

УДК 656. 222. 3

В. Я. НЕГРЕЙ^{1*}, К. М. ШКУРИН^{2*}^{1*}Каф. «Транспортные узлы», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246022, тел. +37 (529) 625 75 87, эл. почта vjanegrey@gmail.com, ORCID 0000-0002-1857-4980^{2*}УП «Минское отделение Белорусской железной дороги», ул. Свердлова, 28, Минск, Республика Беларусь, 220030, тел. +37 (529) 238 88 87, эл. почта nodntiv1@rambler.ru, ORCID 0000-0003-2800-433X**СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОГРУППНЫХ ПОЕЗДОВ**

Цель. В данной работе исследуется возможность использования критерия, позволяющего учитывать расходы, связанные с нахождением локомотивов и вагонов в движении, при разработке плана формирования одногруппных поездов. **Методика.** Проанализированы существующие методы разработки плана формирования поездов и основные направления его оптимизации на современном этапе. Разработаны формулы для расчета критерия экономии затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах. **Результаты.** На примере ряда железнодорожных участков Белорусской железной дороги было исследовано наличие зависимости между участковой скоростью поезда и его категорией. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что в общем случае участковая скорость сквозных поездов выше, чем у участковых поездов. При этом интенсивность движения и пропускная способность участка оказывают влияние на разницу между участковыми скоростями поездов различных категорий. На примере железнодорожного направления, на котором расположены четыре сортировочные станции, выполнена разработка плана формирования одногруппных поездов с использованием традиционных методов и с применением предлагаемого критерия. Показано, что использование предлагаемой методики разработки плана формирования поездов может обеспечить значительную экономию эксплуатационных затрат за счет ускорения пропуска вагонопотоков по железнодорожным участкам. **Научная новизна.** В работе предложено использовать при разработке плана формирования поездов новый дополнительный параметр – критерий экономии затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах. Показано, что применение указанного критерия позволяет обосновать выделение в самостоятельные назначения отдельных струй вагонопотоков, которые при использовании традиционных методов расчета плана формирования были бы признаны экономически невыгодными. Авторы выполнили анализ влияния таких факторов, как состав поезда, длина участка и мощность струи вагонопотока на экономию затрат при использовании предлагаемого параметра. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при разработке плана формирования поездов, что обеспечит экономию эксплуатационных затрат, связанных с нахождением вагонов и локомотивов в движении.

Ключевые слова: план формирования поездов; струя вагонопотока; участковая скорость; экономия затрат; участковые поезда; сквозные поезда

Введение

На протяжении всей истории развития железнодорожного транспорта одной из важнейших задач, стоящих перед железнодорожниками, было сокращение эксплуатационных расходов путем повышения эффективности использования транспортной инфраструктуры и подвижного состава [6, 10, 15].

Совершенствование плана формирования поездов (далее – ПФП) является направлением решения данной задачи, способным обеспечить достижение значительных результатов при минимальных капитальных вложениях [3, 4, 7].

Так, оптимизация ПФП способна обеспечить ускорение оборота вагонов и сокращение времени их нахождения на технических станциях, повысить производительность локомотивов и грузовых вагонов за счет правильного распределения сортировочной работы между станциями [11, 13].

Основные методы расчета оптимального ПФП, принципы которых применяются для решения данной задачи и в настоящее время, были разработаны еще в 40–е–60–е годы XX века [1, 12].

Так, в 1940–е годы проф. А. П. Петров предложил применение при разработке ПФП *метода абсолютного расчета*. Использование данного

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

метода передбачає виконання розрахунків для всіх потенційно реалізуємих варіантів плану формування і оцінку затрат вагоно-часов на накоплення і переробку вагонів для кожного з них. В той же час недоліком методу абсолютного розрахунку є необхідність виконання великого обсягу обчислень при розробці плану формування для напрямків, на яких розташовано більше ніж 5–6 сортировочних станцій.

Альтернативний підхід до розробки ПФП застосовують в аналітичних методах, передбачаючих поступове знаходження плану формування, близького до оптимального, шляхом виконання розрахунків в декілька ітерацій. Найбільше поширення серед таких методів отримав *метод совмещенных аналитических сопоставлений*, автором якого є проф. К. А. Бернгард, удосконаливши розроблений раніше метод аналітичних сопоставлений проф. І. І. Васильєва. Метод совмещенных аналитических сопоставлений ґрунтується на побудові графіка призначень струй вагонопотоків і його послідовної поетапної корекції шляхом виділення в оптимальний план формування призначень, що забезпечують максимальну економію вагоно-часов, витрачаємих на накоплення і переробку вагонів.

Розроблений к. т. н. А. І. Поповим *метод направленного перебора вариантов* дозволяє скоротити обсяг обчислень при виборі оптимального варіанту ПФП. При використанні даного методу велика кількість варіантів плану формування представляють в вигляді графа. На його осях розміщують вершини, номери яких відповідають номерам сквозних струй. Вершини на сусідніх осях графа з'єднують дугами, що вказують на їх належність до одного варіанту ПФП. Розрахунок виконують послідовно, починаючи з верхньої гілки графа і зліва направо; при цьому затрати вагоно-часов при переході від вершини до вершини по дугі графа збільшуються з урахуванням затрат на накоплення і зменшуються з урахуванням економії від прослідкування попутних станцій без переробки. Якщо при переході від однієї вершини до іншої відбувається зростання затрат приведених вагоно-часов, подальші розрахунки по даній гілці припиняють, що дозволяє виключити заздалегідь неконкурентні варіанти ПФП.

