

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.

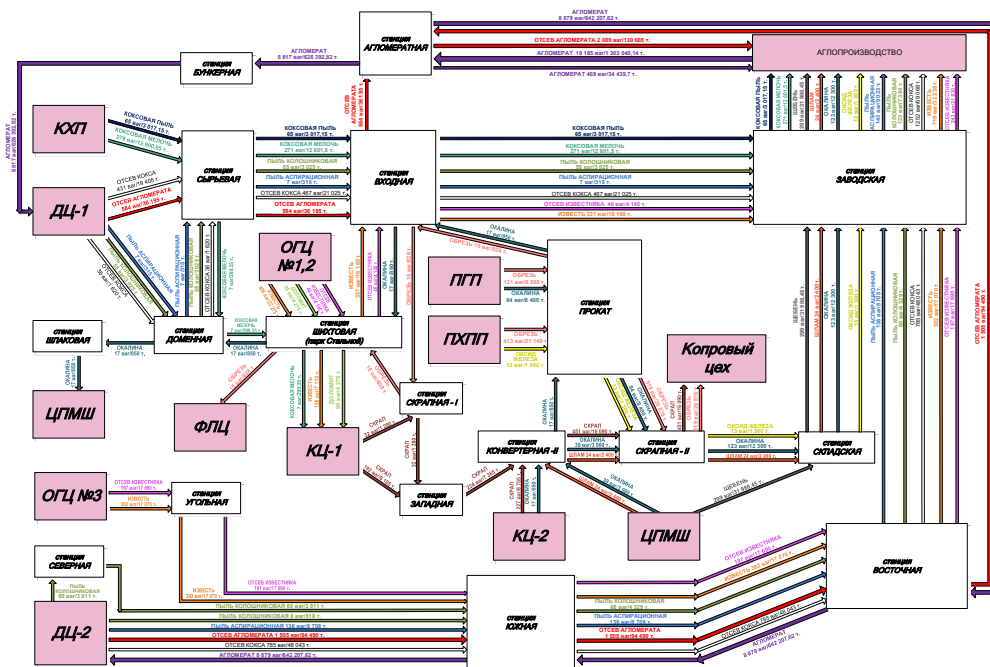
Optimization of Plant Internal Transportation According to the Contact Schedule
(текст статьи на англ. яз. — English text of the article — p. 171)

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-



сева кокса, отсева известняка, колошниковой и аспирационной пыли (рис. 1). Колебания отходов производства зависят от качества и количества основного сырья. Использование сырья и материалов ненадлежащего качества усугубляет неритмичность работы производственных цехов. Например, избыточное прибытие дешёвого привозного кокса приводит к резкому повышению объёмов коксовых отходов, увеличение производства агломерата способствует росту перевозок его отсева.

Динамическая транспортная задача с задержками (ДТЗЗ), предлагаемая в основу математической модели оптимизации внутривозовских перевозок, обещает порядок их организации с минимальными транспортно-производственными расходами, состоящими из стоимости на транспортировку и хранение грузов, а также потерь из-за несвоевременного прибытия гружёных или порожних вагонов в цеха-потребители.

ПОСТАНОВКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА

Известны объёмы производства x цехов-производителей A_i , $i = \overline{1, x}$ и объёмы спроса

