	00–30	06–30	12–30	18–30	–	–
B19	DC-2 (5 – coke waste from DP-7)	01–00	05–00	09–00	13–00	17–00	21–00
B20	DC-2 (36 – screenings of agglomerate, pellets DP-6)	00–30	06–30	12–30	18–30	–	–
B21	DC-2 (36 – screenings of agglomerate, pellets DP-7)	01–00	05–00	09–00	13–00	17–00	21–00

Note: cells highlighted in color mean that loading is performed simultaneously on different cargo fronts, in different ways.

Table 8

Production volumes per day (in cars)

Supple shops	Number of releases per day					
	1	2	3	4	5	6
DC-2 (50 – flue dust from DP-6)	1–3	–	–	–	–	–
DC –2 (50 – flue dust from DP-7)	1–3	–	–	–	–	–
DC –2 (50 – aspiration dust from DP-6)	1–3	1–3	–	–	–	–
DC –2 (50 – aspiration dust from DP-7)	1–3	1–3	–	–	–	–
DC –2 (5 – coke waste from DP-6)	1–4	1–4	1–4	1–4	–	–
DC –2 (5 – coke waste from DP-7)	2–5	2–5	2–5	2–5	2–5	2–5
DC –2 (36 – screenings of agglomerate, pellets DP-6)	4–8	4–8	4–8	4–8	–	–
DC –2 (36 –screenings of agglomerate, pellets DP-7)	5–8	5–8	5–8	5–8	5–8	5–8

Table 9

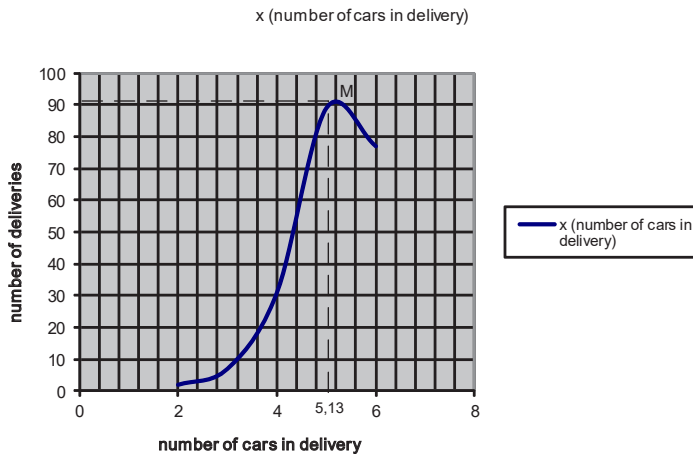
The start time of unloading cargo and the number of offers of empty cars for loading screenings per day

Supplier	Supply shops of empty cars	Number of empty cars for loading screenings					
		1	2	3	4	5	6
A5	AGP (50 – flue dust from DP-6, 7)	23–00	–	–	–	–	–
A6	AGP (50 – aspiration dust from DP-6, 7)	03–30	–	–	–	–	–
A7	AGP (5 – coke waste from DP-6, 7)	03–30	15–30	–	–	–	–
A8	AGP (36 – screenings of agglomerate, pellets DP-6)	03–30	10–00	15–30	22–00	–	–
	AGP (36 – screenings of agglomerate, pellets DP-7)	03–30	10–00	15–30	22–00	–	–

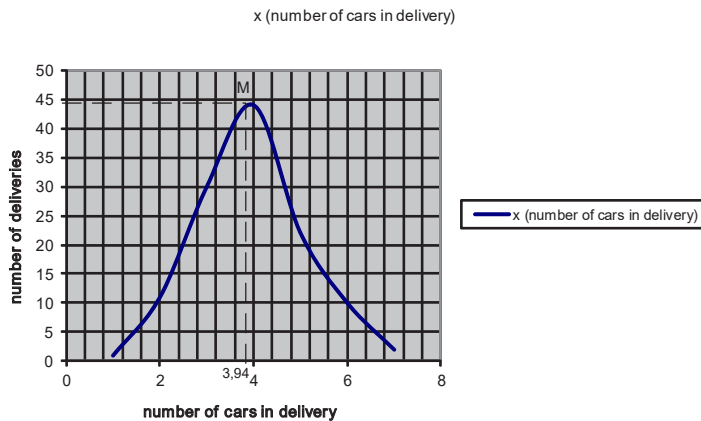


The volume of demand per day (in cars)

