# Оптимизация процесса выгрузки железорудного сырья на примере металлургического комбината







Алексей ПОПОВ

Ольга СУСЛОВА

Елена ВОРОНКОВА

Попов Алексей Тимофеевич — Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), Липецк, Россия. Суслова Ольга Анатольевна — Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), Липецк, Россия. Воронкова Елена Александровна — Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ) Липецк, Россия\*.

Процесс выгрузки железорудного сырья металлургического комбината в адрес агломерационной фабрики долгое время не был предметом специального рассмотрения. За прошедшие годы условия металлургического производства претерпели определённые изменения - произошла его интенсификация, которая влечёт за собой необходимость переоценки параметров стабильной работы агломерационного производства. Целью представленного исследования является рассмотрение вопросов возможного технико-технологического улучшения, гармонизации транспортных потоков с требованиями основного процесса производства. Для достижения данной цели используется методика. основанная на применении методов математического моделирования, в частности, математического аппарата линейного программирования, графоаналитического метода, метода теории вероятности.

Первостепенную позицию занимают вопросы процесса выгрузки, хранения железорудного сырья, его подготовки к агломерационному производству.

В статье представлены основные позиции процесса оптимизации выгрузки агломерационной шихты металлургического комбината. Приведена общая характеристика технологии металлургического производства и каждого процесса в частности. Более подробно расмотрен агломерационный процесс. Приведены таблицы исходного железорудного сырья для агломерационного производства за определённые отчётные периоды, в целях наглядности данные одной из таблиц сведены в диаграмму. Рассмотрена схема стандартного склада руды эстакадного типа, на которой последовательно показаны основные процессы агломерационного производства от подачи сырья на вагоноопрокидыватель до попадания посредством ленточного конвейера в штабель, а далее в приёмные бункеры. Также в статье приведён пример формирования штабелей железорудного сырья с использованием марганцовистого известняка.

В основу исследования закладывается динамическая транспортная задача с задержками (ДТЗЗ), учитывающая время движения грузов, динамику объёмов производства по времени, динамику потребления, запасов у поставщиков и потребителей, стоимости перевозок и хранения, стоимости убытков потребления. В данном исследовании есть несколько монозадач с моногрузом, которые накладываются друг на друга, образуя мультипликативное наложение однопродуктовых задач.

<u>Ключевые слова:</u> промышленный транспорт, металлургический комбинат, выгрузка, железорудное сырьё, математическая модель, оптимизация, агломерация.

### \*Информация об авторах:

Попов Алексей Тимофеевич – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедры opraнизации перевозок Липецкого государственного технического университета (ЛГТУ), Липецк, Россия, popov@stu.lipetsk.ru. Суслова Ольга Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры opraнизации перевозок Липецкого государственного технического университета, Липецк, Россия, suslova\_2003@mail.ru.

**Воронкова Елена Александровна** – аспирант кафедры организации перевозок Липецкого государственного технического университета, Липецк, Россия, makarova, lena27@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 25.01.2020, принята к публикации 27.04.2020.

For the English text of the article please see p. 156.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Процесс выгрузки железорудного сырья и проблема оптимизации данного процесса стали остро интересовать научных исследователей в настоящее время. Этот вопрос пристально не рассматривался, по крайней мере в России, в течение 20 лет. Условия металлургического производства изменились за данный период: выросли объёмы выпуска готовой продукции, планируется их дальнейшее увеличение на существующих производственных мощностях; скорость спекания агломерата на ленте стала выше - произошла интенсификация производства. Таким образом, вопросы процесса выгрузки сырья, его хранения, подготовки к агломерационному производству выходят на первое место [1]. Также значительно увеличилось число компонентов агломерационной шихты: если ранее их количество не превышало десяти, то в настоящее время оно достигает 23-29 наименований. В связи с произошедшими изменениями возникает необходимость исследования транспортной инфраструктуры и операционной структуры технического процесса; его основная цель - найти их несоответствия входящим и выходящим потокам. Целесообразно исследовать возможности гармонизации транспортных потоков требованиям основного производственного процесса с тем, чтобы рассмотреть вопросы возможного технико-технологического улучшения, - что и является целью представленного исследования [1]. Для её достижения используется методика, основанная на применении методов математического моделирования, в частности, математического аппарата линейного программирования; графоаналитического метода; метода теории вероятности.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Прокат с покрытиями и без него — конечный продукт металлургического производства. Чтобы получить этот металлургический продукт, железная руда проходит длинную цепь непрерывных технологических процессов. Работа среднестатистического металлургического комбината включает агломерационное, доменное, коксочает агломерационное, доменное, коксо-

химическое, сталеплавильное, прокатное производство.