Розрахунок мережевого плану формування виконують на ЕВМ за алгоритмом *метода улучшения плана*, розробленого проф. С. В. Дуваляном. Суть цього методу полягає в поступовому удосконаленні ПФП шляхом переходу від одного множини призначень до іншого за рахунок доповнення його іншими призначеннями. Цей процес починається з множини обов'язкових призначень і закінчується тоді, коли в ПФП потрапляють включеними всі призначення, які зменшують сумарні приведені затрати на накоплення і переробку транзитних вагонів.

Аналіз сучасних досліджень в області удосконалення системи організації вагонопотоків свідчить, що особливу увагу на поточному етапі приділяють двом напрямкам: розвитку математичних моделей функціонування транспортних систем [2, 9, 14, 17, 20, 21] і оптимізації процесу формування (расформирования) складів на технічних станціях [18, 19, 23].

Так, роботи М. Болнна і С. Гестрелиуса присвячені розробці математичної моделі оптимізації сортировочного процесу, що дозволяє збільшити горизонт планування роботи технічних станцій за рахунок автоматизованої обробки даних про вагонопотоки, що надходять на сусідні сортировочні станції [20]. Дослідження Chongshuang Chen і інших учених Шанхайського університету транспорту спрямовані на розв'язання проблеми оптимізації формування групових поїздів [18].

Ще одним важливим напрямком досліджень в області організації перевозочного процесу, що здійснюється ученими КНР, є скорочення експлуатаційних затрат, пов'язаних з знаходженням подвижного складу на сортировочних станціях (роботи Jie Xiao про мінімізацію затрат, пов'язаних з формуванням багатогрупових поїздів [22]).

Таким чином, можна стверджувати, що в традиційних методах розробки оптимального ПФП в якості критерію оцінки цілесобразності встановлення призначень грузових поїздів використовують критерій мінімізації вагоно-часов, витрачаємих на накоплення і переробку вагонів [1, 5, 12]. В той же час застосовувані методики не враховують витрати, пов'язані з знаходженням вагонів і локомотивів.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

вов в русленні [8]. При цьому в дослідженнях, присвячених удосконаленню процесу розробки ПФП, основне увагу приділяють скороченню часу знаходження вагонів на технічних станціях.

Аналіз вітчизняного і зарубіжного досвіду підтверджує актуальність подальших досліджень, направлених на удосконалення системи організації вагонопотоку і мінімізацію експлуатаційних витрат на основі застосування додаткових критеріїв при виборі оптимального варіанта плану формування поїздів.

Цель

Основними цілями даної статті є розробка методу, що дозволяє при розрахунку плану формування односторонніх поїздів враховувати витрати, пов'язані з знаходженням локомотивів і вагонів в русленні, а також дослідження факторів, що впливають на економію витрат при русленні вагонів і локомотивів в сквозних поїздах.

Методика

Для оцінки доцільності використання при розробці ПФП критерію мінімізації витрат, пов'язаних з знаходженням вагонів і локомотивів в русленні, розглянемо напрямлення А–Д, на якому розташовані 4 сортировочні станції. В розглянутому прикладі відстань між станціями однакова і становить 120 км; економія при русленні сортировочної станції без переробки $T_{жк}$ (або витрати на переробку $T_{пер}$) становить 5,0 ваг.ч; витрати, пов'язані з накопленням состава поїзда cm – 600 ваг.ч.

Розглянемо випадок, коли потужність всіх струй вагонопотоку однакова і становить 50 вагонів. Дані про напрямлення А–Д наведено на рис. 1.

Для визначення оптимального ПФП використовуємо метод абсолютного розрахунку, передбачаючий виконання обчислень для всіх практично здійснюваних варіантів плану формування. В розглянутому прикладі є можливість виділення трьох сквозних струй (А–Д, А–С, В–Д) вагонопотоку в самостійні призначення, що означає необхідність розрахунку витрат для восьми варіантів плану формування. На рис. 2 наведено граф, на якому позначені можливі варіанти плану формування поїздів.

антов плану формування. На рис. 2 наведено граф, на якому позначені можливі варіанти плану формування поїздів.

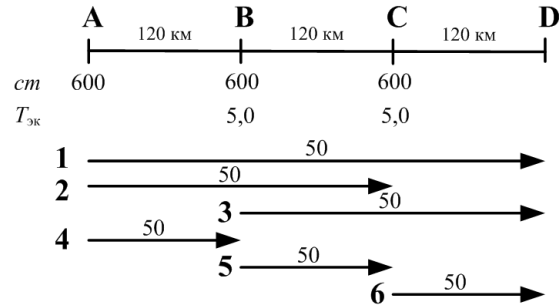


Рис. 1. Характеристика напрямлення А–Д

Fig. 1. Characteristics of the direction A–D

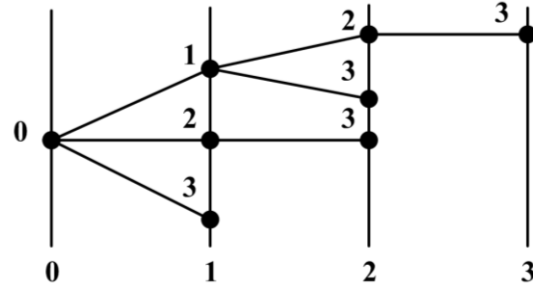


Рис. 2. Граф варіантів ПФП для напрямлення А–Д

Fig. 2. Options graph of TFP (train formation plan) for the direction A–D

Розглянемо кожен з показаних вище варіантів і порівняємо витрати, пов'язані з накопленням составів поїздів cm і з переробкою вагонів на сортировочних станціях $nT_{пер}$.

