

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 656.212.5:625.1

И. А. ЕЛОВОЙ<sup>1\*</sup>, Е. Н. ПОТЫЛКИН<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управление грузовой и коммерческой работой», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (529) 734 11 40, эл. почта ugkr@belsut.gomel.by, ORCID 0000-0001-9178-563X

<sup>2\*</sup>Каф. «Управление грузовой и коммерческой работой», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (529) 808 77 87, эл. почта gkrt@inbox.ru, ORCID 0000-0003-3872-8243

### РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ДЛЯ ВЫБОРА РЕЖИМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАНЦИЙ И ПУТЕЙ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

**Цель.** Основной целью работы должно стать получение функциональных зависимостей для расчета оптимальных значений интервалов между подачами вагонов на фронты погрузки, выгрузки по критерию минимизации эксплуатационных затрат. Это позволит обосновывать выбор эффективных режимов взаимодействия железнодорожных станций и путей необщего пользования. **Методика.** Для достижения поставленной цели использованы методы научного анализа и синтеза, метод Брандона при аппроксимации функции, экспериментально-статистические методы составления математических зависимостей. **Результаты.** Получены формулы по определению: 1) оптимальных значений интервалов между подачами вагонов на места погрузки-выгрузки по критерию минимизации затрат при режиме взаимодействия железнодорожных станций с путями необщего пользования через расчетные интервалы времени; 2) групп вагонов среднего размера в составе одной подачи на путь необщего пользования; 3) продолжительности маневровой работы по расстановке вагонов у фронтов погрузки-выгрузки. **Научная новизна.** Усовершенствованы функциональные зависимости для определения оптимальных значений интервалов между подачами вагонов на фронты погрузки, выгрузки по критерию минимизации эксплуатационных затрат. Это стало возможным благодаря полученным формулам, которые учитывают влияние: 1) количества грузовых фронтов, задействованных в маневровых операциях с вагонами у мест погрузки-выгрузки; 2) групп вагонов среднего числа и размера, находящихся на пути необщего пользования; 3) подачи-уборки вагонов среднего размера; 4) наличия выставочных путей для перезарядки фронтов; 5) суммарной полной длины путей, задействованных в перезарядке фронтов погрузки-выгрузки. **Практическая значимость.** Полученные функциональные зависимости можно использовать при определении параметров цикла подачи-уборки вагонов на фронты погрузки-выгрузки, а также оптимальных значений интервалов между подачами при взаимодействии железнодорожной станции и путей необщего пользования. Использование полученных результатов позволит: 1) выявить слабые позиции при организации работы станции примыкания и путей необщего пользования; 2) уменьшить издержки владельцев железнодорожных путей необщего пользования и железной дороги в целом за счет минимизации экономических и временных потерь и, как следствие, повысить конкурентоспособность железнодорожного транспорта на рынке транспортных услуг.

**Ключевые слова:** путь необщего пользования; режим взаимодействия; подача-уборка вагонов; маневровые операции; интервал между подачами вагонов

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Введение**

Пути необщего пользования являются важным элементом в логистической цепи движения ресурсов, поскольку они представляют собой связующие звенья в цепочке перевозочного процесса грузов от отправителя до получателя. На сети Белорусской железной дороги многие из них были построены в советское время, когда в стране функционировала плановая система экономики. В настоящее время в Республике Беларусь развивается рынок транспортных услуг, и современные тенденции его роста способствуют совершенствованию грузовой и коммерческой работы на железнодорожном транспорте, что связано с появлением операторов вагонных парков и конкурирующих перевозчиков, обеспечением погрузки и выгрузки грузов преимущественно на железнодорожных путях необщего пользования, возросшими требованиями клиентов к сокращению сроков доставки и согласования перевозок. Все это требует наличия современных технологических решений, направленных как на оптимизацию взаимодействия железной дороги с грузоотправителями и грузополучателями, так и на совершенствование внутренних технологических процессов, что будет способствовать повышению уровня конкурентоспособности железнодорожного транспорта на рынке транспортных услуг. Следовательно, проблемы взаимодействия железнодорожных станций и путей необщего пользования являются актуальными для Белорусской железной дороги, обуславливая важность данного научного исследования.

**Цель**

Технологические параметры взаимодействия путей необщего пользования с железнодорожными станциями играют важную роль при обосновании выбора эффективных режимов взаимодействия. Однако при их определении возникает ряд трудностей, связанных с достаточно большой трудоемкостью их определения. Поэтому целью представленной работы является установление аналитических зависимостей оптимальных значений интервалов между подачами вагонов на грузовые фронты по экономическому критерию, позволяющих минимизировать затраты в процессе взаимодействия же-

лезнодорожных станций с путями необщего пользования.

**Методика**

Для достижения поставленной цели при проведении данного исследования использованы методы научного анализа и синтеза, метод Брандона при аппроксимации функции, экспериментально-статистические методы составления математических зависимостей [8].

**Результаты**

Вопросами эксплуатации железнодорожных подъездных путей с середины 20-го века занимались Ферапонтов Г. В., Сотников И. Б. В их трудах рассмотрены проблемы взаимоотношения железных дорог и ветвладельцев, дано описание единых технологических процессов, обобщены опыт передачи железнодорожных подъездных путей в ведение железных дорог и практика организации работы на них, дан анализ использования подвижного состава на подъездных путях [13, 14]. Проблемы же организации процессов грузовой работы как на местах необщего пользования, так и на местах общего пользования занимались Смахов А. А. и Лазарев Х. М., Григорюк В. Ф. В их работах представлены решения оптимизации грузовой работы, сопутствующих и предшествующих элементов грузовой работы и др. [5, 10]. В 80-е годы исследованиями по применению математических методов и ЭВМ для расчетов оптимального использования грузоподъемности и вместимости вагонов, технического оснащения грузовых фронтов и управления ими, для оптимального планирования работы кранов на контейнерных пунктах и выбора их наиболее выгоднейших параметров, для автоматизации коммерческих операций занимались Правдин Н. В., Дыканюк М. Л., Негрей В. Я. [11].