Основные компоненты для доменных цехов: агломерат, кокс — получают на агломерационном и коксохимическом производствах соответственно. В свою очередь. доменное производство выпускает чугун, который может являться товарной продукцией первого передела, а не только полуфабрикатом для сталеплавильного производства. Последнее, посредством продувки жидкого чугуна и металлолома кислородом, выпускает сталь, разливаемую в непрерывнолитые заготовки (слябы), которые служат товарной продукцией второго передела, а также используются для производства проката [2-4]. Цель прокатного производства - получение металла необходимой формы, с требуемыми свойствами и структурой [1]. Наиболее продуктивным и эффективным способом металлообработки является прокатка. Прокатка – это процесс деформирования металла между вращающимися валками, в результате чего исходная заготовка вытягивается, а толщина её уменьшается. Данная операция, в свою очередь, подразделяется на горячую и холодную прокатку. Начальная температура стали при горячей прокатке достигает 1000-1200°С. Холодная применяется для получения изделия с лучшим качеством поверхности и механическими свойствами и, как следствие, большей добавочной стоимостью.

# АНАЛИЗ ПРАКТИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Описанный металлургический цикл основывается на агломерационном процессе. Первостепенная цель данной операции — превращение мелкой многокомпонентной шихты в окускованный продукт (агломерат), являющийся для доменной печи основным железорудным сырьём [1]. Если будут недостаточно решены вопросы взаимодействия транспорта и входящих потоков сырья агломерационного производства, то эти сбои по принципу «домино» распространятся на все указанные этапы металлургического передела. Это приведёт к мультипликативному увеличению упущенной выгоды по производству металло-





Таблица 1 Исходное железорудное сырье для агломерационного процесса (октябрь 2019 года)

№ п/п	Наименование	Количество вагонов, ед.	Масса, т	Процентное соотношение, %	В сухом виде
1	Концентрат железорудных агломератов	1387	95704	79,75	86 133, 60
2	Окалина чёрных металлов	6	417	0,35	396,15
3	Руда железная	146	10214	8,51	9314,15
4	Пыль колошниковая	10	522	0,43	502,25
5	Пыль аспирационная	10	573	0,48	553,98
6	Скрап конвертерных цехов (0-10 мм)	23	1 446	1,21	1 446,00
7	Окалина конвертерных цехов	1	65	0,05	63,57
8	Окалина железная КЦ кр.	2	182	0,15	174,17
9	Окалина (горячая прокатка)	11	1003	0,84	975,02
10	Окалина изв. замасленная	6	534	0,45	469,92
11	Щебень фракционный	47	3 2 5 7	2,71	3 105,55
12	Оксид (холодная прокатка)	1	78	0,07	76,28
13	Оксид динамных сталей	1	65	0,05	44,59
14	Отсев металл. доломит	1	78	0,07	78,00
15	Известь	95	5863	4,89	5863,00
	ИТОГО	1747	120000	100,00	109 196,22

Таблица 2 Исходное железорудное сырье для агломерационного процесса (ноябрь 2019 года)

№ п/п	Наименование	Количество вагонов, ед.	Масса, т	Процентное соотношение, %	В сухом виде
1	Концентрат железорудных агломератов	1386	95 663	79,72	86096,70
2	Окалина чёрных металлов Урал	6	417	0,35	396,15
3	Руда железная	146	10214	8,51	9314,15
4	Пыль колошниковая ДЦ-1	6	261	0,22	251,87
5	Пыль колошниковая ДЦ-2	5	261	0,22	253,22
6	Пыль аспирационная ДЦ-1	6	287	0,25	271,50
7	Пыль аспирационная ДЦ-2	5	287	0,25	275,96
8	Скрап конв. цехов (0-10 мм)	23	1 446	1,21	1446,00
9	Окалина конв. цехов	1	65	0,06	62,67
10	Окалина железная КЦ кр.	2	182	0,15	174,94
11	Окалина (горячая прокатка)	11	1003	0,84	960,87
12	Окалина изв. замасленная	6	534	0,45	469,92
13	Щебень фракционный	38	3 2 5 7	2,71	3128, 35
14	Оксид (холодная прокатка)	1	78	0,07	53,51
15	Оксид динамных сталей	1	65	0,05	62,86
16	Отсев металл. доломит	1	78	0,07	78,00
17	Известь	94	5902	4,92	5 902,00
	ИТОГО	1738	120000	100,00	109 198,64

продукции. В настоящий момент остро встаёт вопрос решения данных задач, на что и нацелено проводимое исследование [2—6].

