

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОБОРУДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ РАМАМИ

Цыганов А.В.<sup>1</sup>, Шестёркин А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

<sup>2</sup>ООО «Ремпуть», Магнитогорск, Россия

## Аннотация

Рассматривается один из аспектов транспортного обслуживания прокатного производства металлургических предприятий – процесс оборудования железнодорожных вагонов многооборотными средствами крепления (рамами), предназначенными для размещения на них листового рулонного металла. Выявлена неравномерность суточных объемов выпуска данной продукции листопркатными цехами, а также значительный рост количества вагонов, требующих оборудования рамами. Становится актуальным определение предельной перерабатывающей способности пунктов оборудования вагонов рамами при ограниченности производственных ресурсов. В качестве производственных ресурсов, задействованных в процессе оборудования вагонов рамами, рассмотрены трудовые и технические ресурсы. Определение предельной перерабатывающей способности выполнено посредством разработанной оптимизационной математической модели. В статье представлено описание предложенной линейной оптимизационной модели. Выявлены факторы, влияющие на значения параметров моделируемого процесса. Приводятся результаты расчетов с использованием разработанной модели для условий железнодорожной станции «Чугунная» ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», а также сравнение полученных результатов с фактическими данными.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, железнодорожный вагон, листопркатный цех, металлопродукция, листовой прокат, многооборотные средства крепления, рама, оборудование вагонов, сохранность груза, математическая модель, линейное программирование, оптимизация, производственные ресурсы, нормирование времени, перерабатывающая способность.

## Введение

Листовой металл в рулонах является одним из основных видов готовой продукции металлургических предприятий. На ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) листопркатное производство включает производство толстолистового проката, два цеха горячей прокатки, производство металла с покрытием, два цеха холодной прокатки и цех глубокой переработки металла. За 2016 год общий объем производства металлопродукции составил 11.6 млн тонн, из которых на листовой прокат приходится более 80% [1].

Для обеспечения безопасности и сохранности груза при перевозке в вагонах, рулоны размещаются на многооборотных средствах крепления – рамах. Широкая номенклатура листового рулонного металла обуславливает большое разнообразие видов сборных деревянных или сварных металлических конструкций рам. На ММК оборудование вагонов рамами выполняется силами Цеха подготовки вагонов ООО «Ремпуть» на нескольких железнодорожных станциях предприятия. После выполнения данной операции, вагоны подаются в листопркатные цехи для погрузки рулонов.

### Актуальность проблемы, постановка задачи исследования

В последние годы на ММК наблюдается увеличение числа вагонов, которые оборудуются рамами [2, 3]. Например, на железнодорожной станции «Чугун-

ная» их число за период с 2013 по 2015 годы удвоилось и превысило 14.7 тыс. ваг./год (рис. 1).

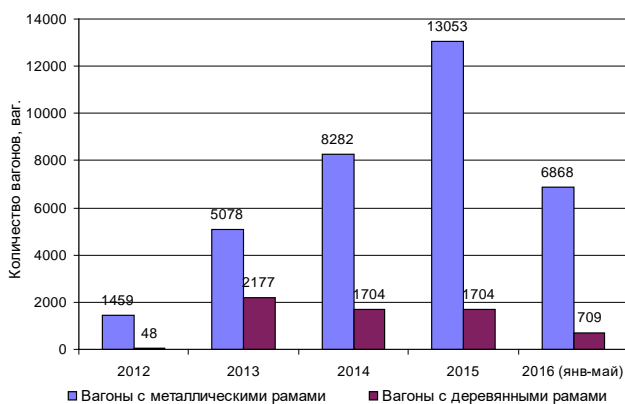


Рис. 1. Динамика оборудования вагонов рамами (станция «Чугунная», ПАО «ММК»)

Анализ организации транспортного обслуживания листопркатных цехов ММК [2, 4, 7] показывает, что необходимое количество вагонов, подаваемых под погрузку определённого вида продукции, рассчитывается и заказывается исходя из суточного плана отгрузки (выпуска) продукции цехами [3, 5, 6]. Наблюдаемая суточная неравномерность оборудования вагонов рамами (рис. 2) в условиях увеличения объёмов отгрузки металла в рулонах потенциально может стать причиной снижения качества транспортного обслуживания цехов в результате невыполнения заявок на подачу в цехи вагонов, оборудованных рамами.