Так, при реалізації варіанта ПФП, передбачаючого руслення всіх вагонів в участкових поїздах (варіант «0»), витрати на накоплення составів поїздів на ділянках А–В, В–С, С–Д становлять

$$\sum cm = 3 \cdot 600 = 1800 \text{ ваг.ч,}$$

витрати, пов'язані з переробкою вагонів на сортировочних станціях:

$$\sum nT_{пер} = (50 + 50 + 50 + 50) \cdot 5,0 = 1000 \text{ ваг.ч,}$$

загальні витрати:

$$B_{общ} = 1800 + 1000 = 2800 \text{ ваг.ч.}$$

Результати аналогічних розрахунків для всіх можливих варіантів плану формування наведено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение вариантов ПФП
для направления А–D

Table 1

Option comparison of the TFP for
the direction A–D

Вариант ПФП	$\sum cm$, ваг.ч	$\sum nT_{пер}$, ваг.ч	$V_{общ}$, ваг.ч
0	1 800	1 000	2 800
0–1	2 400	500	2 900
0–1–2	3 000	250	3 250
0–1–2–3	3 600	0	3 600
0–1–3	3 000	250	3 250
0–2	2 400	750	3 150
0–2–3	3 000	500	3 500
0–3	2 400	750	3 150

Таким образом, согласно расчетам, выполненным с использованием традиционных методов, наименьшие затраты можно обеспечить при доставке всех вагонов на станции назначения участковыми поездами.

Результаты исследования, выполненного на Белорусской железной дороге в 2015–2017 гг., показали, что даже в пределах одного железнодорожного направления участковые скорости грузовых поездов могут значительно отличаться в зависимости от их категории [16].

В табл. 2 представлены сведения об участковой скорости грузовых поездов различных категорий на двух направлениях Белорусской железной дороги (однопутном и двухпутном).

Данные, представленные в табл. 2, показывают, что средняя скорость участковых поездов на рассмотренных направлениях значительно уступает средней скорости движения сквозных поездов. На однопутном направлении Кричев–Слуцк разница между участковыми скоростями поездов указанных категорий в зависимости от направления следования составляет 2–3 %, на двухпутном направлении Минск–Орша – 11–18 %.

Графическое сравнение участковых скоростей поездов различных категорий показано на рис. 3.

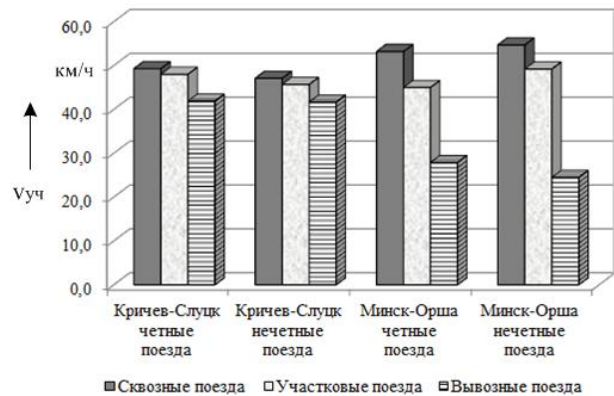
Таблица 2

Сравнение участковых скоростей
различных категорий грузовых поездов

Table 2

Comparison of service speeds of various
categories of freight trains

Категория поездов	$V_{уч}$, км/ч			
	Направление Кричев–Слуцк (однопутное)		Направление Минск–Орша (двухпутное)	
	Четн.	Не-четн.	Четн.	Не-четн.
Сквозные	49,3	47,1	53,2	54,7
Участковые	48,0	45,7	45,0	49,2
Вывозные	41,9	41,7	27,9	24,5
Сборные	-	-	26,5	36,3
ВСЕГО	45,6	45,2	51,1	51,0

Рис. 3. Сравнение участковых скоростей
различных категорий грузовых поездовFig. 3. Comparison of service speeds
of various categories of freight trains

Тот факт, что разница между скоростями сквозных и участковых поездов на направлении Минск–Орша существенно превышает аналогичный показатель на направлении Кричев–Слуцк, объясняется значительно большими размерами движения на двухпутном направлении. Так, ежесуточные размеры движения на участках направления Кричев–Слуцк составляют 17–20 пар поездов, направления Минск–Орша – 70–100 пар поездов.

Влияние размеров движения на разницу между скоростями сквозных и участковых по-

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

ездов підтверджується і при аналізі участкових швидкостей на окремих ділянках одного напрямку. Наприклад, на ділянці Осиповичі–Слуцьк, маючій найбільші розміри руху на напрямку Кричев–Слуцьк, різниця між швидкостями сквозних і участкових поїздів досягає 8 %, тоді як на ділянці Осиповичі–Могилев вона становить менше 1 %.

Таким чином, проведені дослідження довели наявність взаємозв'язку між категорією поїзда і його участковою швидкістю. В зв'язі з вищеизложеною, при розробці плану формування цілеспрямованим є застосування додаткового параметра – *критерія економії витрат при русі вагонів і локомотивів в сквозних поїздах*. В цьому випадку оптимальний план формування може відрізнятися від плану формування, розробленого з використанням традиційних методів.

Використовуючи дані про довжину ділянок напрямку А–Д, обчислимо середнє час руху кожного з ділянок участковим поїздом $t_{уч}$ і сквозним поїздом $t_{скв}$. Економію часу при русі вагонів і локомотивів в складі сквозних поїздів $\Delta t_{скв}$ будемо визначати за формулою:

$$\Delta t_{скв} = t_{уч} - t_{скв} = \frac{L_{уч}}{v_{уч}} - \frac{L_{уч}}{v_{скв}}. \quad (1)$$

Відповідно до економію витрат при русі вагонів і локомотивів в сквозних поїздах R в приведених вагоно-часах (далі – пр. ваг.ч) можна визначити за формулою:

$$R = \Delta t_{скв} \cdot k_{лок} \cdot \frac{1}{m} + \Delta t_{скв} = \Delta t_{скв} \cdot \left(\frac{k_{лок}}{m} + 1 \right), \quad (2)$$

де $k_{лок}$ – коефіцієнт приведення локомотиво-годин до вагоно-годин; m – середній склад рухомих поїздів, вагонів.