у цехов-потребителей $B_j, j = \overline{1, y}$. Период оптимизации $[0; T]$, $T \in Z_0, Z_0 = \{0, 1, 2, \dots\}$. Примем $v_{ij}^*(t)$ – количество вагонов с грузом, отправляемых из A_i и прибывающих в B_j в момент времени $(t + t_{ij})$, причём $t + t_{ij} \leq T, t_{ij}$ – продолжительность транспортировки от A_i до B_j ; $v_{ji}^{**}(t)$ – количество порожних вагонов, отправляемых из B_j и прибывающих в A_i в момент времени $(t + t_{ji})$, причём $t + t_{ji} \leq T, t_{ji}$ – продолжительность транспортировки от B_j до A_i ; $S_{ij}^*(t)$ – затраты на транспортировку вагона с грузом от A_i до B_j ; $S_{ji}^{**}(t)$ – затраты на транспортировку порожнего вагона от B_j до A_i ; $S_j^B(t)$ – стоимость хранения единицы груза в момент времени t у j -го цеха-потребителя; $S_i^A(t)$ – стоимость хранения единицы подвижного состава в момент времени t у i -го цеха-поставщика; $Z_i^A(t)$ – требуемое количество порожних вагонов; $X_i^A(t)$ – резерв порожних вагонов на A_i ; $Z(t)$ – требуемое количество гружённых



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 $[\min(t_{jj} + t_{ji}); T - t_{ii} - \min t_{ij}]$ 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:

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

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

Таблица 1

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:

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

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

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

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

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

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:

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

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 отсеов 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 $b_{j+l}(t_{jn})$ 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	–	–	–	–
	АГП (15 – 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	–	–	–



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



Таблица 6

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 отсеов в сутки

Потребитель	Цеха-потребители порожних вагонов	Количество выпусков в сутки					
		1	2	3	4	5	6
B12	ДЦ-2 (50 – колошниковая пыль с ДП-6)	13–00	–	–	–	–	–
B13	ДЦ-2 (50 – колошниковая пыль с ДП-7)	12–01	–	–	–	–	–
B14 (1 грузовой фронт); B15 (2 грузовой фронт)	ДЦ-2 (50 – аспирационная пыль с ДП-6)	12–00	12–00	–	–	–	–
B16 (1 грузовой фронт); B17 (2 грузовой фронт)	ДЦ-2 (50 – аспирационная пыль с ДП-7)	12–30	12–30	–	–	–	–
B18	ДЦ-2 (5 – коксовые отходы с ДП-6)	00–30	06–30	12–30	18–30	–	–
B19	ДЦ-2 (5 – коксовые отходы с ДП-7)	01–00	05–00	09–00	13–00	17–00	21–00
B20	ДЦ-2 (36 – отсев агломерата, окатышей ДП-6)	00–30	06–30	12–30	18–30	–	–
B21	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	–	–

х (кол-во вагонов в подаче)

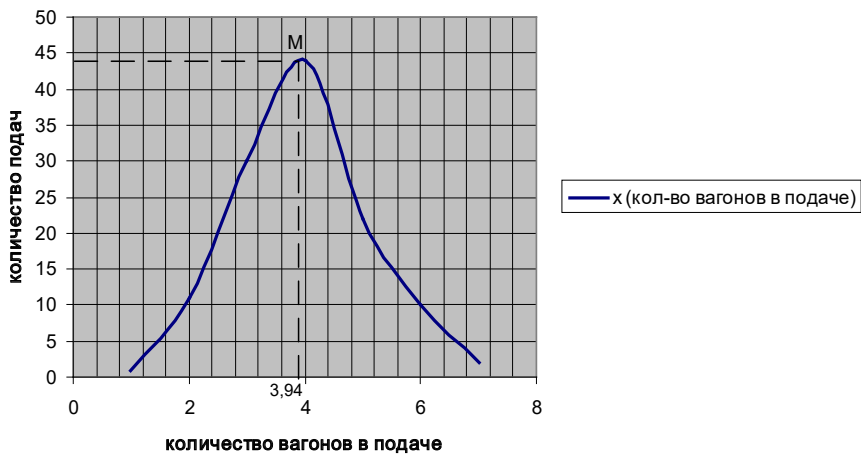


Рис. 3. Выборка по актам для контактного графика № 36 – отсева агломерата, окатышей с ДЦ-1 (ДП-5) при погрузке.

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.