Consumer shops	Number of demand for laden cars					
	1	2	3	4	5	6
AGP (50 – flue dust from DP-6, 7)	2–6	–	–	–	–	–
DC-2 (50 – aspiration dust from DP-6, 7)	4–12	–	–	–	–	–
AGP (5 – coke waste from DP-6, 7)	8–23	8–23	–	–	–	–
AGP (36 – screenings of agglomerate, pellets DP-6)	9–15	10–15	9–15	10–15	–	–
AGP (36 – screenings of agglomerate, pellets DP-7)	9–15	10–15	9–15	10–15	–	–



Pic. 2. Sample by acts for contact schedule No. 36 – screenings of agglomerate, pellets from DC-1 (DP-3, 4) during loading.



Pic. 3. Sample by acts for the contact schedule No. 36 – screenings of agglomerate, pellets from DC-1 (DP-5) during loading.

$(t_{jn} - t_{im} - t_{ij})$ – time when the products are in reserve;

$(t_{jn} - t_{im})$ – time interval between the moment of production of cargo and the moment of its consumption [8].

The formula (13) makes it possible to take into account the costs of transporting a unit of production S_j and transport and production costs attributable to idle time of cars and storing goods for a period of time $(t_{jn} - t_{im} - t_{ij})$ until the moment of demand for them by the consumer shop.

In case when loaded or empty cars arrive at the front of loading/unloading with a delay of time $(t_{im} + t_{ij} - t_{jn})$, we determine the transport and production costs by the formula

$$S(C(A_{jm}, B_{jm})) = S_j + S_j^0 \cdot (t_{im} + t_{ij} - t_{jn}), \quad (14)$$

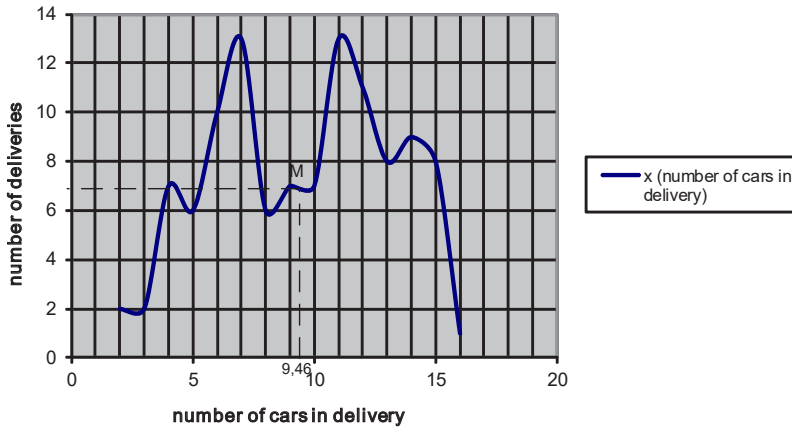
where S_j^0 – cost of expenses of the j -th consumer shop due to late arrival of a rolling stock unit;

$(t_{im} + t_{ij} - t_{jn})$ – the time of production being late by the time of demand for it [8].

Results of solution of DTPD

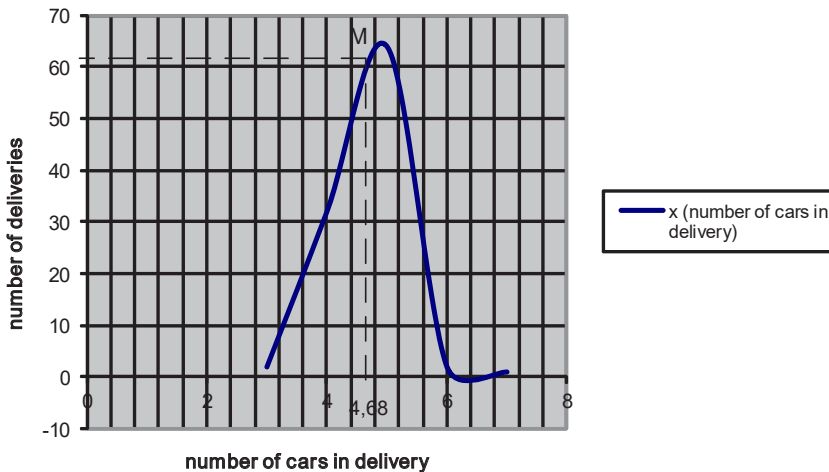
Volume of transportation, cars	Delay time, car/h	Storage time, car/h	Cost of transportation, rub	Cost of delay, rub	Cost of storage, rub	Total cost, rub
296	91	66	56046	4448690	49433	4554169

x (number of cars in delivery)