Визначимо значення параметра R при русі вагонів і локомотивів в сквозних поїздах по різних ділянках напрямку А–Д.

Для розрахунків приймаємо, що середня швидкість участкових поїздів $v_{уч}$ становить 45,0 км/ч, а швидкість сквозних поїздів $v_{скв}$ перевищує її на 5,0 % і становить 47,25 км/ч. Середній склад поїзда, що рухається по напрямку А–Д, приймаємо рівним 60 вагонів.

Необхідно зазначити, що експлуатаційні витрати, пов'язані з рухом рухомих складів в русі, можуть перевищувати витрати на накопичення вагонів [8]. Так, відповідно до діючих на Білоруської залізничній дорозі Методическими рекомендаціями по розрахунку економічних параметрів, що дозволяють оцінити експлуатаційні витрати по технологічним операціям послуг залізничного транспорту загального користування, вартість 1 години руху локомотива в тепловозній тязі еквівалентна вартості 375 вагоно-годин (далі – ваг.ч), в електричній – 336 ваг.ч.

Для того, щоб привести локомотиво-години економії до вагоно-годин, враховуємо, що на розглянутому напрямку застосовують тепловозну тягу. Коефіцієнт приведення $k_{лок}$ в цьому випадку становить 375.

Результати розрахунку параметра R наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Визначення параметра R для різних ділянок напрямку А–Д

Table 3

Determination of the R parameter for different sections of the direction А–D

Показатель	Участок		
	А–С	В–Д	А–Д
Длина участка, км	240	240	360
$t_{уч}$, ч	5,33	5,33	8,00
$t_{скв}$, ч	5,08	5,08	7,62
$\Delta t_{скв}$, ч	0,25	0,25	0,38
R , пр. ваг.ч	1,84	1,84	2,76

Для струї вагонопотоку потужністю n економія витрат при русі вагонів і локомотивів в сквозних поїздах Rn становить:

$$Rn = \Delta t_{скв} \cdot \left(\frac{k_{лок}}{m} + 1 \right) \cdot n. \quad (3)$$

Аналіз формули (3) показує, що значення параметра Rn зростає при збільшенні потужності струї вагонопотоку, а також при збільшенні довжини ділянки, по якій рухається поїзд. В той же час значення параметра

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

снижается при увеличении среднего состава обращающихся поездов, поскольку в этом случае для организации пропуска вагонопотока по участку потребуется меньшее число локомотивов.

Проиллюстрируем эти выводы на примере струи вагонопотока А–D.

Данные о влиянии изменения среднего состава поезда m на значение параметра Rn сведены в табл. 4, и по ним построен рис. 4.

Таблица 4

Определение влияния изменения среднего состава поезда m на значение параметра Rn

Table 4

Determination of the influence of changing the average train composition m on the value of the parameter Rn

m , ваг.	R , пр. ваг.ч	Rn , пр. ваг.ч
40	3,95	198
48	3,36	168
56	2,93	147
64	2,61	131
72	2,37	118
80	2,17	108

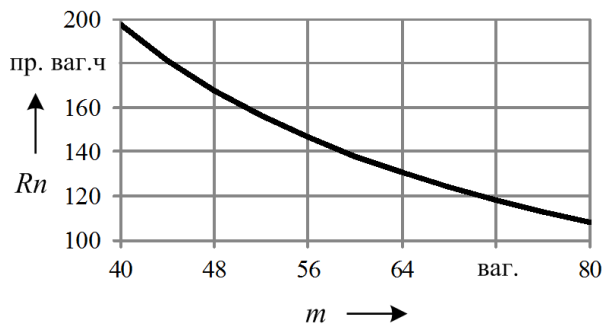
Рис. 4. Влияние изменения среднего состава поезда m на значение параметра Rn Fig. 4 The influence of changing the average train composition m on the value of the parameter Rn

Рис. 4 показывает, что значение параметра Rn обратно пропорционально среднему составу грузового поезда, следующего по рассматриваемому участку.

В табл. 5 приведены результаты расчета влияния изменения мощности струи вагонопотока n на величину параметра Rn , и по ним построен график, приведенный на рис. 5.

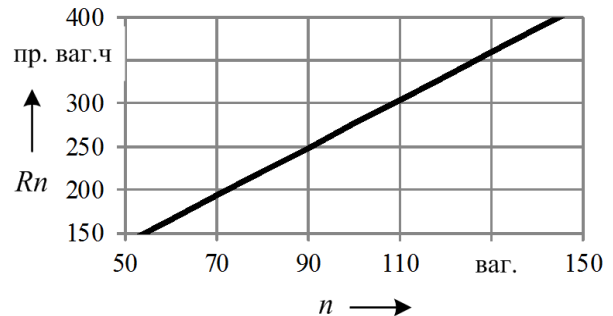
Таблица 5

Определение влияния изменения мощности струи вагонопотока n на значение параметра Rn

Table 5

Determination of the influence of changing the car-stream power n on the value of the parameter Rn

n , ваг.	R , пр. ваг.ч	Rn , пр. ваг.ч
50	2,76	138
70		193
90		249
110		304
130		359
150		414

Рис. 5. Влияние изменения мощности струи вагонопотока n на значение параметра Rn Fig. 5. The influence of changing the car-stream power n for the value of the parameter Rn

Из рис. 5 следует, что при увеличении мощности струи вагонопотока экономия затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах возрастает линейно.