Исходным сырьём для агломерационного процесса являются аглоруды, флюсы (доломит, известняк, известь), железоруд-

ные концентраты (продукты обогащения железных руд), металлургические отходы (колошниковая пыль, окалина, шламы), коксовая мелочь, отсев агломерата и окатышей из доменных цехов, отсеянный мелкий агломерат, который возвращают для повторного спекания (возврат)

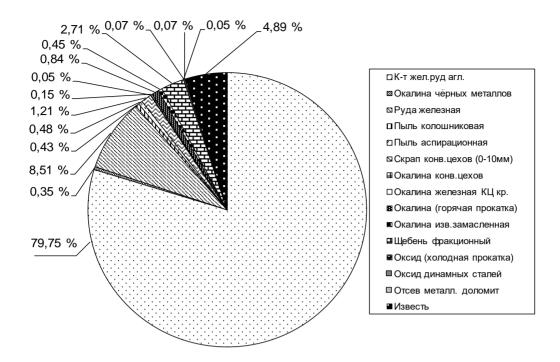


Рис. 1. Среднее процентное соотношение железорудного сырья в штабеле [1] (авторский рисунок).

(табл. 1, 2) [1]. Период закладки зоны (штабеля) зависит от потребного объёма исходного сырья, а также от его наличия и может варьироваться от нескольких дней до нескольких недель.

Анализируя табл. 1 и табл. 2, видим, что наиболее массовым потоком в адрес агломерационного производства является концентрат железных руд, самые маломощные потоки - окалина конвертерных цехов, оксид динамных сталей, холодной прокатки, отсев. Колебания в потоках, приходящих в разные периоды времени, отсутствуют, либо минимальны и составляют от 0,002 % до 0,5 %, что указывает на стабилизацию технологии. То есть, с одной стороны, есть устойчивое ядро стабильности, с другой имеются некоторые изменения. Если существуют изменения, следовательно, имеет место оптимизация, присутствует динамика. Ёмкость штабеля стандартна. Выполнение этих требований, а именно — формирование многослойного штабеля, является основной проблемой для персонала промышленного железнодорожного транспорта. Основная задача подъездного пути необщего пользования - надёжное, безукоризненное транспортное обслуживание.

Агломерация включает следующие операции: усреднение, складирование, подготовка шихты и её спекание, осуществляющееся на агломерационных машинах, охлаждение шихты на охладителях, обработка спечённого агломерата [1]. Усреднение происходит в процессе разработки штабеля, при подаче материала штабеля экскаватором в приёмные бункера (рис. 2), откуда сырьё попадает на технологический ленточный конвейер, питающий ленту спекания. Процессы складирования и усреднения железорудного сырья реализуются на складах агломерационных фабрик в специальные штабели послойно, с обязательным соблюдением заданных пропорций (рис. 1). Количество слоёв и их объём прописаны в соответствующих схемах, пример подобной схемы приведён в табл. 3. На рассматриваемом нами агломерационном производстве штабель формируется из 29 слоёв железорудного сырья.

В процесс подготовки шихты входят следующие операции: дозирование (осуществляется с целью поддержания требуемых количества и соотношения между компонентами). Далее следуют смешивание, увлажнение и окомкование. Послед-





Таблица 3 Формирование штабелей железорудного сырья с использованием марганцовистого известняка. Схема «разрез» штабеля [1]

		ь д	
№ п/п	Наименование слоя	Объём каждого	Объём каждого
_	**	слоя, т	слоя, ваг.
1	Концентрат железных руд	6000	90
2	Марганцовистый известняк	1 080	16
3	Щебень	500	6
4	Концентрат железных руд	2000	30
5	Руда железная	2 2 4 0	32
6	Концентрат железных руд	4 5 0 0	128
7	Скрап	400	7
8	Концентрат железных руд	2000	30
9	Щебень	500	6
10	Концентрат железных руд	4500	128
11	Марганцовистый известняк	1010	15
12	Концентрат железных руд	2000	30
13	Руда железная	2 240	32
14	Концентрат железных руд	4500	64
15	Щебень	500	6
16	Концентрат железных руд	9000	128
17	Скрап	400	7
18	Марганцовистый известняк	1010	15
19	Руда железная	2 2 4 0	32
20	Щебень	500	6
21	Концентрат железных руд	12000	170
22	Щебень	500	6
23	Марганцовистый известняк	1010	15
24	Концентрат железных руд	4 500	64
25	Скрап + окалина	400	7
26	Руда железная	1680	24
27	Концентрат железных руд	9000	128
28	Щебень	500	6
29	Концентрат железных руд	18 000	256
		1	1

ний, в свою очередь, выполняется, чтобы получить однородную смесь компонентов шихты, которые обладают высокой газопроницаемостью в процессе спекания.