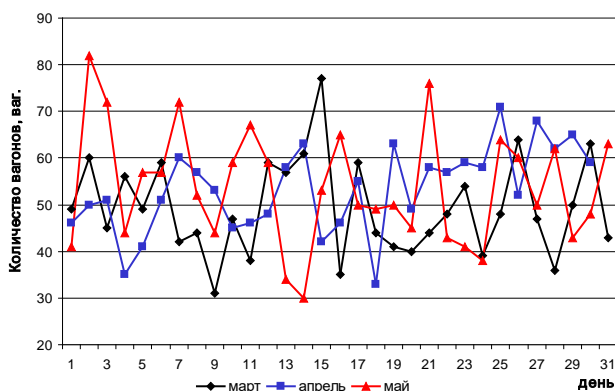


Рис. 2. Суточная неравномерность числа вагонов, оборудованных металлическими и деревянными рамами (станция «Чугунная», ММК, 2016 г.)

В этой связи, определение предельной перерабатывающей способности процесса оборудования вагонов рамами, при ограниченных производственных ресурсах, представляет собой актуальную научно-практическую задачу.

**Модель процесса оборудования вагонов рамами**

Для определения предельной перерабатывающей способности процесса оборудования железнодорожных вагонов рамами разработана оптимизационная математическая модель. Модель состоит из целевой функции и системы ограничений, определяющей взаимосвязь и запасы ресурсов, задействованные в данном процессе.

В модели приняты следующие предположения:

- в качестве переменных в модели принято количество оборудованных вагонов металлическими и деревянными рамами для различных листопркатных цехов;
- в качестве производственных ресурсов, задействованных в процессе оборудования вагонов рамами, приняты трудовые и технические ресурсы. Трудовыми ресурсами являются человеко-часы, затрачиваемые работниками профессии «стропальщик», а техническими – машино-часы работы мостовых кранов;
- значения производственных ресурсов являются нормируемыми (задаваемыми) величинами и используются в качестве основных ограничений, накладываемых на переменные модели.

Целевая функция процесса оборудования вагонов рамами максимизирует количество оборудованных вагонов, при имеющихся объемах (запасах) производственных ресурсов:

$$Z = \sum_{i,j=1}^{m,n} N_{ij} \rightarrow \max, \tag{1}$$

где  $N_{ij}$  – количество вагонов, оборудованных рамами  $i$ -го вида для  $j$ -го листопркатного цеха;  $m$  – количество видов рам;  $n$  – количество листопркатных цехов.

Система ограничений модели включает в себя следующие условия:

- количество вагонов, оборудованных рамами  $i$ -го вида для  $j$ -го листопркатного цеха, не должно быть меньше заданного количества заявок цехов на подачу оборудованных вагонов, а также должно быть величиной положительной:

$$N_{ij} \geq A_{ij}, \tag{2}$$

$$N_{ij} \geq 0, \tag{3}$$

где  $A_{ij}$  – нормированное количество заявок на оборудование вагонов рамами  $i$ -го вида, подаваемых  $j$ -м листопркатным цехом;

- суммарная величина трудозатрат, выраженная через чел.ч/сут., расходуемых на оборудование вагонов рамами, не должна превышать нормируемого фонда времени работы стропальщиков, занятых в данном процессе:

$$\sum_{i,j=1}^{m,n} N_{ij} \cdot a_{ij} \leq T_w, \tag{4}$$

где  $a_{ij}$  – норма времени на оборудование одного вагона рамами  $i$ -го вида для  $j$ -го листопркатного цеха стропальщиками, чел.ч/ваг.;  $T_w$  – суточный фонд времени работы стропальщиков, чел.ч/сут.;

- суммарная величина затрат технических ресурсов, выраженная через маш.ч/сут., расходуемых на оборудование вагонов рамами, не должна превышать нормируемого фонда времени работы кранов

$$\sum_{i,j=1}^{m,n} N_{ij} \cdot b_{ij} \leq T_t, \tag{5}$$

где  $b_{ij}$  – норма времени на оборудование одного вагона рамами  $i$ -го вида для  $j$ -го листопркатного цеха, маш.ч/ваг.;  $T_t$  – суточный фонд времени работы кранов, используемых для погрузки рам, маш.ч/сут.