Результаты расчета влияния длины участка $l_{yч}$ на величину параметра Rn приведены в табл. 6, и по ним построен рис. 6.

Таблица 6

Определение влияния длины участка $l_{уч}$ на значение параметра Rn

Table 6

Determination of the influence of the section length l_{sec} on the value of the parameter Rn

$l_{уч}$, км	$\Delta t_{скв}$, ч	R , пр. ваг.ч	Rn , пр. ваг.ч
60	0,06	0,46	23
120	0,13	0,92	46
180	0,19	1,38	69
240	0,25	1,84	92
300	0,32	2,30	115
360	0,38	2,76	138

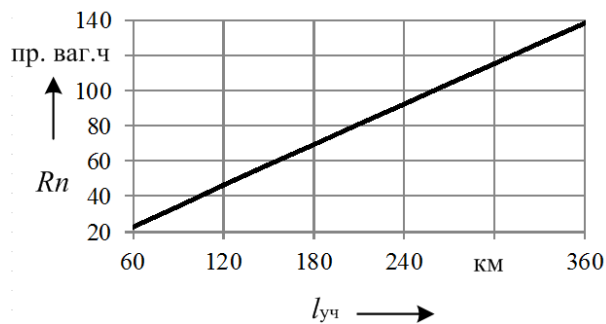


Рис. 6. Влияние длины участка $l_{уч}$ на величину параметра Rn

Fig. 6. The influence of the section length l_{sec} on the value of the parameter Rn

Рис. 6 показывает, что при увеличении длины участка экономия затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах Rn возрастает.

Результаты

Используем параметр Rn при расчете оптимального плана формирования поездов для направления А–D.

Для варианта ПФП «0–1» параметр Rn будет равен

$$Rn = \left(\frac{360}{45} - \frac{360}{47,25} \right) \cdot \left(\frac{375}{60} + 1 \right) \cdot 50 = 138 \text{ пр. ваг.ч.}$$

Результаты расчетов параметра Rn , а также общих затрат $V_{общ}$ для всех вариантов плана формирования сведены в табл. 7.

Таблица 7

Сравнение вариантов ПФП для направления А–D

Table 7

Comparison of the options of TFP for the direction А–D

Вариант	При исп. традиционного метода расчета	При исп. параметра Rn	
	$V_{общ}$, ваг.ч	Rn , пр. ваг.ч	$V_{общ}$, пр. ваг.ч
0	2 800	0	2 800
0–1	2 900	138	2 762
0–1–2	3 250	230	3 020
0–1–2–3	3 600	322	3 278
0–1–3	3 250	230	3 020
0–2	3 150	92	3 058
0–2–3	3 500	184	3 316
0–3	3 150	92	3 058

Данные, приведенные в табл. 7, показывают, что, в то время как при использовании традиционного метода расчета оптимальным должен быть признан вариант ПФП «0», при котором доставку всех вагонов на станции назначения осуществляют участковые поезда, применение предлагаемой методики позволяет доказать, что выделение в самостоятельное назначение струи вагонопотока № 1 позволит снизить эксплуатационные затраты.

Для оценки эффекта от использования при разработке ПФП критерия экономии затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах выполним аналогичные расчеты в случаях, если струи вагонопотока имеют большую мощность n , а также при большей разнице между скоростями участковых и сквозных поездов Δv . В табл. 8 и 9 приведена оценка эксплуатационных затрат при реализации оптимальных вариантов ПФП, рассчитанных с использованием традиционного и предлагаемого методов соответственно. В табл. 9 также показана экономия приведенных вагоно-часов $\Delta V_{общ}$, получаемая при использовании предлагаемого метода расчёта.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Таблица 8

Эксплуатационные затраты $B_{\text{общ}}$
при выборе оптимального ПФП
с использованием традиционного метода

Table 8

Operating costs B_{gen} when choosing the optimal
TFP using the traditional method

$\Delta v, \%$	$n, \text{ваг.}$	Оптимальный вариант	$B_{\text{общ}}, \text{пр. ваг.ч}$
5	50	0	2 800
	75	0–1	2 943
	100	0–1	3 124
10	50	0	2 800
	75	0–1	2 755
	100	0–1	2 873
15	50	0	2 800
	75	0–1	2 583
	100	0–1	2 643

Таблица 9

Эксплуатационные затраты $B_{\text{общ}}$
при выборе оптимального ПФП
с использованием предлагаемого метода

Table 9

Operating costs B_{gen} when choosing the optimal
TFP using the proposed method

$\Delta v, \%$	$n, \text{ваг.}$	Оптимальный вариант	$B_{\text{общ}}, \text{пр. ваг.ч}$	$\Delta B_{\text{общ}}, \text{пр. ваг.ч}$
5	50	0–1	2 762	38
	75	0–1	2 943	0
	100	0–1–2–3	2 956	168
10	50	0–1	2 636	164
	75	0–1–2–3	2 677	78
	100	0–1–2–3	2 370	503
15	50	0–1	2 522	278
	75	0–1–2–3	2 276	307
	100	0–1–2–3	1 835	808

Из табл. 8 и 9 видно, что при разнице между скоростями участковых и сквозных поездов в 5 % и мощности струй вагонопотока, равной

100 вагонам, при использовании предлагаемого метода подтверждается целесообразность выделения в самостоятельные назначения струй вагонопотока № 1, 2, 3 (A–D, A–C, B–D), тогда как при использовании традиционного метода обосновывается только целесообразность выделения струи вагонопотока № 1 (A–D). При этом расчет оптимального варианта ПФП с учетом параметра Rn обеспечивает экономию $\Delta B_{\text{общ}} = 168$ пр. ваг.ч.