Процесс спекания происходит на агломерационных машинах, представляющих замкнутый конвейер, который, в свою очередь, состоит из паллет (спекательных тележек), осуществляющих движение по направляющим рельсам. Когда спекательная тележка проходит под питателем, на неё загружается подготовленная шихта. В момент прохождения загруженной паллеты под газовыми горелками зажигательного горна твёрдое топливо верхнего слоя шихты начинает гореть, и круг горения распространяется сверху вниз. Тележки последовательно пропускают под вакуумкамерами с целью просасывания воздуха

через спекаемую шихту, который требуется для горения твёрдого топлива и удаления продуктов сгорания [1; 2; 4].

Как только в хвосте агломерационной машины отделён горячий возврат, агломерат следует на охладитель. А потом вновь повторяется стадия грохочения, в процессе которой выделяется холодный возврат [2; 4; 7; 8]. Отсортированный агломерат в вагонах направляется в доменный цех.

На рассматриваемом нами металлургическом комбинате агломерационным производством используются открытые склады руды (СР) эстакадного типа (рис. 2) [1].

В состав рассматриваемой агломерационной фабрики входят три склада эстакадного типа: СР (склад руды)-1, СР-2, СР-3. Склад СР-2 имеет в своём составе два штабеля, остальные по одному [1]. В про-

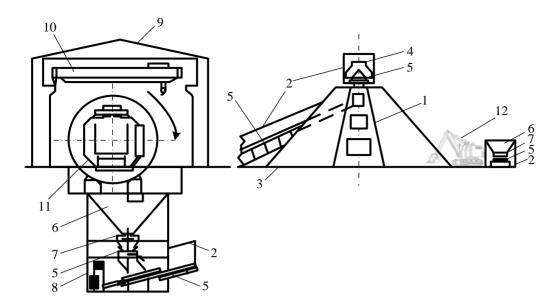


Рис. 2. Склад руды эстакадного типа: 1 – эстакада, 2 – галереи, 3 – подштабельное покрытие, 4 – разгрузочная тележка, 5 – ленточный конвейер, 6 – приёмные бункера, 7 – питатель, 8 – подземная часть приёмного устройства, 9 – здание приёмного устройства, 10 – кран мостовой, 11 – вагоноопрокидыватель, 12 – экскаватор [3].

цессе выгрузки железорудного сырья одновременно формируются два штабеля, каждый из которых представляет собой многокомпонентный «пирог», количество слоёв, их последовательность и объём каждого слоя строго регламентированы. При закладке штабеля необходимо руководствоваться схемой его формирования, пример которой приведён в табл. 3.

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ**

Задачей исследования является построение математической модели оптимизации выгрузки железорудного сырья, в основу которой закладывается динамическая транспортная задача с задержками (ДТЗЗ) [1; 9; 10].

Известны объёмы производства, то есть объём сырья, поступающий со станций примыкания в адрес металлургического комбината,  $\mathbf{A}_{i,}$   $i=\overline{1,x}$ ; объёмы спроса — количество сырья, необходимое для формирования конкретного слоя,  $\mathbf{B}_{j}$ ,  $j=\overline{1,y}$ . Имеем период оптимизации в виде дискретных тактов [0,T], T  $\{0,1,2...\}$ . Известна удельная стоимость единицы груза  $\mathbf{C}_{ij}(t)$  в  $t^{ij}$  момент времени [1].

Чтобы решить поставленную задачу, необходимо минимизировать функционал [1; 9—13]:

$$F = \sum_{t=0}^{T} \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} C_{ij}(t) \cdot U_{ij}(t) + \sum_{t=0}^{T} \sum_{i=1}^{m} C_{i}^{*}(t) \cdot X_{i}^{A}(t) +$$

$$+ \sum_{t=0}^{T} \sum_{j=1}^{n} C_{j}^{*}(t) \cdot X_{i}^{B}(t),$$
(1)

где Uij(t) — объём поставки от i-го поставщика к j-му потребителю, то есть количество вагонов с грузом, отправляемых из  $A_i$  и прибывающих в  $B_i$ в момент времени t;

 $X_{i}^{A}(t)$  — объём запаса железорудного сырья у i-го поставщика в момент времени t;

 $X_i^B(t)$  — объём запаса железорудного сырья у j-го потребителя, в момент времени t:

 $C_{j}^{*}(t)$  — затраты на хранение единицы запаса в момент времени t у i-го поставщика:

 $C_{j}^{*}(t)$  — затраты на хранение единицы груза j-го потребителя в момент времени t [1].