Pic. 4. Sample by acts for the contact schedule No. 36 – screenings of agglomerate, pellets from DC-1 (DP-3, 4, 5) during unloading.

x (number of cars in delivery)



pic. 5. sample by acts for the contact schedule no. 36 – screenings of agglomerate, pellets from dp-6 (dc-2) during loading.

The formula (14) allows to take into account production losses due to the late delivery of empty or loaded cars to loading and unloading fronts in accordance with the needs of production.

The defining moment for construction of an initial transportation plan is an answer to a question: is the task to be solved closed? The equation of static balance of volumes (capacities) of production and consumption helps to answer it [8]:

$$\sum_{i=1}^x \sum_{m=1}^{k_i} a_i(t_{im}) = \sum_{j=1}^y \sum_{n=1}^{l_j} b_j(t_{jn}). \quad (15)$$

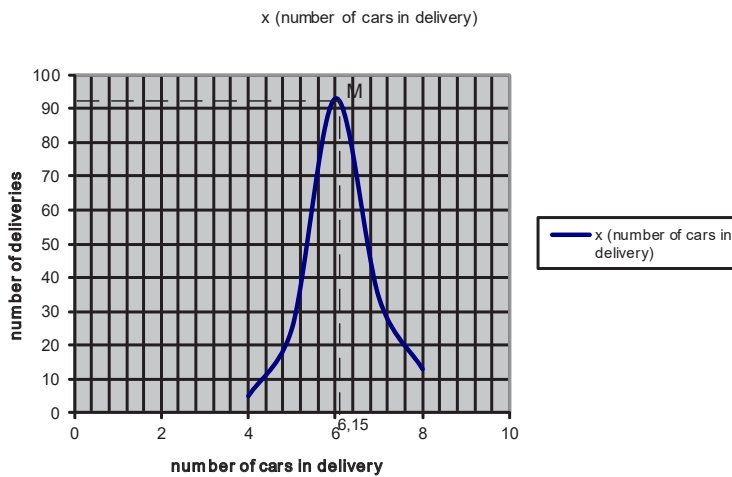
If the equation (15) is satisfied, then the problem is considered closed, otherwise it is open, which, in turn, requires reducing it to a closed form. This can be done by introducing into the conditions of the transport problem a fictitious supplier or consumer [9].

Fictitious supplier – conditional manufacturing shop $a_{i+}(t_{im})$ with a delivery volume identical to the missing quantity to fulfill the equation (15).

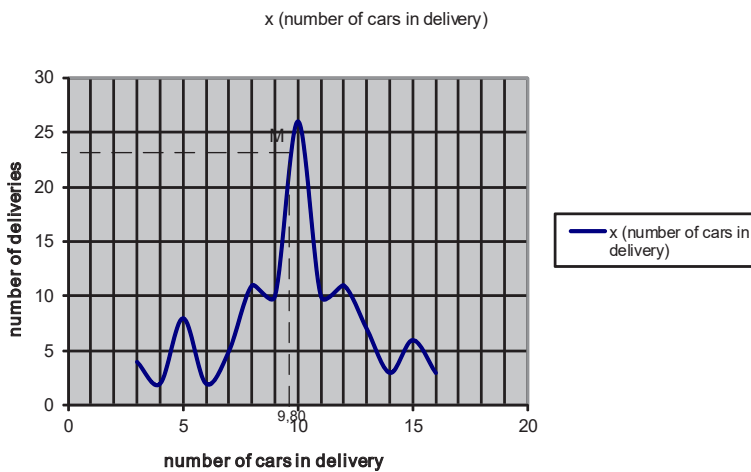
Fictitious consumer is a conditional consumer shop $b_{j+}(t_{jn})$ with a consumption volume equal to the missing quantity for the equation (15).

Fictitious supplier/consumer does not change the solution of the transport problem, does not «break»





Pic. 6. Sample by acts for the contact schedule No. 36 – screenings of agglomerate, pellets from DP-7 (DC-2) during loading.