В настоящее время в области взаимодействия железнодорожных станций с путями необщего пользования также ведутся исследования. Серазетдиновой А. Д. разработана методика управления вагонопотоками на путях необщего пользования в условиях изменения их структуры и интенсивности, учитывающая оперативную загруженность станций. [12]. Теоретическими исследованиями и разработкой научно обоснованных подходов к моделированию

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

взаимоотношений корпорации «Российские железные дороги» с регионами и хозяйствующими субъектами для повышения эффективности взаимодействия занималась Афанасьева Н. А. Она разработала: показатель оценки эффективности сотрудничества корпорации «Российские железные дороги» с регионами страны; методику обоснования совместной программы развития транспортной инфраструктуры в регионе с учетом интересов корпорации и региона; показатель оценки развития региона вследствие реализации совместных программ [1]. Кроме того, среди современных ученых, занимающихся исследованием взаимодействия железнодорожных станций с путями необщего пользования, следует выделить Гарлицкого Е. И., Вернигору Р. В., Козаченко Д. Н. [3, 4, 7], а также иностранных Gert-

Joost Peek, Jyh-Cherng Jong, Lorenzo Mussone [15, 16, 17].

Анализ трудов ученых показал, что традиционно применяются три основных режима их взаимодействия: через равные интервалы времени, по расписанию, по уведомлению.

Каждый из представленных режимов характеризуется циклом подачи-уборки вагонов на путь необщего пользования или маневровый район, который включает в себя ряд последовательно выполняемых операций: ожидание подачи вагонов, подача, ожидание и выполнение маневровых операций по расстановке групп вагонов у мест погрузки, выгрузки, ожидание уборки вагонов, уборка. Формулы, с помощью которых принято определять численные значения этих элементов, сведены в табл. 1.

Таблица 1

## Формулы для определения составляющих цикла подачи-уборки вагонов

Table 1

## Formulas for determining the components of cycle of cars delivery-removal

Наименование операции (величины) (параметра)	Формула	Примечания
Продолжительность полурейса	$t_{п/р} = \frac{(\alpha_{рт} + \beta_{рт} m) \cdot \frac{v}{2} + 3,6 \cdot \frac{l_{п/р}}{v}}{60}$	$\alpha_{рт}$ , $\beta_{рт}$ – коэффициенты, учитывающие время необходимое для изменения скорости движения локомотива и каждого вагона на 1 км/ч при разгоне соответственно, и время, необходимое для изменения скорости движения на 1 км/ч при торможении;
Технологическое время на сборку вагонов	$t_{сб} = 1,8 p_{сб} + 0,3 n_{сб}$	$m$ – количество вагонов в составе, вагонов;
Технологическое время на сортировку вагонов	$t_c = A g_\phi + B n_c$	$v$ – допустимая скорость движения при маневрах, км/ч;
Продолжительность ожидания выполнения операции	$t_{ож} = \frac{\rho^2 (v_{вх}^2 + v_{обсл}^2)}{2\lambda(1-\rho)}$	$l_{п/р}$ – длина полурейса, м;
		$p_{сб}$ – количество путей, с которых переставляются вагоны;
		$n_{сб}$ – количество вагонов, переставляемых на путь сборки;
		$g_\phi$ – количество групп формирования на пути накопления;
		$A, B$ – нормативные коэффициенты, мин;
		$n_c$ – среднее количество сортируемых вагонов [9];
		$v_{вх}$ , $v_{обсл}$ – коэффициенты вариации входящего потока требований и продолжительности обслуживания соответственно;
		$\rho$ – загрузка обслуживающего устройства;
		$\lambda$ – интенсивность поступления требований, требований/ч [2]

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Взаимодействие железнодорожной станции и пути необщего пользования предусматривает подачу вагонов на фронты погрузки выгрузки в среднем через интервал времени  $I_n$ . При этом, как правило, накопление вагонов на состав подачи происходит на пути станции при-  
мыкания (рис. 1).

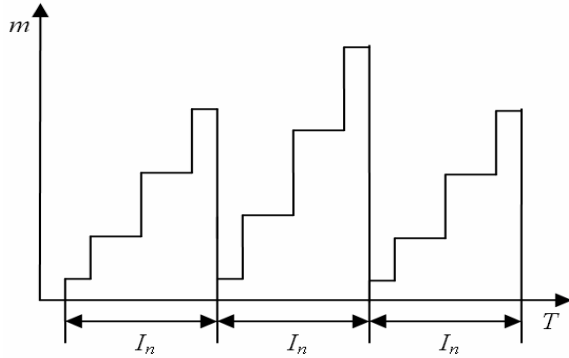


Рис. 1. Накопление вагонов на состав подачи на пути станции при-мыкания

Fig.1. Accumulation of cars for the train of supply to the tracks of connecting station

Вагоно-часы накопления вагонов для подачи на грузовые фронты  $i$ -го маневрового района составляют

$$B_i = \frac{I_n \cdot m_i^{ny}}{2}, \quad (1)$$

где  $I_n$  – продолжительность накопления вагонов на состав подачи, ч/подачу;  $m_i^{ny}$  – размер подачи (уборки) на  $i$ -й маневровый район, вагонов.

Приняв, что продолжительность накопления вагонов на состав подачи одинакова и равна  $I_n$  (рис. 1), размер подачи (уборки) на  $i$ -й маневровый район (пути необщего пользования) рассчитывается по формуле

$$m_i^{ny} = \alpha_i \cdot I_n \cdot k_n, \quad (2)$$

где  $\alpha_i$  – интенсивность накопления (поступления) вагонов на пути для подачи на фронты погрузки, выгрузки  $i$ -го маневрового района (пути необщего пользования);  $k_n$  – коэффициент неравномерности.

Приняв во внимание то, что для подачи на фронты погрузки, выгрузки  $i$ -го маневрового района (пути необщего пользования) на путь

накопления поступает вагонов в количестве  $m_{cp}^{сут}$ , интенсивность накопления можно представить в следующем виде:

$$\lambda_i = \frac{m_{cp}^{сут}}{24}, \quad (3)$$

где  $m_{cp}^{сут}$  – среднесуточное количество вагонов, поступающих на маневровый район (пути необщего пользования).

Затраты на накопление вагонов рассчитываются по формуле

$$Z_{накi} = \frac{I_n \cdot m_i^{ny}}{2} \cdot C_{6-ч}, \quad (4)$$

где  $C_{6-ч}$  – стоимость одного вагоно-часа, ден.ед./вагоно-час.

