

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА СЪЕМА ПЕЗДОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

Уточнена методика расчета коэффициента съема поездов при организации высокоскоростного движения. Выполнен факторный анализ влияния эксплуатационных параметров железнодорожной линии на значения основного и дополнительного съема. Получены аналитические зависимости составляющих коэффициента съема от скоростей движения грузовых и пассажирских поездов, длин блок-участков, расстояния между станциями обгона. Сформулированы рекомендации по повышению пропускной способности при организации смешанного движения грузовых и высокоскоростных пассажирских поездов.

Введение. Расчет пропускной способности железнодорожных участков и направлений при организации высокоскоростного движения по существующей путевой инфраструктуре является основой для корректных технико-экономических оценок. При аналитическом расчете пропускной способности участка при непараллельном графике базовым параметром является коэффициент съема [1].

Аналитический метод расчета коэффициента съема базируется на оценке количества пересечений ниткой одного пассажирского поезда, ниток грузовых поездов попутного направления и последующего анализа факторов, влияющих на коэффициент съема. Метод определения коэффициента съема эволюционировал от анализа периода графика на перегоне (1960-е годы), анализа периодов графика на смежных перегонах (1970-е годы) до общего анализа всего участка в 1980-х годах [2–5]. Общим подходом в данных методах является разделение коэффициента съема на две составные части: основной коэффициент съема $\epsilon_{осн}$ и дополнительный коэффициент $\epsilon_{доп}$.

Многие научные работы посвящены проблематике оценки коэффициента съема при скоростях пассажирских поездов до 200 км/ч. В данной работе выполнено исследование изменения коэффициента съема поездов при скоростях от 200 до 250 км/ч. Идея уточнения аналитического метода расчета коэффициента съема для пассажирских поездов, следующих со скоростью 250 км/ч, заключается в следующем:

- 1) анализ состава и влияющих факторов коэффициента съема для высокоскоростного пассажирского поезда, следующего со скоростью 250 км/ч;
- 2) анализ изменения основного коэффициента съема $\epsilon_{осн}$ при скорости 250 км/ч;
- 3) анализ изменения коэффициента дополнительного вычитания $\epsilon_{доп}$ при скорости 250 км/ч.

1 Факторный анализ коэффициента съема.

Поезда на двухпутном участке, оборудованные автоматической блокировкой, движутся с разграничением межпоездными интервалами, которые зависят от величин и количества блок-участков, разницы скоростей движения пассажирских и грузовых поездов, схем прокладки поездов в ГДП [6].

Рассмотрим влияние данных факторов на коэффициент съема.

1 Оценка зоны влияния одного пассажирского поезда. Зоной влияния пассажирского поезда будем считать период ГДП между нитками грузовых поездов,

не пересекающимися с пассажирским поездом (рисунок 1) [7].

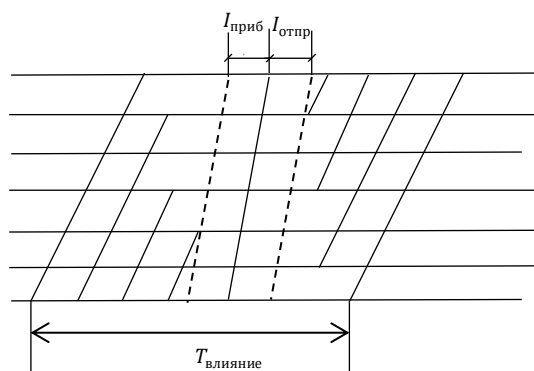


Рисунок 1 – Зона влияния пассажирского поезда

Оценка зоны влияния пассажирских поездов производится исходя из принципа «максимальной» прокладки, т. е. на всех станциях скрещения между пассажирскими и грузовыми поездами с обеих сторон имеется как минимум один межпоездной интервал, достаточный для выполнения требований $I_{приб}$ и $I_{отпр}$, грузовые поезда прокладываются с соблюдением межпоездных интервалов I .

Таким образом, продолжительность зоны влияния пассажирского поезда

$$T_{вл} = (n_{обгон} + 1)I + I_{приб} + I_{отпр} + t_p + t_z + \delta T, \quad (1)$$

где $n_{обгон}$ – количество грузовых поездов в зоне влияния пассажирского поезда

$$n_{обгон} = \left[\frac{\sum \Delta t_{гр.i}}{I} = \frac{\sum (\Delta t_{гр.i} - t_{пас.i})}{I} \right], \quad (2)$$

$t_{гр.i}$ – время следования грузового поезда между зонными станциями участка i , мин; $t_{пас.i}$ – время следования пассажирского поезда между зонными станциями участка i , мин; Δt_i – разница во времени следования грузовых и пассажирских поездов по перегону, мин; $[]$ – символ округления в меньшую сторону; $I_{приб}$, $I_{отпр}$ – интервалы одновременного прибытия и попутного отправления поездов; t_p , t_z – дополнительные затраты времени на разгоны и замедления грузовых поездов на обгонных станциях; δT – затраты времени на остановку грузового поезда для пропуска пассажирского и его отправление

$$(I_{\text{приб}} + I_{\text{отпр}} + t_p + t_3),$$

$$\delta T = \delta t_{\text{слева}} + \delta t_{\text{справа}},$$

$\delta t_{\text{слева}}, \delta t_{\text{справа}}$ – смещение между воображаемыми нитками грузовых поездов по обе стороны от пассажирского поезда на станции обгона.

Величина δT обусловлена разницей во времени хода пассажирских и грузовых поездов, проходящих по участку i Δt_i . Значение δT определяется для каждой станции обгона.