На оптимизацию функционала (1) накладываются такие ограничения, как [1]:

 Уравнение динамики связи поставщиков и потребителей:

$$U_{ij}^{+}(t) = U_{ij}^{-}(t - t_{ij}); (2)$$

$$U_{ij}^{+}(t+t_{ij}) = U_{ij}^{-}(t), (3)$$

где  $U_{ij}^{+}(t)$  — поставка, прибывающая к потребителю;





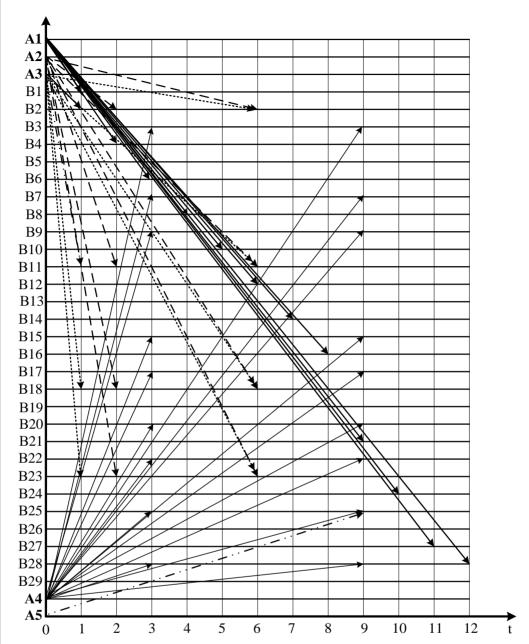


Рис. 3. Диаграмма взаимосвязи периодов оптимизации поставщиков и потребителей (авторский рисунок).

 $U_{ij}^{-}(t) -$  поставка, вышедшая от поставщика;

- $t_{\rm ij}$  время транспортного запаздывания, равная продолжительности транспортировки от  ${\rm A_i}{\rm K}~{\rm B_i}[1].$
- 2. Уравнение динамики запасов у поставщиков [1; 10]:

$$X_i^A(t+1) = X_i^A(t) - \sum_{j=1}^n U_{ij}^-(t) + a_i(t) , \qquad (4)$$

где  $a_i(t)$  — объём поставок.

3. Уравнение динамики запасов потребителей:

$$X_{j}^{B}(t+1) = X_{j}^{B}(t) - \sum_{i=1}^{m} U_{ij}^{+}(t) - b_{j}(t) .$$
 (5)

4. Уравнение баланса объёмов производства, потребления, поставок:

$$\sum_{t=0}^{T} \sum_{i=1}^{m} a_i(t) = \sum_{t=0}^{T} \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} U_{ij}(t) = \sum_{t=0}^{T} \sum_{j=1}^{n} b_j(t) .$$
 (6)

5. Ограничение естественной не отрицательности поставок и запасов [10]:  $U_{ij}(t) \ge 0$ ;  $X_i^A(t) \ge 0$ ;  $X_j^B(t) \ge 0$ .

Получение решения ДТЗЗ возможно, если выполняется условие (7) — динамический баланс объёмов поставщиков и потребителей [1; 14; 15], то есть, если присутствует относительная согласованность их производственных программ:

$$\sum_{t=0}^{T} \sum_{i=1}^{m} a_i(t) \ge \sum_{t=0}^{t+t_{ij}} \sum_{j=1}^{n} b_j(t); \ t = 0, ..., T_0.$$
 (7)

В постановке данной математической модели за поставщика условно примем станции примыкания, обеспечивающие агломерационное производство агломерационным сырьём, в роли потребителя — слой; таким образом, количество потребителей равно числу слоёв в формируемом штабеле. В данном случае металлургический комбинат обслуживают пять станций примыкания. То есть, в поставленной задаче имеем пять поставщиков (А1, А2, А3, А4, А5). Как упоминалось ранее, в формируемом штабеле имеем 29 слоёв, следовательно, в описываемой задаче есть 29 потребителей (В1, ..., В29). Потоком сырья необходимо «попасть» в определённый слой, и каждый из этих слоёв могут формировать несколько поставщиков. Так образуется наслоение, то есть несколько монозадач с моногрузом накладываются друг на друга; в итоге получаем мультипликативное наложение однопродуктовых задач, на основе которых строится диаграмма взаимосвязи периодов оптимизации поставщиков и потребителей (рис. 3).