Приняв, что подачу вагонов, накопленных на состав подачи, на  $i$ -й маневровый район выполняет один локомотив, затраты на выполнение маневровой работы определяются по формуле

$$Z_{м.р.i} = C_{л-ч} \cdot T_{м.р.i}, \quad (5)$$

где  $C_{л-ч}$  – стоимость одного локомотиво-часа, ден.ед./локомотиво-час;  $T_{м.р.i}$  – продолжительность выполнения маневровой работы на  $i$ -ом маневровом районе (пути необщего пользования) одним локомотивом, ч,

$$T_{м.р.i} = T_{подi} + T_{перезi} + T_{убi}, \quad (6)$$

где  $T_{подi}$  – продолжительность подачи вагонов на  $i$ -й маневровый район, ч;  $T_{перезi}$  – продолжительность маневровых операций с вагонами у мест погрузки, выгрузки на  $i$ -ом маневровом районе, ч;  $T_{убi}$  – продолжительность уборки вагонов с  $i$ -ого маневрового района, ч.

Особое внимание следует уделить маневровым операциям с вагонами у мест погрузки-выгрузки, которые представляют собой совокупность последовательных полурейсов с учетом смены направления движения локомотива, укладки тормозных башмаков, перекрытия концевых кранов, разъединения тормозных рукавов, расцепки и т.п. В настоящее время продолжительность выполнения указанных манев-

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ровых операций принято определять суммированием продолжительностей полурейсов и смен направления движения. Однако данный способ является громоздким, но в то же время достаточно точным. В то же время маневровые операции с вагонами у мест погрузки, выгрузки можно представить в виде набора операций по сборке и сортировке групп вагонов, при этом нужно учесть путевое развитие маневрового района, где расположены фронты погрузки, выгрузки. Анализ схем путевого развития путей необщего пользования на сети Белорусской железной дороги позволил выделить среди них два основных типа: 1) схемы, на которых есть выставочный путь; 2) схемы, на которых нет выставочного пути. Продолжительность маневровых операций с вагонами у мест погрузки, выгрузки будет различной для представленных схем. На рис. 2 приведена технология их выполнения на путях необщего пользования, где есть выставочный путь.

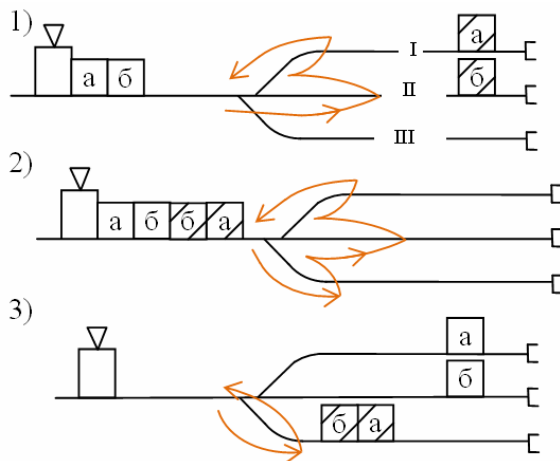


Рис. 2. Последовательность маневровых операций по расстановке вагонов у мест погрузки, выгрузки при наличии выставочного пути: I, II – погрузочно-выгрузочные пути; III – выставочный путь

Fig. 2. The sequence of shunting operations for car spotting at the places of loading, unloading in the presence of goods siding:

I, II – loading and unloading tracks; III – goods siding

В таком случае маневровая работа с вагонами включает в себя две сборки и одну сортировку вагонов (рис. 2), а ее продолжительность составляет

$$T_{\text{перез}} = t_{c1} + t_{c\bar{0}1} + t_{c2}.$$

Подставляя в формулу вместо  $t_c$ ,  $t_{c\bar{0}}$ , равенства из табл. 1, после упрощения и введения средних значений переменных, получается:

$$T_{\text{перез}} = 1,8 \cdot (p + 1) + A \cdot (g_{cp} + 1) + m_{cp}^{ny} \times \\ \times (0,3 + B) + m_{cp}^{sp} \cdot (0,6 + B),$$

где  $g_{cp}$  – среднее число групп вагонов, находящихся на пути необщего пользования (маневровом районе), которые задействованы в перезарядке, групп;  $m_{cp}^{ny}$  – средний размер подачи (уборки) вагонов;  $m_{cp}^{sp}$  – средний размер группы вагонов;  $p$  – число путей, на которые поступают вагоны в процессе выполнения маневровых операций с вагонами у мест погрузки-выгрузки.

Технология выполнения маневровых операций у пунктов погрузки, выгрузки на путях необщего пользования в случае отсутствия выставочного пути приведена на рис. 3.

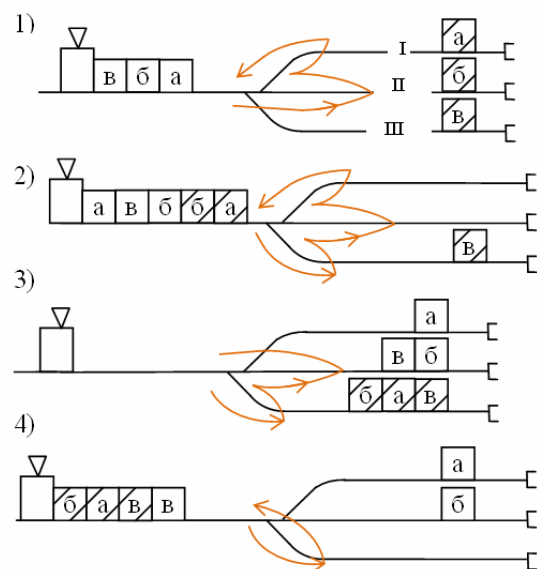


Рис.3. Последовательность операций по расстановке вагонов у мест погрузки, выгрузки при отсутствии выставочного пути: I, II, III – погрузочно-выгрузочные пути

Fig. 3. The sequence of shunting operations for car spotting at the places of loading, unloading in the absence of goods siding:

I, II, III – loading and unloading tracks

Продолжительность выполнения маневровых операций с вагонами у мест погрузки, вы-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

грузки по технологии, представленной на рис. 3, рассчитывается по формуле

$$T_{\text{перез}} = A \cdot (p + 1) + 1,8 \cdot (g_{cp} + 1) + 2 \cdot m_{cp}^{my} \times \\ \times (0,3 + B) + m_{cp}^{zp} \cdot (g_{cp} \cdot (0,3 + B) + B).$$