Решение приведённой математической модели требует определения значений следующих параметров моделируемого процесса:

- количество заявок на оборудование вагонов рамами  $i$ -го вида, подаваемых в  $j$ -й цех;
- норма затрат времени трудовых и технических ресурсов на оборудование одного вагона рамами  $i$ -го вида для  $j$ -го цеха;
- фонд рабочего времени стропальщиков и времени работы кранов.

Значения указанных параметров зависят от вида рам, устанавливаемых в вагон, и номера листопркатного цеха, для которого оборудуются вагоны; утверждённых технических условий размещения и крепления грузов в различных моделях вагонов, а также применяемых способов их оборудования.

Для анализируемой в работе железнодорожной станции «Чугунная» ММК связь параметров моделируемого процесса и факторов, влияющих на их значения, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Факторы, влияющие на значения параметров моделируемого процесса	
Параметры процесса	Факторы
1. Количество заявок	- вид рам, устанавливаемых в вагон; - номер листопркатного цеха
2. Норма времени на оборудование одного вагона	- вид рам, устанавливаемых в вагон; - номер листопркатного цеха; - схема размещения и крепления груза; - модель вагона (погрузочная длина)
3. Фонд времени работы	- вид ресурса; - способ оборудования вагонов рамами; - число смен и их продолжительность

Результаты расчётов

Определение перерабатывающей способности процесса оборудования железнодорожных вагонов рамами с применением математического моделирования проводилась на примере железнодорожной станции «Чугунная» ММК.

Определение первого параметра – «Количество заявок» проводилось на основе информации о ежесуточном количестве вагонов, оборудованных металлическими и деревянными рамами в 2015 году для листопркатных цехов (ЛПЦ) №4, №5, №10, №11 (табл. 2).

Таблица 2

Фрагмент массива данных о количестве оборудованных вагонов

месяц	№ ЛПЦ	кол-во	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
оборудовано метал. рамами:																	
январь	ЛПЦ-10	737	18	17	20	14	8	49	26	14	48	11	39	24	18	10	36
	ЛПЦ-11	63						17	10	9					4	3	
	ЛПЦ-4	145				12	7	19	11					7	6	11	
	ЛПЦ-5	8															
всего за месяц:			953	18	17	32	38	37	58	37	14	48	18	45	24	33	13
февраль	ЛПЦ-10	742	16	19	12	18	23	35	18	18	36	18	30	36	37	38	40
	ЛПЦ-11	36		6	9				5						3	8	5
	ЛПЦ-4	181	10		9	22			18	12	12			13	2	12	2
	ЛПЦ-5	46														11	7
всего за месяц:			1005	26	25	30	40	23	53	35	30	36	31	30	41	57	56
март	ЛПЦ-10	693	25	10	37	28	24	22	18	22	37	31	16	13	18	18	23
	ЛПЦ-11	125	6			11	3							4	7	6	
	ЛПЦ-4	97		1			3	4	4								12
	ЛПЦ-5	35		8							6						
всего за месяц:			950	31	19	37	39	30	26	48	29	37	31	20	20	18	36

Значения данного параметра рассчитывались путём математической обработки статистической информации [8] (рис. 3).