Pic. 7. Sample by acts for the contact schedule No. 36 – screenings of agglomerate, pellets from DP-6, DP-7 (DC-2) during unloading.

it. The introduction of fictitious suppliers or consumers with zero cost indicators makes it possible to unambiguously determine the volumes and moments of the mismatch, without changing the functional [10].

Research results

Despite the variety of technological cargo nomenclature at the plant, intra-plant shipments can be grouped according to the following features:

- homogeneous by type of cargo;
- homogeneous or interchangeable according to the type of rolling stock used to transport these goods;
- on a territorial basis, with matching destination stations and departure stations, and, therefore, the same transportation route.

Let us single out two fairly powerful jets in transportation of goods by the criterion of servicing the same production shop (on a territorial basis). The first group includes shipments for servicing blast furnace shop No. 1 (DC-1) and coke-chemical production (CCP) (see table 1), the second group – for servicing blast furnace shop No. 2 (DC-2) servicing (see table 2), with the exception of sinter shipments, which are allocated in a separate category.

Data on the volume of production and consumption per day by supply shops and consumer shops (in cars); the moments of time for emergence

of «supply» for cargo, «demand» for cargo and their quantity are determined on the basis of the conducted studies using statistical data and the existing schedule for organizing intra-plant transportation at the plant. All of them are presented in tables 3–10. The average delivery time of a loaded T_H and an empty T_0 car from consumer shops to supply shops, the cost of transporting, storing and delaying cars was calculated using the methodology given in [8]. The calculation of the cost of being late for an empty/loaded car takes into account production losses from an undelivered rolling stock or cargo, shows the size of possible production losses, the non-transport effect.

The first group of CCP, DC-1

Abbreviations accepted in tables 3–10: DC-1 – blast furnace shop number 1, DC-2 – blast furnace shop number 2, CCP – coke chemical production, DP-3, 4 – blast furnace No. 3 and No. 4, DP-5 – blast furnace No. 5, DP-6, 7 – blast furnaces No. 6 and No. 7, AGP – sinter production.

Second group DC-2

Due to the fact that the volumes of production and consumption of goods by the workshops of the enterprise were initially set at certain allowed intervals (Tables 4, 6, 8, 10) and not at fixed values, this made

it necessary to conduct additional research and calculate the frequency of car deliveries to cargo fronts with their fixed number.

For an example, a part of the study for contact schedule No. 36 is shown – screenings of agglomerate, pellets. Pic. 2–7 presents the frequency of supply of cars with a fixed number.

The above data allows to visually determine how many cars in the supply is present as often as possible, and are used when calculating the contact schedule using DTPD.

The solution of DTPD is carried out using the method of potentials [11].

For an empty cargo flow of blast furnaces, we introduce a fictitious supplier A9 with a delivery volume equal to 21 units of empty cars. This is due to the fact that in the model, formed from statistical data, as often as possible arising in reality, suppliers are ready to provide 275 units of empty cars, and 296 units of rolling stock are required for consumers.

For laden cargo flow, verification of the static balance conditions (15) of supplied and consumed loaded cars should be made taking into account the type of cargo (aspiration dust, flue dust, screenings of coke, agglomerate, pellets).

Considered optimization period of 48 hours. The cost of the initial transportation plan is 11101879 rubles. In the course of solving DTTT, 123 iterations were performed. The cost of the optimal transportation plan was 4554169 rubles.

The optimal plan calculated by the program for supplying empty cars to the loading fronts of production workshops is a matrix, the cells of which indicate the cost of transportation (first digit) and the number of cars (second digit) delivered by the i -th supplier to the j -th consumer at time t .

After analyzing, we see that there are cases of mismatch between the production programs of supply shops and consumer shops related to the untimely arrival of empty cars on cargo routes (53 cases) or to stay of rolling stock waiting for loading on the tracks (36 cases).

The final results of the solution of the transport problem are summarized in Table 11.

Conclusions.

The improvement of the system of transportation of empty cargo flow according to the contact schedule with the help of DTPD allowed us to abandon the strict assignment of cars to a specific transportation, supply of empty cars is carried out according to the most favorable option for a consumer (with a minimum of transport and production costs). The cars can be delivered to the consumer for loading onto the cargo front from under any used load.