Значения продолжительностей маневровой работы, полученные по представленным формулам, значительно отличаются от эмпирических данных. Представленный способ расчета по формулам сортировки, сборки является простым, однако недостаточно точным. Неточность этого способа обоснована тем, что формулы, приведенные в табл. 1, приспособлены для определения продолжительности маневровой работы на железнодорожных станциях, которые в отличие от путей необщего пользования характеризуются территориальной сосредоточенностью путей, компактностью стрелочных зон и др. Поэтому для повышения точности расчета данным способом необходимо ввести дополнительные переменные. На основании анализа собранных статистических данных установлено, что продолжительность выполнения маневровых операций с вагонами у мест погрузки, выгрузки зависит от: суммарной полной длины путей, задействованных в маневровых операциях, среднего размера группы вагонов, количества вагонов в составе подачи, количества путей, на которые поступают вагоны в процессе выполнения маневровой работы с вагонами у мест погрузки, выгрузки, наличия выставочных путей, среднего числа групп вагонов, находящихся на пути необщего пользования (маневровом районе), количества фронтов погрузки, выгрузки. В общем виде искомая функция будет зависеть от следующих параметров

$$F = f(g_{cp}, m_{cp}^{my}, m_{cp}^{zp}, p, \sum l^{\text{пол}}, N_{\phi}), \quad (7)$$

где  $\sum l^{\text{пол}}$  – сумма полных длин путей, задействованных при выполнении маневровых операций с вагонами у мест погрузки-выгрузки, м;  $N_{\phi}$  – количество грузовых фронтов, задействованных при выполнении маневровых операций с вагонами у мест погрузки-выгрузки.

С помощью методов регрессионного анализа, которые относятся к экспериментально-статистическим методам составления матема-

тических моделей, установлены зависимости продолжительности маневровых операций с вагонами у мест погрузки-выгрузки. При наличии выставочного пути в маневровом районе (пути необщего пользования), используемого для расстановки вагонов, функция имеет следующий вид:

$$T_{\text{перез}} = 1,8 \cdot (p + 1) + A \cdot (g_{cp} + 1) + \\ + (m_{cp}^{my} \cdot (0,3 + B) + m_{cp}^{zp} \cdot g_{cp} \cdot (0,6 + B)) \times \\ \times (0,0131p + 0,0368)(0,0745 \cdot N_{\phi} + 0,7612) + \\ + 1,3 \frac{p}{N_{\phi}} (0,0552 \cdot \frac{\sum l^{\text{пол}}}{p} + 7,6169) \times \\ \times (0,3074 \cdot N_{\phi} + 0,0779).$$

При отсутствии выставочного пути

$$T_{\text{перез}} = 1,8 + A + A \cdot p + 1,8 \cdot g_{cp} + \\ + (2 \cdot m_{cp}^{my} \cdot (0,3 + B) + m_{cp}^{zp} \cdot (g_{cp} \cdot (0,3 + B) + B)) \times \\ \times (0,0289p - 0,1345)(1,4091 - 0,1713 \cdot N_{\phi}) + \\ + (0,087 \cdot \frac{\sum l^{\text{пол}}}{p} + 10,215) \times (0,1609 \cdot N_{\phi} + 0,4369).$$

Среди достоинств полученных зависимостей следует выделить соблюдение технологии: формула (7) основана на том, что в процессе выполнения маневровых операций с вагонами у мест погрузки, выгрузки выполняются последовательно сборка, сортировка, сборка вагонов; формула (4) – сборка, сортировка, сборка, сортировка. Это предоставляет возможность для дальнейшего установления целесообразности осуществления маневровой работы у мест погрузки-выгрузки на путях необщего пользования крупных промышленных предприятий по технологии: сборка на фронтах, уборка вагонов на пути накопления, подача вагонов на фронты погрузки, выгрузки. К недостаткам можно отнести отсутствие зависимости функции  $F$  от длины стрелочной зоны. Однако анализ путей необщего пользования на сети Белорусской железной дороги показал, что большинство из них имеют путевое развитие с длиной стрелочной зоны до 100 м, что учтено коэффициентами  $A$  и  $B$ .

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Однако при использовании полученных формул могут возникнуть проблемы, связанные с определением среднего размера группы вагонов. Весомый вклад в исследование средней величины группы вагонов внес Сотников Е. А. Однако следует отметить, что в полученной им зависимости среднее число назначений, на которые прибывают вагоны в одном поезде, находится в интервале, зависящем от общего количество назначений. В связи с этим возникают трудности при использовании этой формулы при выполнении расчетов. Поэтому на основании статистических данных с помощью уравнения множественной регрессии методом Брандона получена аналитическая зависимость среднего размера группы вагонов в составе одной подачи-уборки от зависящих параметров. Особенность метода заключается в том, что порядок расположения выбранных факторов не безразличен для точности обработки результатов наблюдений: чем больше влияние на исследуемую величину оказывает выбранный параметр, тем меньше должен быть его порядковый номер. Основываясь на значениях коэффициентов детерминированности, определена последовательность использования переменных и получена формула для определения средней величины группы вагонов в составе подачи (уборки)

$$m_{cp}^{гр} = \frac{2,28}{N_{\phi}} \cdot (0,15 \cdot m_{cp}^{сут} - 0,0017 \cdot (m_{cp}^{сут})^2) \times \\ \times (0,16 \cdot m_{cp}^{ny} - 0,0006 \cdot (m_{cp}^{ny})^2).$$

На основании формул (1) и (2) можно определить суммарные затраты на выполнение маневровой работы и накопление, приходящиеся на один вагон

$$F_{п} = \frac{I_{п} \cdot C_{\phi-q}}{2} + \frac{C_{л-ч} \cdot T_{м.р.и}}{\alpha_i \cdot I_{п} \cdot k_{н}}.$$