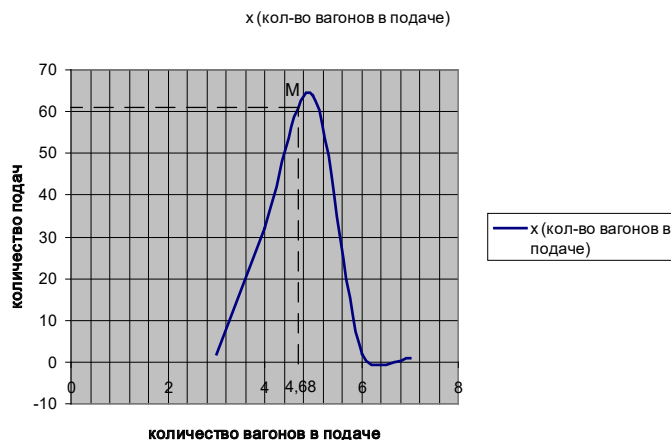


Рис. 5. Выборка по актам для контактного графика № 36 – отсев агломерата, окатышей с ДП-6 (ДЦ-2) при погрузке.

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_O 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, внутранспортный 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

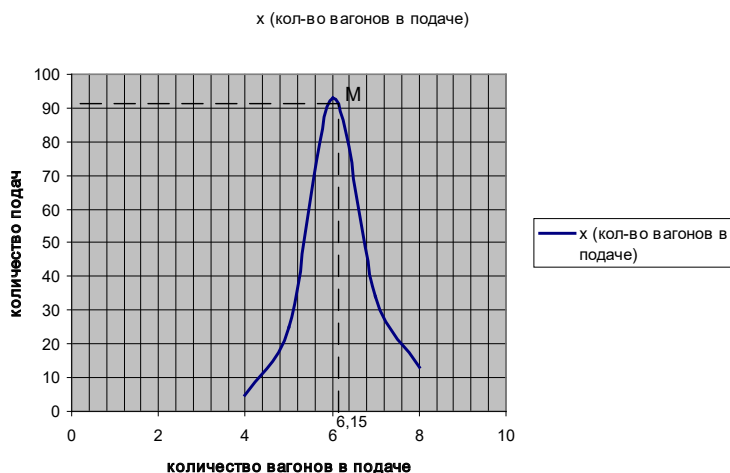


Рис. 6. Выборка по актам для контактного графика № 36 – отсев агломерата, окатышей с ДП-7 (ДЦ-2) при погрузке.

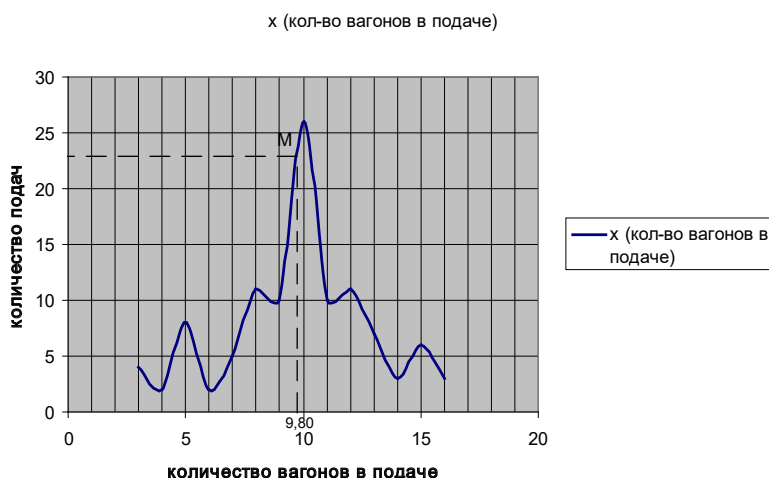


Рис. 7. Выборка по актам для контактного графика № 36 – отсев агломерата, окатышей с ДП-6, ДП-7 (ДЦ-2) при выгрузке.

№ 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.





Таблица 11

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. Суслова 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, **Суслова 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.