The use of a dynamic transportation problem with delays as the basis of a mathematical model for development of an optimal plan for transportation of cars according to the contact schedule helps to more than halve the transport and production costs of the shops of the metallurgical plant.

REFERENCES

1. Balandyuk, G. S., Kurtukov, Ya. M. Technology of operation of railway transport of metallurgical plants [Tehnologiya raboty zheleznodorozhnogo transporta metallurgicheskikh zavodov]. Moscow, Metallurgia publ., 1985, 256 p.
2. Novikov, A. S. Optimization of working fleet of cars of industrial enterprises on the basis of the priority system of management of the transportation process. Ph.D. (Eng) thesis [Optimizatsiya rabocheho parka vagonov promyshlennykh predpriyatiy na osnove sistemy prioriteto upravleniya perezozhnykh protsessom. Dis... kand. tech. nauk]. Magnitogorsk, 2008, 155 p.
3. Suslova, O. A., Ragulina, Yu. S. Contact schedule [Kontaktnyi grafik]. Collection of abstracts of the scientific conference of students and Ph.D. students of Lipetsk State Technical University: in 2 parts. Lipetsk, LSTU publ., 2017, pp. 622–624.
4. Rakhmangulov, A. N., Trofimov, S. V., Kornilov, S. N. Methods for development of industrial railway transport systems in the changing conditions of enterprise activities: Monograph [Metody razvitiya sistem promyshlennogo zheleznodorozhnogo transporta v izmenyayushchihsya usloviyah deyatel'nosti predpriyatiy: Monografiya]. Magnitogorsk, MSTU, 2004, 235 p.
5. Popov, A. T. Optimization of interaction of technological railway transport and production (using an example of a metallurgical plant). Ph.D. (Eng) thesis [Optimizatsiya vzaimodeistviya tekhnologicheskogo zheleznodorozhnogo transporta i proizvodstva (na primere metallurgicheskogo kombinata) / Dis... kand. tech. nauk]. Moscow, 1984, 237 p.
6. Milovidov, S. P., Kozlov, P. A. Dynamic transport problem with delays in the network setting [Dinamicheskaya transportnaya zadacha s zaderzhkami v setevoy postanovke]. News of the Academy of Sciences of the USSR. Technical cybernetics, 1982, Iss. 1, pp. 211–212.
7. Kozlov, P. A., Milovidov, S. P., Popov, A. T. Organization of the work of technological transport in industrial systems [Organizatsiya raboty tekhnologicheskogo transporta v promyshlennykh sistemah]. Ekonomika i matematicheskie metody, 1986, Iss. 4, pp. 697–703.
8. Popov, A. T., Voronina, O. V. Estimation of consequences of untimely transport service of shops of the enterprise. World of Transport and Transportation, Vol. 16, 2018, Iss. 1, pp. 66–81.
9. Kotova, I. V. Dynamic optimization of the size and structure of rolling stock for shipment of finished products of a metallurgical plant. Ph.D. (Eng) thesis [Dinamicheskaya optimizatsiya velichiny i struktury parka podvizhnogo sostava dlya otgruzki gorvoi produktsii metallurgicheskogo kombinata. Dis... kand. tech. nauk]. Lipetsk, 2014, 185 p.
10. Popov, A. T., Gnedash, M. A. Optimization of transport flows in the system «production – transport – consumption»: Monograph [Optimizatsiya transportnykh potokov v sisteme «proizvodstvo – transport – potreblenie»: Monografiya]. Lipetsk, LSTU, 2006, 179 p.
11. Golshtein, E. G., Yudin, D. B. Problems of linear programming of transport type [Zadachi lineinogo programmirovaniya transportnogo tipa]. Moscow, Nauka publ., 1969, 384 p.

Information about the authors:

Popov, Alexey T. – Ph.D. (Eng), associate professor, head of the department of organization of transportation of Lipetsk State Technical University (LSTU), Lipetsk, Russia, popov@stu.lipetsk.ru.

Suslova, Olga A. – Ph.D. (Eng), associate professor of Lipetsk State Technical University (LSTU), Lipetsk, Russia, suslova_2003@mail.ru.

Voronina Olga V. – Ph.D. student of Lipetsk State Technical University (LSTU), Lipetsk, Russia, lelechka7@bk.ru.

Article received 24.07.2018, accepted 03.09.2018.