При увеличении мощности струй вагонопотока и разницы между скоростями участковых и сквозных поездов эффект от использования предлагаемого метода возрастает. Так, при мощности струй вагонопотока, равной 100 вагонам, и $\Delta v = 15 \%$ он достигает 808 пр. ваг.ч.

Научная новизна и практическая значимость

В работе предложено использовать при разработке плана формирования поездов новый дополнительный параметр – критерий экономии затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах. Показано, что применение указанного критерия позволяет обосновать выделение в самостоятельные назначения отдельных струй вагонопотока, которые при использовании традиционных методов расчета плана формирования были бы признаны экономически невыгодными.

Авторы выполнили анализ влияния таких факторов, как состав поезда, длина участка и мощность струи вагонопотока на экономию затрат при использовании предлагаемого параметра.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке плана формирования поездов, что обеспечит экономию эксплуатационных затрат, связанных с нахождением вагонов и локомотивов в движении.

Выводы

После разработки плана формирования поездов традиционным методом для участков, на которых имеются маломощные сквозные струи, не выделенные в самостоятельные назначения, следует осуществлять проверку целесообразности их выделения с использованием критерия экономии затрат при следовании вагонов и ло-

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

комотивов в сквозных поездах. Использование указанного критерия может подтвердить целесообразность выделения в самостоятельные назначения дополнительных струй вагонопотоков, что, в свою очередь, обеспечит значительное сокращение эксплуатационных расходов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамов, А. А. Управление эксплуатационной работой : в 3 ч. / А. А. Абрамов. – Москва : Рос. гос. откр. техн. ун-т путей сообщения, 2001. – Ч. 1. – 144 с.
2. Бодюл, В. И. Концепция рационального управления вагонными парками операторов железнодорожного подвижного состава и информационная технология её реализации / В. И. Бодюл, А. Н. Феофилов // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. – 2016. – Т. 75, № 1. – С. 46–52.
3. Сайбаталов, Р. Ф. Вагонный парк, инфраструктуру и управление движением – к общему знаменателю / Р. Ф. Сайбаталов, А. Ф. Бородин // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 11. – С. 26–34.
4. Дорошко, С. В. Адаптивная система организации вагонопотоков / С. В. Дорошко. – Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 34. – С. 39–45.
5. Ковалев, В. И. Организация вагонопотоков на сети железных дорог России в условиях реформирования отрасли / В. И. Ковалев. – Санкт-Петербург : Выбор, 2002. – 144 с.
6. Левин, Д. Ю. Организация вагонопотоков в рыночных условиях / Д. Ю. Левин // Мир транспорта. – 2017. – № 4 (71). – С. 178–192.
7. Негрей, В. Я. Развитие методов анализа перевозочного процесса / В. Я. Негрей, К. М. Шкурин // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2016. – № 2 (33). – С. 23–25.
8. Некрашевич, В. И. Управление эксплуатацией локомотивов / В. И. Некрашевич, В. И. Апатцев. – Москва : Рос. гос. откр. техн. ун-т путей сообщения, 2004. – 257 с.
9. Осьминин, А. Т. Рациональная организация вагонопотоков на основе методов многокритериальной оптимизации : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.08 / Осьминин Александр Трофимович ; Самар. ин-т инженеров ж.-д. трансп. – Самара, 2000. – 260 с.
10. Правдин, Н. В. Прогнозирование грузовых потоков / Н. В. Правдин, М. Л. Дыканюк, В. Я. Негрей. – Москва : Транспорт, 1987. – 247 с.
11. Пулатов, П. Н. Координация технологии эксплуатационной работы железной дороги Республики Таджикистан и организации вагонопотоков в международном сообщении / П. Н. Пулатов // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. – 2018. – Т. 77, № 4. – С. 211–217.
12. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте : учебник для вузов / П. С. Грунтов, Ю. В. Дьяков, А. М. Макаровичкин [и др.] ; под ред. П. С. Грунтова. – Москва : Транспорт, 1994. – 543 с.
13. Федоров, Е. А. Методологические основы реализации планов формирования поездов перевозчиков в графике движения поездов на полигоне инфраструктуры / Е. А. Федоров // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. – 2018. – Т. 77, № 2. – С. 92–97.
14. Шапкин, И. Н. На основе имитационного моделирования / И. Н. Шапкин, А. Н. Вдовин // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 3. – С. 37–41.
15. Шапкин, И. Н. Нормирование и прогнозирование на железных дорогах (методы, алгоритмы, технологии, расчеты) / И. Н. Шапкин, Р. А. Юсипов, Е. М. Кожанов. – Москва : Ин-т соц.-полит. исслед. Рос. акад. наук, 2007. – 255 с.
16. Шкурин, К. М. Системный подход к оптимизации плана формирования поездов / К. М. Шкурин // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2017. – № 1 (34). – С. 61–64.
17. Butko, T. Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms / T. Butko, V. Prokhorov, D. Chekhunov // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2017. – № 1 (3). – С. 55–61.
18. Chen, Ch. Model and Algorithm of the Car-to-Block Assignment Plan on Railway Network / Chongshuang Chen, Hui Fang, Feng Xue // ICLEM 2012: Logistics for Sustained Economic Development – Technology and Management for Efficiency (Chengdu, China, Oct. 8-10, 2012). – Chengdu, 2012. – P. 54–60. doi: 10.1061/9780784412602.0009
19. Multistage methods for freight train classification / Riko Jacob, Peter Marton, Jens Maue, Marc Nunkesser // Networks. – 2011. – Vol. 57. – Iss. 1. – P. 87–105. doi: 10.1002/net.20385