Функция  $F_{п}$  непрерывна и дифференцируема по  $I_{п}$ . Поэтому оптимальное значение  $I_{п}$  можно определить из уравнения

$$dF_{п}(I_{п})/dI_{п} = 0. \quad (8)$$

В ходе решения данного уравнения введены следующих обозначения:

$$Z = 30 \cdot C_{\phi-q} - \frac{0,001368}{N_{\phi}} \cdot (0,6 + B) \cdot C_{л-ч} \cdot g \cdot c_{р} \times \\ \times (0,0745 \cdot N_{\phi} + 0,7612) \times \\ \times (0,0131 \cdot p + 0,0368) \cdot \lambda \cdot k_{н} \times \\ \cdot (0,15 \cdot m_{cp}^{сут} - 0,0017 \cdot (m_{cp}^{сут})^2),$$

$$R = \frac{p}{N_{\phi}} \cdot (0,0552 \cdot \frac{\Sigma I^{пол}}{p} + 7,6169) \times \\ \times (0,3074 \cdot N_{\phi} + 0,0779),$$

$$W_{п} = \lambda_{рп} \cdot \frac{v_{под}}{120} + 0,06 \cdot \frac{I_{п/р}}{v_{под}},$$

$$W_{y} = \lambda_{рп} \cdot \frac{v_{уб}}{120} + 0,06 \cdot \frac{I_{п/р}}{v_{уб}},$$

$$D = \frac{24 \cdot C_{л-ч}}{m_{cp}^{сут} \cdot k_{н}},$$

$$h_1 = 1 + \frac{\rho_{лок} \cdot (v_{вх1}^2 + v_{обсл1}^2)}{2 \cdot (1 - \rho_{лок})},$$

$$h_2 = (1 + \frac{\rho_{лок} \cdot (v_{вх2}^2 + v_{обсл2}^2)}{2 \cdot (1 - \rho_{лок})}),$$

$$h_{т} = \frac{60 \cdot Q_{п} \cdot (1 - \gamma) \cdot t_a \cdot (v_{вха}^2 + v_{обсла}^2)}{2 \cdot (y \cdot T \cdot q_{п} - Q_{п}) \cdot Z},$$

где  $v_{вх1}$ ,  $v_{вх2}$ ,  $v_{вха}$  – коэффициенты вариации входящего потока, подач, уборок вагонов, автомобилей соответственно;  $v_{обсл1}$ ,  $v_{обсл2}$ ,  $v_{обсла}$  – коэффициенты вариации продолжительности обслуживания, подач, уборок вагонов, автомобилей соответственно;  $\rho_{лок}$  – загрузка локомотива;  $Q_{п}$  – объем грузопереработки, тонно-операций в сутки;  $q_{п}$  – эксплуатационная норма выработки механизма, отнесенная к 1 ч его работы, т/ч;  $y$  – количество погрузочно-разгрузочных механизмов на грузовом фронте;  $\gamma$  – доля от общей загрузки механизмов при обслуживании входящего потока вагонов;  $T$  – продолжительность работы грузового фронта в течении суток, ч;  $t_a$  – продолжительность обслуживания одного автомобиля, ч [10].

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Решив уравнение (8), относительно  $I_{п}$  в случае наличия выставочного пути в маневровом районе (пути необщего пользования) получено

$$I_{п1} = \sqrt{\frac{W_{п1} + W_{y1} + 1,8(p+1) + R + A(g_{cp} + 1)}{Z}} \cdot D.$$

При недетерминированном потоке подач вагонов в продолжительности маневровой работы на маневровом районе (пути необщего пользования) необходимо учесть возможные ожидания [10]. В результате получена формула по определению оптимального интервала между подачами вагонов на фронты погрузки, выгрузки по критерию минимизации эксплуатационных затрат в случае наличия выставочного пути в маневровом районе:

$$I_{п2} = \sqrt{\frac{W_{п2} \cdot h_1 + W_{y2} \cdot h_2 + 1,8 \cdot (p+1) + A \cdot (g_{cp} + 1) + R + h_r}{Z}} \cdot D. \quad (9)$$

Следует отметить, что представленные формулы работают в условиях, когда производится расстановка вагонов у фронтов погрузки-выгрузки в пределах одного маневрового района. В случае, если за одну подачу-уборку обслуживаются несколько районов, то следует выполнить суммирование  $T_{перез}$ , с введением коэффициента сдвоенных операций при перестановке вагонов из одного маневрового района в другой.

На основании полученных зависимостей построен график, представленный на рис. 4, отражающий зависимость оптимального по критерию минимизации затрат интервала между подачами вагонов от интенсивности их накопления и числа путей.

Как видно из рис. 4 значения интервалов между подачами, полученные по формуле (9), заключены в пределах от 3 до 9 часов. На основании чего можно сделать вывод об адекватности разработанной модели, отражающей реальную действительность.

Стоит учесть, что главная цель оптимизационных расчетов заключается в определении наиболее чувствительных элементов, влияющих на интервал между подачами вагонов на пути необщего пользования. В связи с этим

проведено исследование степени влияния исходных параметров на относительные изменения целевой функции по упрощенной схеме, в которой действие каждого параметра оценивается в отдельности, в то время как остальные величины принимаются постоянными. Рассмотренные параметры имеют неодинаковую физическую сущность и размерность. Поэтому для их сравнения между собой по степени влияния на целевую функцию  $F_{п}$  все они приводятся к безразмерному виду, т. е. находится процент отклонения определенного параметра от его расчетного или оптимального значения [6]. Относительные приращения исследуемого параметра и целевой функции рассчитываются по формулам:

$$\Delta_p^i = \left| \frac{\Delta pr_i}{pr_i} \right|,$$

$$\Delta_{F}^i = \frac{F_{п}(pr_i + \Delta pr_i) - F_{п}(pr_i)}{F_{п}(pr_i)},$$

где  $pr_i$  – исследуемый параметр;  $\Delta pr_i$  – погрешность параметра.

В результате исследования построен график зависимости  $\Delta_{F}^i = f(\Delta_p^i)$ , представленный на рис. 5.