Количество математических моделей получается равным количеству слоёв в формируемом штабеле. Но не стоит забывать о том, что формировать одновременно два и более слоёв мы не можем, в определённый отрезок времени формируется только один слой.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Исследовав возможности гармонизации транспортных потоков с требованиями основного производственного процесса, авторы смогли представить способы возможного технико-технологического улучшения.

Решив поставленную задачу, мы получаем научно, теоретически обоснованные нормативы технологического простоя сырья в ожидании выгрузки. Становятся известны интервалы и простои в случае несанкционированного прибытия груза.

### **ЛИТЕРАТУРА**

- 1. Попов А. Т., Суслова О. А., Воронкова Е. А. Теоретические основы оптимизации процесса выгрузки железорудного сырья на примере металлургического комбината// Вестник Липецкого государственного технического университета. 2020. № 2(43). С. 36-40.
- 2. Кудрин В. А. Металлургия стали. М.: Металлургия, 1989. 560 с.
- 3. Harrison, A., van Hoek, R. Logistics Management and Strategy. Competing through the supply chain. 3<sup>rd</sup> edition. Prentice hall financial times, 2008, 343 р. [Электронный ресурс]: https://docviewer.yandex.ru/?lang=en&tm=1600715022&tld=ru&name=Logistics+Management +and+Strategy+Competing+Through+the+Supply+Chain.pdf&text=2.+Alan+Harrison%2C+Remko+van+Hoek.+Logistics+Management+and+Strategy%3A+competing+through+the+supply+chain&url=https%3A//vulms.vu.edu.pk/Courses/MGMT615/Downloads/Logistics%2520Management%2520and%25520Strategy%2520Competing%2520Through%2520Inply%2520Chain.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=7a09cc4c3f45d00889f1763e4f234aa5&keyno=0. Доступ 11.12.2019.
- 4. Рябошук С. В., Ковалёв П. В., Кур А. А. Сырьевая база металлургии. СПб., 2018. 60 с.
- 5. Галабурда В. Г. Единая транспортная система: Учебник для вузов. — М.: Транспорт, 1996. — 295 с.
- Рахмангулов А. Н. Железнодорожные транспортно-технологические системы: организация функционирования: Монография. – Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. – 300 с.
- 7. Козлов П. А., Миловидов С. П., Попов А. Т. Организация работы технологического транспорта в промышленных системах // Экономика и математические методы. 1986. № 4 (22). С. 697–703.
- 8. Козлов П. А., Владимирская И. П. Пути повышения обоснованности технологических решений: проблемы и суждения // Вестник ВНИИЖТ: Научнотехнический журнал. 2009.- № 3.- С. 8-13.
- 9. Попов А. Т., Гнедаш М. А. Оптимизация транспортных потоков в системе «производство—транспорт—потребление»: Монография. Липецк: ЛГТУ, 2006. 179 с.
- 10. Попов А. Т., Суслова О. А., Воронкова Е. А. Оптимизация взаимодействия агломерационного и доменного производства на основе динамической транспортной задачи с задержками // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2018. № 2 (36). С. 66—74.
- 11. Попов А. Т. Оптимизация взаимодействия технологического железнодорожного транспорта и производства (на примере металлургического комбината) / Дис... канд. техн. наук. М., МИИТ, 1984. 237 с.
- 12. Нестеров Е. П. Транспортные задачи линейного программирования. М.: Транспорт, 1971. 216 с.
- 13. Канторович Л. В., Горстко А. Б. Математическое оптимальное программирование в экономике. М.: Знание, 1968. 96 с.
- 14. Phillips, D. T., Garcia-Diaz, A. Fundamentals of Network Analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981, 474 р. [Электронный ресурс]: https://books.google.ru/books/about/Fundamentals\_of\_network\_analysis. html?id=w2FRAAAAMAAJ&redir\_esc=y. Доступ 25.02.2020.
- 15. Ford, L. R., Fulkerson, D. R. Flows in Networks. New Jersey: Princeton university press Princeton, 1962, 212 р. [Электронный ресурс]: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/reports/2007/R375.pdf. Доступ 25.02.2020.