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

20. Optimization Methods for Multistage Freight Train Formation / Markus Bohlin, Sara Gestrelus, Florian Dahms, Matúš Mihalák, Holger Flier // *Transportation science*. – 2016. – Vol. 50. – Iss. 3. – P. 823–840. doi: 10.1287/trsc.2014.0580
21. RailNet: A simulation model for operational planning of rail freight / G. Michal, N. Huynh, N. Shukla, A. Munoz, J. Barthelemy // *Transportation Research Procedia*. – 2017. – Vol. 25. – P. 461–473. doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.426
22. Xiao, J. Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan / Jie Xiao, Boliang Lin // *Journal of Rail Transportation Planning & Management*. – 2016. – Vol. 6. – Iss. 3. – P. 218–236. doi: 10.1016/j.jrtpm.2016.09.002
23. Yaghini, M. A hybrid solution method for fuzzy train formation planning / Masoud Yaghini, Mohsen Momeni, Mohammadreza Sarmadi // *Applied Soft Computing*. – 2015. – Vol. 31. – P. 257–265. doi: 10.1016/j.asoc.2015.02.039

В. Я. НЕГРЕЙ^{1*}, К. М. ШКУРИН^{2*}

^{1*}Каф. «Транспортні вузли», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246022, тел. +37 (529) 625 75 87, ел. пошта vjanegrey@gmail.com, ORCID 0000-0002-1857-4980

^{2*}УП «Мінське відділення Білоруської залізниці», вул. Свердлова, 28, Мінськ, Республіка Білорусь, 220030, тел. +37 (529) 238 88 87, ел. пошта nodntiv1@rambler.ru, ORCID 0000-0003-2800-433X

СИНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКУ ПЛАНУ ФОРМУВАННЯ ОДНОГРУПОВИХ ПОЇЗДІВ

Мета. У даній роботі досліджується можливість використання критерію, що дозволяє враховувати витрати, пов'язані з перебуванням локомотивів і вагонів у русі, під час розробки плану формування одногрупових поїздів. **Методика.** Проаналізовані наявні методи розробки плану формування поїздів й основні напрямки його оптимізації на сучасному етапі. Розроблені формули для розрахунку критерію економії витрат під час прямування вагонів і локомотивів у наскрізних поїздах. **Результати.** На прикладі ряду залізничних ділянок Білоруської залізниці була досліджена наявність залежності між дільничною швидкістю поїзда і його категорією. Отримані результати дозволили зробити висновок про те, що в загальному випадку дільнична швидкість наскрізних поїздів вища, ніж у дільничних поїздів. При цьому інтенсивність руху і пропускна здатність ділянки впливають на різницю між дільничними швидкостями поїздів різних категорій. На прикладі залізничного напрямку, на якому розташовані чотири сортувальні станції, виконано розробку плану формування одногрупових поїздів із використанням традиційних методів та застосуванням запропонованого критерію. Відзначено, що використання запропонованої методики розробки плану формування поїздів може забезпечити значну економію експлуатаційних витрат за рахунок прискорення пропуску вагонопотоків по залізничних ділянках. **Наукова новизна.** У роботі запропоновано використовувати під час розробки плану формування поїздів новий додатковий параметр – критерій економії витрат у випадку прямування вагонів і локомотивів у наскрізних поїздах. Указано, що застосування зазначеного критерію дозволяє обґрунтувати виділення в самостійні призначення окремих струменів вагонопотоків, які в разі використання традиційних методів розрахунку плану формування були б визнані економічно не вигідними. Автори виконали аналіз впливу таких чинників, як склад поїзда, довжина ділянки і потужність струменя вагонопотоку на економію витрат у випадку використання запропонованого параметра. **Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані під час розробки плану формування поїздів, що забезпечить економію експлуатаційних витрат, пов'язаних із перебуванням вагонів і локомотивів у русі.

Ключові слова: план формування поїздів; струмінь вагонопотоків; дільнична швидкість; економія витрат; дільничні поїзди; наскрізні поїзди

V. Y. NEGREY^{1*}, K. M. SHKURYN^{2*}

^{1*}Dep. «Transport Nodes», Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246022, tel. +37 (529) 625 75 87, e-mail vjanegrey@gmail.com, ORCID 0000-0002-1857-4980

^{2*}Minsk Division of the Belarusian Railway, Sverdlov St., 28, Minsk, Republic of Belarus, 220030, tel. +37 (529) 238 88 87, e-mail nodntiv1@rambler.ru, ORCID 0000-0003-2800-433X

SYNERGETIC APPROACH TO THE CALCULATION OF ONE-GROUP TRAIN FORMATION PLAN

Purpose. The research aims at the analysis of the possibility of using in the development of one-group train formation plan the criterion, which allows to consider the costs associated with the movement of cars and locomotives. **Methodology.** The existing methods for development of train formation plan and current directions of its optimization are analyzed. The formulas for calculating the cost-saving criterion for running cars and locomotives in through-trains have been developed. **Findings.** The dependence between the service speed and the category of train was analyzed on the examples of railway sections of the Belarusian Railways. The obtained results allowed to conclude that, in general, the service speed of through-trains is higher than that of local trains. At the same time, the traffic intensity and section capacity affect the difference between the service speeds of trains belonging to the different categories. The one-group train formation plan was developed using the traditional methods and the proposed criterion on the example of the railway direction, where four marshalling yards are located. The use of the proposed methodology for the development of train formation plan can provide significant savings in operating costs due to the acceleration of the passing of the car through the railway sections. **Originality.** The use of the additional parameter in the development of train formation plan – «the criterion of cost saving when running of rolling stock in through-trains» – is proposed. It is shown that the application of this criterion makes it possible to substantiate the creation of separate assignments of some car-streams, while these car-streams would be considered as unprofitable, when using traditional methods of the calculation of train formation plan. The authors analyzed the influence of such factors as the train composition, the length of the railway section and the car traffic volume on the cost savings by using the proposed criterion. **Practical value.** The obtained results can be used in the development of the train formation plan, which will save the operating costs connected with the movement of cars and locomotives.