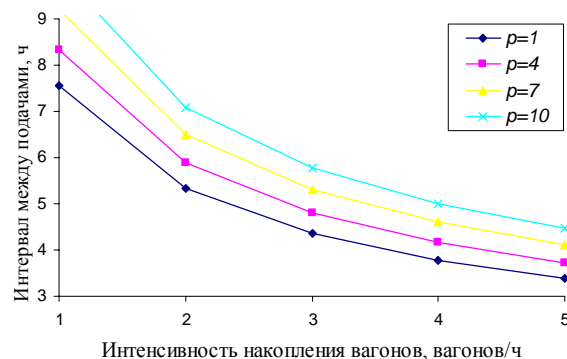


Рис. 4. График зависимости оптимального по критерию минимизации затрат интервала между подачами от интенсивности накопления вагонов при различном числе путей

Fig. 4. A dependence graph of the optimal interval between car deliveries according to the criterion of minimizing the costs on the intensity of cars accumulation at the different number of tracks

На основании анализа рис. 5 и полученных результатов можно сделать вывод о том, что по



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

степени влияния каждого из параметров на целевую функцию их следует располагать в следующей последовательности:

1) среднесуточное количество вагонов, поступающих на путь необщего пользования ( $M_{\text{сут}}$ );

2) суммарная полная длина путей, задействованных при маневрах ( $\sum L$ );

3) число таких путей ( $p$ );

4) среднее число групп вагонов, находящихся на пути необщего пользования (маневровом районе) ( $g$ );

5) количество грузовых фронтов, задействованных в маневровых операциях с вагонами у мест погрузки-выгрузки ( $N_{\phi}$ ).

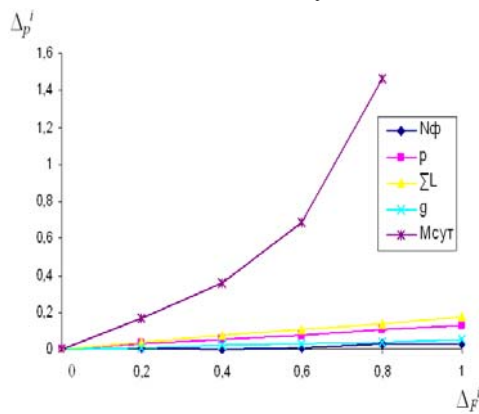


Рис. 5. График зависимости относительных изменений целевой функции от относительных приращений параметров

Fig. 5. A dependence graph of the relative changes in the objective function on the relative increments of the parameters

Полученные зависимости предоставляют возможности для дальнейших исследований взаимодействия железнодорожной станции примыкания и станции, формирующей в ее адрес передаточные поезда, а также взаимодействия путей необщего пользования и станции примыкания в условиях функционирования вагонов грузоотправителей, грузополучателей.

### Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

– усовершенствованы функциональные зависимости для определения оптимальных зна-

чений интервалов между подачами вагонов на грузовые фронты при детерминированном и недетерминированном потоках подач вагонов на пути необщего пользования;

– предложены формулы по определению продолжительности выполнения маневровых операций с вагонами у мест погрузки-выгрузки, зависящие от следующих параметров: суммарной полной длины путей, задействованных при маневрах; среднего размера группы вагонов; среднего размера подачи-уборки вагонов; количества путей, на которые поступают вагоны в процессе выполнения маневровой работы; наличия выставочных путей для перезарядки у грузовых фронтов; среднего числа групп вагонов, находящихся на пути необщего пользования (маневровом районе); количества грузовых фронтов, задействованных в маневровых операциях с вагонами у мест погрузки-выгрузки. При этом способ расчета продолжительности расстановки вагонов является простым в отличие от существующего, основанного на суммировании продолжительностей выполнения полурейсов и смен направления движения, который является достаточно трудоемким.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования полученных зависимостей при определении параметров цикла подачи-уборки вагонов на грузовые фронты, оптимальных значений интервалов между подачами при взаимодействии железнодорожной станции и пути необщего пользования. Применение результатов исследования позволит: снизить издержки владельца пути необщего пользования, железной дороги, повысить конкурентоспособность железнодорожного транспорта на рынке транспортных услуг.

### Выводы

Выявленные функциональные зависимости для определения интервалов между подачами вагонов, продолжительности выполнения маневровых операций с вагонами у мест погрузки-выгрузки целесообразно использовать в расчетах при обосновании выбора оптимальных режимов взаимодействия железнодорожных станций с путями необщего пользования. Наличие интервала позволяет применить теорию взаимодействия и брать ее за основу при иссле-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

дованих режимів взаємодії системи, включаючої в себе станцію формування передач, залізничну станцію примикання, путі необщого користування, фронти погрузки-выгрузки вагонів. Дане взаємодія можна розглядати з позиції вантажодельця. Це пов'язано з виявленням слабких позицій при організації роботи станції примикання і путі необщого користування, усунення яких напряму впливає на підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту на ринку транспортних послуг.

Обобщаючи вище наведений матеріал, можна зробити наступні висновки:

1) в нинішній час у транспортному комплексі Республіки Білорусь існує гостра необхідність у розвитку інфраструктури путі необщого користування, а також удосконаленні технологій їх взаємодії з залізничними станціями примикання з метою задоволення всіх вимог клієнтів Білоруської залізничної дороги ввиду збільшення кількості вагонів вантажополучателів;

2) удосконалення технологій роботи технічних станцій Білоруської залізничної дороги неможливо без глибокого наукового дослідження режимів їх взаємодії з путями необщого користування;

3) отримані в результаті роботи висновки створюють передумови для подальшого дослідження режимів взаємодії залізничних станцій і путі необщого користування в умовах наявності основної частини вагонів вантажополучателів, вантажодельців, а також організації очікування таких вагонів при сезонній і інших видах нерівномірності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІСТОЧНИКІВ

- Афанасьєва, Н. А. Організація взаємодії ОАО «РЖД» з суб'єктами Російської Федерації : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.22 / Афанасьєва Наталія Александрівна ; Урал. гос. ун-т путі сообщ. – Екатеринбург, 2010. – 23 с.
- Вентцель, Е. С. Дослідження операцій. Задачі, принципи, методологія : учеб. посібник для вузів / Е. С. Вентцель. – 3-е изд., стереотип. – Москва : Дрофа, 2004. – 208 с.
- Вернигора, Р. В. Проблеми функціонування залізничних під'їзних путі України в сучасних умовах / Р. В. Вернигора // Восточно-Европ. журн. передов. технологій. – 2012. – Т. 4, № 3 (58). – С. 64–68.
- Гарлицкий, Е. И. Удосконалення технологій обслуговування залізничних путі необщого користування : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Гарлицкий Евгений Игоревич ; Моск. гос. ун-т путі сообщ. – Москва, 2014. – 149 с.
- Григорюк, В. Ф. Оптимізація взаємодії пунктів погрузки і выгрузки вагонів / В. Ф. Григорюк. – Москва : Транспорт, 1986. – 79 с.
- Еловой, И. А. Інтегровані логістическі системи доставки ресурсів: теорія, методологія, організація / И. А. Еловой, И. А. Лебедева ; под науч. ред. В. Ф. Медведєва ; Беларус. гос. ун-т трансп. – Минск : Право і економіка, 2011. – 461 с. – (Серія «Мірова економіка»).
- Козаченко, Д. Н. Комплексний аналіз залізничної інфраструктури металургіческого комбінату на основі графоаналітического моделювання / Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора, Н. И. Березовый // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 4. – С. 55–60.
- Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск : Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
- Местная работа на железных дорогах / О. С. Кирьянова, Г. А. Мухаммедов, А. С. Перминов, Д. М. Чернюгов. – Москва : Транспорт, 1975. – 184 с.
- Оптимізація процесів вантажної роботи / А. А. Смехов, Х. М. Лазарев, А. Т. Дерібас і [др.]. – Москва : Транспорт, 1993. – 264 с.
- Правдин, Н. В. Прогнозування вантажних потоків / Н. В. Правдин, М. Л. Дыканюк, В. Я. Негрей. – Москва : Транспорт, 1987. – 249 с.
- Серязетдинова, А. Д. Методика управління вагонопотоками на путях необщого користування, улічююча оперативну завантажувальність станцій : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Серязетдинова Альфія Данилівна ; Урал. гос. ун-т путі сообщ. – Екатеринбург, 2010. – 19 с.
- Сотников, И. Б. Взаємодія станцій і ділянок залізничних доріг. (Дослідження операцій на станціях) / И. Б. Сотников. – Москва : Транспорт, 1976. – 268 с.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

14. Ферапонтов, Г. В. Эксплуатация железнодорожных подъездных путей / Г. В. Ферапонтов. – Москва : Транспорт, 1972. – 296 с.
15. Jong, J.-C. Support System to Optimize Railway Stopping Patterns / J.-C. Jong, C.-S. Suen, S. Chang // Transportation Research Record: J. of the Transportation Research Board. – 2012. – Vol. 2289. – P. 24–33. doi: 10.3141/2289-04.
16. Mussone, L. R. An analytical approach to calculate the capacity of a railway system / L. R. Mussone, R. W. Calvo // European J. of Operational Research. – 2013. – Vol. 228. – Iss. 1. – P. 11–23. doi: 10.1016/j.ejor.2012.12.027.
17. Peek, G.-J. Creating Synergy In and Around Stations: Three Strategies for Adding Value / G.-J. Peek, M. van Hagen // Transportation Research Record: J. of the Transportation Research Board. – 2002. – Vol. 1793. – P. 1–6. doi: 10.3141/1793-01.

I. O. ЄЛОВИЙ<sup>1\*</sup>, Є. М. ПОТИЛКІН<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управління вантажною та комерційною роботою», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (529) 734 11 40, ел пошта ugkr@belsut.gomel.by, ORCID 0000-0001-9178-563X

<sup>2\*</sup>Каф. «Управління вантажною та комерційною роботою», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (529) 808 77 87, ел пошта gktr@inbox.ru, ORCID 0000-0003-3872-8243

## РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ІНТЕРВАЛІВ ДЛЯ ВИБОРУ РЕЖИМІВ ВЗАЄМОДІЇ СТАНЦІЙ ТА КОЛІЙ НЕЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

**Мета.** Основною метою роботи повинно стати отримання аналітичних залежностей для розрахунку оптимальних значень інтервалів між подачами вагонів на фронті навантаження, вивантаження за критерієм мінімізації експлуатаційних витрат. Це дозволить обґрунтувати вибір ефективних режимів взаємодії залізничних станцій та колій незагального користування. **Методика.** Для досягнення поставленої мети використано методи наукового аналізу та синтезу, метод Брандона при апроксимації функції, експериментально-статистичні методи складання математичних залежностей. **Результати.** Отримані формули по визначенню: 1) оптимальних значень інтервалів між подачами вагонів на місця навантаження-розвантаження за критерієм мінімізації витрат при режимі взаємодії залізничних станцій з коліями незагального користування через розрахункові інтервали часу; 2) групи вагонів середнього розміру в складі однієї подачі на колію незагального користування; 3) тривалості маневрової роботи щодо розстановки вагонів у фронтах навантаження-вивантаження. **Наукова новизна.** Удосконалено функціональні залежності для визначення оптимальних значень інтервалів між подачами вагонів на фронті навантаження, вивантаження за критерієм мінімізації експлуатаційних витрат. Це стало можливим завдяки отриманим формулам, які враховують вплив: 1) кількості вантажних фронтів, задіяних у маневрових операціях із вагонами у місцях навантаження-вивантаження; 2) груп вагонів середнього числа і розміру, які перебувають на колії незагального користування; 3) подачі-прибирання вагонів середнього розміру; 4) наявності виставкових колій для перезарядки фронтів; 5) сумарної повної довжини колій, задіяних у перезарядці фронтів навантаження-вивантаження. **Практична значимість.** Отримані функціональні залежності можна використовувати при визначенні параметрів циклу подачі-прибирання вагонів на фронті навантаження-вивантаження, а також оптимальних значень інтервалів між подачами при взаємодії залізничної станції та колій незагального користування. Використання отриманих результатів дозволить: 1) виявити слабкі позиції при організації роботи станції примикання та колій незагального користування; 2) зменшити витрати власників залізничних колій незагального користування і залізниці в цілому за рахунок мінімізації економічних та тимчасових втрат і, як наслідок, підвищити конкурентоспроможність залізничного транспорту на ринку транспортних послуг.