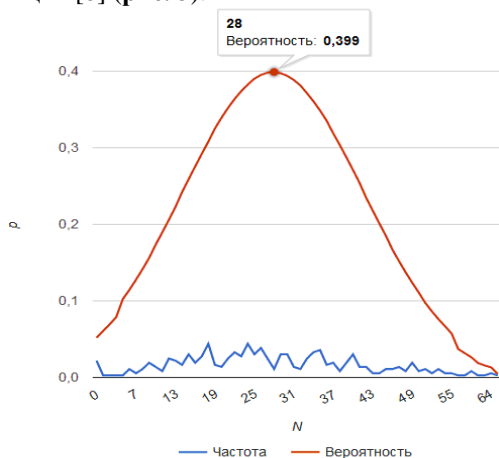


Рис. 3. Полигон эмпирических частот и вероятность для нормального распределения (на примере металлических рам ЛПЦ-10)

Значения второго параметра – «Норма времени на оборудование одного вагона» определялись по утверждённым на предприятии нормам. Значения третьего параметра – «Фонд времени работы» определялись исходя из применяемых способов оборудования вагонов рамами, характеризующихся числом задействованных работников и оборудования.

Решение математической модели процесса оборудования вагонов, проводилось с использованием инструмента «Поиск решения» MS Office Excel (рис. 4).

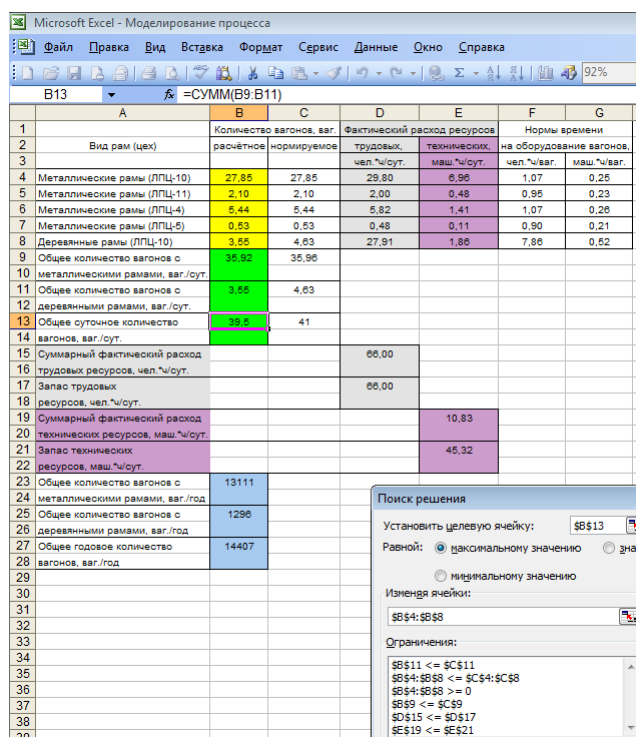


Рис. 4. Пример решения математической модели процесса оборудования вагонов с использованием надстройки MS Office Excel «Поиск решения»

Результаты расчётов предельной перерабатывающей способности процесса оборудования железнодорожных вагонов рамами для различных способов, применяемых на железнодорожной станции «Чугунная» исследуемого предприятия, приведены в табл. 3.

Заключение

Представленные результаты показывают, что для заданных условий определяющим фактором повышения количества оборудованных вагонов рамами является способ их оборудования. Для всех рассмотренных способов оборудования «запасы» трудовых ресурсов расходуются полностью, а технический ресурс (мостовые краны), имеет значительный резерв использования, величина которого варьируется в интервале 59-76%.

Сопоставимость фактических объёмов оборудованных вагонов за 2015 год с результатами выполненных расчётов позволяет сделать вывод, что дальнейшее увеличение объёмов производства возможно

при применении третьего способа оборудования вагонов рамами. В этом случае предельное количество оборудованных вагонов при имеющихся в настоящее время ресурсах и их норме расходования составит 20.3 тыс. вагонов в год.