Key words: train formation plan; car stream; service speed; cost saving; local trains; through-trains

REFERENCES

1. Abramov, A. A. (2001). *Upravlenie ekspluatatsionnoy rabotoy* (Vol. 1-3). Moscow: Rossiyskiy gosudarstvennyy otkrytyy tekhnicheskiiy universitet putey soobshcheniya. (in Russian)
2. Bodyul, V. I., & Feofilov, A. N. (2016). Concept of rational management of car fleet of rolling stock operators and information technology for its implementation. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*, 75(1), 46-52. (in Russian)
3. Saybatalov, R. F., & Borodin, A. F. (2014). Vagonnyy park, infrastrukturu i upravlenie dvizheniem – k obshchemu znamenatelyu. *Zheleznodorozhnyy transport*, 11, 26-34. (in Russian)
4. Doroshko, S. V. (2010). Adaptivnaya sistema organizatsii vagonopotokov. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 34, 39-45. (in Russian)
5. Kovalev, V. I. (2002). *Organizatsiya vagonopotokov na seti zheleznykh dorog Rossii v usloviyakh reformirovaniya otrasli*. St. Petersburg: Vybor. (in Russian)
6. Levin, D. Y. (2017). Organization of Car Flows in Market Conditions. *World Transport*, 4(71), 178-192. (in Russian)
7. Negrey, V. Y., & Shkuryn, K. M. (2016). Razvitie metodov analiza perevoznogo protsessa. *Vestnik BelGUTA: Nauka i transport*, 2(33), 23-25. (in Russian)
8. Nekrashevich, V. I., & Apattsev, V. I. (2004). *Upravlenie ekspluatatsiey lokomotivov*. Moscow: Rossiyskiy gosudarstvennyy otkrytyy tekhnicheskiiy universitet putey soobshcheniya. (in Russian)
9. Osminin, A. T. (2000). *Ratsionalnaya organizatsiya vagonopotokov na osnove metodov mnogokriterialnoy optimizatsii*. (Dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk). Samara State Transport University, Samara. (in Russian)
10. Pravdin, N. V., Dykanyuk, N. L., & Negrey, V. Y. (1987). *Prognozirovaniye gruzovykh potokov*. Moscow: Transport. (in Russian)

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

11. Pulatov, P. N. (2018). Koordinatsiya tekhnologii ekspluatatsionnoy raboty zheleznoy dorogi Respubliki Tadzhiqistan i organizatsii vagonopotokov v mezhdunarodnom soobshchenii. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*, 4 (77), 211-217. (in Russian)
12. Gruntov, P. S., Dyakov, Y. V., Makarochkin, A. M., & Gruntov, P. S. (Ed). (1994). *Upravlenie ekspluatatsionnoy rabotoy i kachestvom perevozk na zheleznodorozhnom transporte: Uchebnyk dlya vuzov*. Moscow: Transport. (in Russian)
13. Fedorov, Y. A. (2018). Metodologicheskie osnovy realizatsii planov formirovaniya poezdov perevozhnikov v grafike dvizheniya poezdov na poligone infrastruktury. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*, 2 (77), 92-97. (in Russian)
14. Shapkin, I. N., & Vdovin, A. N. (2013). Na osnove imitatsionnogo modelirovaniya. *Zheleznodorozhnyy transport*, 3, 37-41. (in Russian)
15. Shapkin, I. N., Yusipov, R. A., & Kozhanov, Y. M. (2007). *Normirovanie i prognozirovanie na zheleznykh dorogakh (metody, algoritmy, tekhnologii, raschety)*. Moscow: Institute of Social and Political Studies of the Russian Academy of Sciences (ISPR RAS). (in Russian)
16. Shkurny, K. M. (2017). Sistemyy podkhod k optimizatsii plana formirovaniya poezdov. *Vestnik BelGUTA: Nauka i transport*, 1(34), 61-64. (in Russian)
17. Butko, T., Prokhorov, V., & Chekhunov, D. (2017). Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3(85)), 55-61. doi: 10.15587/1729-4061.2017.93276 (in English)
18. Chen, C., Fang, H., & Xue, F. (2012). Model and Algorithm of the Car-to-Block Assignment Plan on Railway Network. *ICLEM 2012*. doi: 10.1061/9780784412602.0009 (in English)
19. Jacob, R., Márton, P., Maue, J., & Nunkesser, M. (2010). Multistage methods for freight train classification. *Networks*, 57(1), 87-105. doi: 10.1002/net.20385 (in English)
20. Bohlin, M., Gestrelus, S., Dahms, F., Mihalák, M., & Flier, H. (2016). Optimization Methods for Multistage Freight Train Formation. *Transportation Science*, 50(3), 823-840. doi: 10.1287/trsc.2014.0580 (in English)
21. Michal, G., Huynh, N., Shukla, N., Munoz, A., & Barthelemy, J. (2017). RailNet: A simulation model for operational planning of rail freight. *Transportation Research Procedia*, 25, 461-473. doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.426 (in English)
22. Xiao, J., & Lin, B. (2016). Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 6(3), 218-236. doi: 10.1016/j.jrtpm.2016.09.002 (in English)
23. Yaghini, M., Momeni, M., & Sarmadi, M. (2015). A hybrid solution method for fuzzy train formation planning. *Applied Soft Computing*, 31, 257-265. doi: 10.1016/j.asoc.2015.02.039 (in English)

Поступила в редколлегию: 12.06.2018

Принята к печати: 02.10.2018