**Ключові слова:** колія незагального користування; режим взаємодії; подача-прибирання вагонів; маневрові операції; інтервал між подачами вагонів

I. A. YELOVOY<sup>1\*</sup>, YE. N. POTYLKIN<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Freight and Commercial Work Management», Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653, tel. + 37 (529) 734 11 40, e-mail ugkr@belsut.gomel.by, ORCID 0000-0001-9178-563X

<sup>2\*</sup>Dep. «Freight and Commercial Work Management», Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653, tel. +37 (529) 808 77 87, e-mail. gkrt@inbox.ru, ORCID 0000-0003-3872-8243

## CALCULATION OF OPTIMAL INTERVALS TO CHOOSE THE MODES OF INTERACTION BETWEEN STATIONS AND NON-PUBLIC TRACKS

**Purpose.** The article is aimed to obtain the operational dependences for calculating the optimal intervals between car supply on loading and unloading fronts, unloading according to the criterion of minimizing operating costs. This will allow substantiating the choice of effective modes of interaction between railway stations and non-public tracks. **Methodology.** Methods of scientific analysis and synthesis, the method of Brandon at the approximation of the function, experimental and statistical methods of compiling the mathematical dependences were used in order to achieve the purpose. **Findings.** There were obtained the formulas for determination of: 1) optimal values of intervals between the car supplies to the places of loading and unloading according to the criterion of cost minimization in conditions of interaction between railway stations and non-public tracks through determined time periods; 2) medium-sized car groups in one supply on the non-public track, 3) the duration of the shunting work on car spotting in loading and unloading fronts. **Originality.** Operational dependences were improved for the determination of optimal values of intervals between the car supplies to the fronts of loading, unloading according to the criterion of minimizing the operational costs. Since the obtained formulas take into account the influence of: 1) the number of freight fronts involved in shunting operations with the cars near the points of loading and unloading; 2) the average number and size of the car groups, which are on the non-public tracks; 3) average size of the car supply-removal; 4) the presence of the goods siding for the fronts recharging; 5) total length of the tracks involved in recharging of the loading and unloading fronts. **Practical value.** The obtained operational dependences can be used in determining the parameters of supply-removal cycle to the loading and unloading fronts, the optimal values of the intervals between supplies in the interaction between the railway station and non-public tracks. Obtained results will allow: 1) identifying weak positions in the organization of connecting station operation and non-public tracks; 2) reducing the costs of the owners of non-public tracks and the general railway by minimizing the economic and time losses and, as a consequence, increasing the competitiveness of railway transport in the transport market.

**Keywords:** non-public track; mode of interaction; car supply-removal; shunting operations; interval between cars supplies

### REFERENCES

1. Afanasyeva N.A. *Organizatsiya vzaimodeystviya OAO «RZhD» s subyektami Rossiyskoy Federatsii*. Avtoreferat Diss. [Organization of JSC «Russian Railways» interaction with the subjects of the Russian Federation. Author's abstract]. Ekaterinburg, 2010. 23 p.
2. Venttsel Ye.S. *Issledovaniye operatsiy. Zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research. Objectives, principles, methodology]. Moscow, Drofa Publ., 2004. 208 p.
3. Vernigora R.V. Problemy funktsionirovaniya zheleznodorozhnykh podyezdnykh putey Ukrainy v sovremennykh usloviyakh [Problems of functioning of railway sidings of Ukraine in modern conditions]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy – Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 2012, vol. 4, no. 3 (58), pp. 64-68.
4. Garlitskiy Ye.I. *Sovershenstvovaniye tekhnologii obsluzhivaniya zheleznodorozhnykh putey neobshchego polzovaniya*. Kand. Diss. [Improvement of the technology of service of railway tracks of uncommon use. Cand. Diss.]. Moscow, 2014. 149 p.
5. Grigoryuk V.F. *Optimizatsiya vzaimodeystviya punktov pogruzki i vygruzki vagonov* [Optimization of interaction of loading and unloading points of cars]. Moscow, Transport Publ., 1986. 79 p.
6. Yelovoy I.A., Lebedeva I.A. *Integrirovannyye logisticheskiye sistemy dostavki resursov: teoriya, metodologiya, organizatsiya* [Integrated logistics systems of resources delivery: the theory, methodology, organization]. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2011. 461 p.
7. Kozachenko D.N., Vernigora R.V., Berezovyy N.I. Kompleksnyy analiz zheleznodorozhnoy infrastruktury metallurgicheskogo kombinata na osnove grafoanali-ticheskogo modelirovaniya [Comprehensive analysis of

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- the railway infrastructure of metallurgical plant on the basis of graphical-analytic simulation]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznichnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 4, pp. 55-60.
8. Krasovskiy G.I., Filaretov G.F. *Planirovaniye eksperimenta* [Planning of experiment]. Minsk, BGU Publ., 1982. 302 p.
  9. Kiryanova O.S., Mukhammedov G.A., Perminov A.S., Chernyugov D.M. *Mestnaya rabota na zheleznykh dorogakh* [Local work on railways]. Moscow, Transport Publ., 1975. 184 p.
  10. Smekhov A.A., Lazarev Kh.M., Deribas A.T. *Optimizatsiya protsessov gruzovoy raboty* [Optimization of freight operations]. Moscow, Transport Publ., 1993. 264 p.
  11. Pravdin N.V., Dykanyuk M.L., Negrey V.Ya. *Prognozirovaniye gruzovykh potokov* [Prediction of cargo flows]. Moscow, Transport Publ., 1987. 249 p.
  12. Serazetdinova A.D. *Metodika upravleniya vagonopotokami na putyakh neobshhego pol-zovaniya, uchityvayushhaya operativniyu zagruzhennost stantsiy*. Avtoreferat Diss. [Methodology of the car traffic volumes control on the tracks of uncommon use taking into account the operational workload of the stations. Author's abstract]. Ekaterinburg, 2010. 19 p.
  13. Sotnikov I.B. *Vzaimodeystviye stantsiy i uchastkov zheleznykh dorog* [Interaction of stations and railroad sections]. Moscow, Transport Publ., 1976. 268 p.
  14. Ferapontov G.V. *Ekspluatatsiya zheleznodorozhnykh podyezdnykh putey* [Operation of railway sidings]. Moscow, Transport Publ., 1972. 296 p.
  15. Jong J.C., Suen C.S., Chang S. Support System to Optimize Railway Stopping Patterns. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2012, vol. 2289, pp. 24-33. doi: 10.3141/2289-04.
  16. Mussone L., Calvo R.W. An analytical approach to calculate the capacity of a railway system. *European Journal of Operational Research*, 2013, vol. 228, issue 1, pp. 11-23. doi: 10.1016/j.ejor.2012.12.027.
  17. Peek G.J., Hagen M. Creating Synergy In and Around Stations: Three Strategies for Adding Value. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2002, vol. 1793, pp. 1-6. doi: 10.3141/1793-01.

*Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. А. К. Головничем (Республіка Беларусь); д.т.н., проф. Д. Н. Козаченко (Україна)*

Поступила в редколлегию: 11.05.2016

Принята к печати: 23.09.2016