Таблица 3

Результаты оптимизации процесса оборудования железнодорожных вагонов рамами

Вид рам (листопрокатный цех)	Способ оборудования вагонов рамами		
	1	2	3
Расчётное количество вагонов			
Металлические рамы (ЛПЦ-10), ваг./сут.	27.85	27.85	27.85
Металлические рамы (ЛПЦ-11), ваг./сут.	2.10	2.10	2.10
Металлические рамы (ЛПЦ-4), ваг./сут.	5.44	5.44	5.44
Металлические рамы (ЛПЦ-5), ваг./сут.	0.53	0.53	15.55
Деревянные рамы (ЛПЦ-10), ваг./сут.	0.75	3.55	4.63
Суточное количество вагонов с металлическими рамами, ваг./сут.	35.92	35.92	50.94
Суточное количество вагонов с деревянными рамами, ваг./сут.	0.75	3.55	4.63
Суточное количество вагонов, ваг./сут.	37	40	56
Годовое количество вагонов с металлическими рамами, ваг./год	13111	13111	18592
Годовое количество вагонов с деревянными рамами, ваг./год	274	1296	1690
Суммарное годовое количество вагонов, ваг./год	13385	14407	20282
Затраты ресурсов			
Суммарный фактический расход трудовых ресурсов, чел./сут.	44.0	66.0	88.0
Фонд рабочего времени стропальщиков, чел./сут.	44.0	66.0	88.0
Суммарный фактический расход технических ресурсов, маш./сут.	9.36	10.83	14.55
Фонд времени работы кранов, маш./сут.	22.66	45.32	45.32

Представленная модель и методика оптимизации параметров процесса оборудования железнодорожных вагонов рамами для перевозки листового рулонного металла могут быть использованы для прогнозирования перерабатывающей способности участков подготовки вагонов металлургических предприятий, для определения ограничивающих процесс погрузки ресурсов, а также для выявления и оценки альтернативных способов оборудования вагонов рамами.

Список литературы

1. Годовой отчет ОАО «ММК» за 2016 год. Режим доступа: [http://www.mmk.ru/for\\_investor/annual\\_reports/](http://www.mmk.ru/for_investor/annual_reports/).
2. Разработка программных методов сокращения простоя вагонов ОАО «РЖД» на основе оптимизации маршрутов движения вагонопотоков на подъездном пути ОАО «ММК»: отчет о НИР / Рахмангулов А.Н., Осинцев Н.А. и др. Магнитогорск, 2008. 134 с.
3. Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н. Управление вагонопотоками в промышленных транспортных системах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 1. С. 16-20.
4. Цыганов А.В., Шестёркин А.В. Развитие технологии транспортного обслуживания прокатных цехов металлургического производства. // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов. СПб: ФГОУ ВПО «ПГУПС». 2011. С. 58-61.
5. Цыганов А.В. Оптимизация перевозочного процесса горного района ОАО «ММК» с разработкой предложений по изменению схемы путевого развития и контактной сети. // Актуальные вопросы экономических наук. Новосибирск: ЦРНС, 2009. № 6-3. С. 201-203.
6. Рахмангулов А.Н., Осинцев Н.А., Мишуров П.Н., Копылова О.А. Интеллектуализация транспортного обслуживания металлургических предприятий. Сталь. 2014. №4. С. 115-118.
7. Dynamic Optimization of Railcar Traffic Volumes at Railway Nodes / Rakhmangulov A., Sładkowski A., Osintsev N., Mishkurov P., Muravev D. // Railway Transport – A Systems Approach: Studies in Systems, Decision and Control. 2017, vol. 87. pp. 405-456.
8. Онлайн-калькулятор по статистике. Режим доступа: [www.math.semestr.ru/group/group\\_manual.php/](http://www.math.semestr.ru/group/group_manual.php/)

Материал поступил в редакцию 05.08.2017

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MATHEMATICAL MODEL OF THE EQUIPMENT PROCESS OF RAILCARS BY TRAIN FRAMES

**Tsyganov Aleksandr Vladimirovich** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor  
 Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7-3519-29-85-16. E-mail: [ciganov\\_av@mail.ru](mailto:ciganov_av@mail.ru)  
**Shesterkin Aleksandr Vladimirovich** – Lead Engineer  
 LLC «Remput'», Russia. Phone: +7-912-794-48-03. E-mail: [sash087101@yandex.ru](mailto:sash087101@yandex.ru)

**Abstract**

One of aspects of transport service of rolling production of the metallurgical enterprises is considered i.e. process of the railcars' installation by the multicurrent assets of fixture (frames) intended for placement on them sheet rolled metal. The unevenness of daily production amounts of these products by sheet-rolling shops and also significant increase in number of the railcars requiring the equipment frames are revealed. Determination of the maximum of handling capacity of the points railcars installation by frames in case of limited production resources becomes relevant. The labor and technical resources are considered as the production resources involved in this process. Determining the maximum handling capacity of is carried out with developed optimization mathematical model. The description of proposed linear optimization model is provided. The factors influencing parameters' values of the modelled process are revealed. The result of experimental calculations on the example of a railway station "Chugun-naya" of OJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works and its comparison to actual data are presented.

**Keywords:** rail transport, railcar, sheet-rolling shop, steel products, sheet hire, multicurrent assets of fixture, frame, railcars installation, cargo safety,

mathematical model, linear programming, optimization, production resources, rationing time, handling capacity.

References

1. Godovoj otchet ОАО "ММК" за 2016 god [Annual report of OJSC MMK for the year 2016]. (In Russ.) Available at: [http://mmk.ru/for\\_investor/annual\\_reports/index.php](http://mmk.ru/for_investor/annual_reports/index.php)
2. Programming methods development of railcars downtime reducing of OJSC «Russian Railways» on the basis of railcar flows traffic routes optimization at the siding of OJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works»: report / Rakhmangulov A.N., Osintsev N.A. Magnitogorsk, 2008. 134 p. (In Russ.)
3. Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N. Railcar Traffic Volume Management at Industrial Transport Systems // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2013, vol. 41, no. 1, pp.16-20. (In Russ.)
4. Tsyganov A.V., Shesterkin A.V. Razvitiye tekhnologii transportnogo obsluzhivaniya prokatnyh cekhov metallurgicheskogo proizvodstva [Developing the technology of transport service of rolling workshops of metallurgical production] // Sovremennyye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ehkspluatatsii transportnyh obektov [Modern problems of design, construction and operation of transport facilities]. Saint Petersburg: PSTU.

- 2011, pp. 58-61. (In Russ.)
5. Tsyganov A.V. Optimizatsiya perevoznogo processa gornogo rajona OAO «ММК» s razrabotkoj predlozhenij po izmeneniyu skhemy putevogo razvitiya i kontaktnoj seti. [Optimization of transportation process of the mining area of OJSC MMK with development of offers on changing the scheme of gridiron's development and contact overhead system] // Aktual'nye voprosy ehkonomicheskikh nauk [Actual issues of economic Sciences]. Novosibirsk: CRNS, 2009, no.6-3, pp. 201-203. (In Russ.)
  6. Rakhmangulov A.N., Osintsev N.A., Mishkurov P.N., Kopylova O.A. Intellectualization of Transport Service of the Metallurgical Enterprises // Steel. 2014, no.4, pp. 115-118. (In Russ.)
  7. Dynamic Optimization of Railcar Traffic Volumes at Railway Nodes / Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N. Mishkurov P., Muravev D. // Railway Transport – A Systems Approach: Studies in Systems, Decision and Control. 2017, vol. 87, pp. 405-456.
  8. Online calculator for statistics. (In Russ.) Available at: [www.math.semestr.ru/group/group\\_manual.php/](http://www.math.semestr.ru/group/group_manual.php/)

Received 05/08/2017

---

Цыганов А.В., Шестёркин А.В. Математическая модель процесса оборудования железнодорожных вагонов рамами // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2017. Т.7. №1. С. 22-26

Tsyganov A.V., Shesterkin A.V. Mathematical model of the equipment process of railcars by train frames // *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern Problems of Russian Transport Complex]. 2017, vol.7, no.1, pp. 22-26

---