2 **Факторный анализ коэффициента съема одного пассажирского поезда.** Исходя из определения коэффициента съема и зоны влияния пассажирского поезда, коэффициент съема для одного пассажирского поезда

$$\varepsilon_{\text{пас}} = \frac{I_{\text{приб}} + I_{\text{отпр}} + t_p + t_3 + \delta T}{I} = \frac{I_{\text{приб}} + I_{\text{отпр}} + t_p + t_3}{I} + \frac{\delta T}{I} = \varepsilon_{\text{осн}} + \varepsilon_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{осн}}$ – основной коэффициент съема пассажирских поездов; $\varepsilon_{\text{доп}}$ – дополнительный коэффициент съема пассажирских поездов.

Исходя из формулы (3) $\varepsilon_{\text{осн}}$ зависит от $I_{\text{приб}}, I_{\text{отпр}}, t_p, t_3$ и I , а $\varepsilon_{\text{доп}}$ зависит от δT и межпоездного интервала I . На δT в основном влияет распределение интервалов и разница в скорости между пассажирскими и грузовыми поездами, и является фиксированным значением для определенной схемы прокладки поездов в ГДП. Для каждой станции обгона можно установить значение δT , которое зависит от величин левого $\delta t_{\text{слева}}$ и правого смещения $\delta t_{\text{справа}}$. При этом значения изменяются в пределах $\delta t_{\text{слева}} = \{0; \delta t_{\text{слева}}^{\text{max}}\}$, $\delta t_{\text{справа}} = I$.

Значение δT может быть определено путем нахождения максимального значения смещения воображаемой нитки ГДП в левую сторону. Поскольку станцией обгона может быть любая промежуточная станция участка, выбираем промежуточную станцию участка i и принимаем для нее $\delta t_{\text{слева}} = 0$. Далее формируется схема пропуска пассажирского поезда по участку, при которой количество обгонов равно количеству промежуточных станций на участке m . Исходя из принципа «максимальной прокладки поездов» определяем значения $\delta t_{\text{слева}i-1}$ и $\delta t_{\text{слева}i+1}$ по следующим формулам:

$$\delta t_{\text{слева}i-1} = \begin{cases} \delta t_{\text{слева}} - t_{\text{разн}i}, & \text{когда } \delta t_{\text{слева}i} \geq t_{\text{разн}i}, \\ \delta t_{\text{слева}i} + I - t_{\text{разн}i}, & \text{когда } \delta t_{\text{слева}i} < t_{\text{разн}i}, \end{cases} \quad (4)$$

либо

$$\delta t_{\text{слева}i+1} = \begin{cases} \delta t_{\text{слева}} + t_{\text{разн}i+1}, & \text{когда } \delta t_{\text{слева}i} + t_{\text{разн}i+1} < I, \\ \delta t_{\text{слева}i} - I + t_{\text{разн}i+1}, & \text{когда } \delta t_{\text{слева}i} + t_{\text{разн}i+1} \geq I. \end{cases} \quad (5)$$

Для установления оптимальной схемы пропуска поездов выполняем расчет $\delta t_{\text{слева}}$ поочередно относительно каждой промежуточной станции участка, для которой принимаем $\delta t_{\text{слева}} = 0$. Расчет выполняем для всех станций, находящихся относительно расчетной

сверху, по формуле (4), и всех станций, находящихся снизу, по формуле (5). Схема пропуска поездов с наименьшим значением δt является наилучшей.

2 **Анализ факторов, влияющих на основной коэффициент съема пассажирских поездов.** Оценим влияние параметров, входящих в формулу (3), на основной коэффициент съема. К таким параметрам относятся $I_{\text{приб}}, I_{\text{отпр}}, t_p, t_3, I$, а также разница во временах хода пассажирских и грузовых поездов $t_{\text{разн}}$.

1 Влияние $t_{\text{разн}}$ на основной коэффициент съема. При изменении скорости движения грузовых поездов в диапазоне от 70 до 90 км/ч значение $t_{\text{разн}}$ остается практически неизменным и составляет 5 мин [8].

2 Влияние $I_{\text{приб}}, I_{\text{отпр}}$ на основной коэффициент съема. Согласно формуле (3), если увеличивается скорость пассажирского поезда (например, до 250 км/ч), а скорость грузового не изменяется, то значения интервалов $I_{\text{приб}}$ и $I_{\text{отпр}}$ увеличиваются. Исследование показывает, что изменение $I_{\text{приб}}$ и $I_{\text{отпр}}$ связано с такими факторами, как изменение системы сигнализации, увеличение скорости и изменение длин участков прибытия и отправления поездов.

При организации высокоскоростного движения пассажирский поезд движется по четырехзначной системе автоблокировки (рисунок 2) [6].

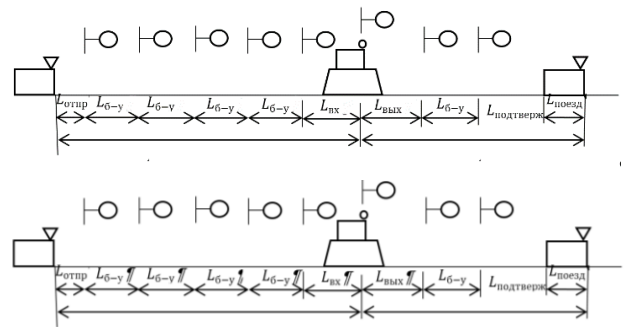


Рисунок 2 – Принципиальная схема движения пассажирских поездов по четырем сигналам автоблокировки

Пусть средняя скорость пассажирского поезда равна 90 % от максимальной эксплуатационной скорости v_{max} . Тогда

$$I_{\text{приб-проп}} + I_{\text{приб-отпр}} = \frac{0,06(nL_{\text{б-у}} + L_{\text{поезд}})}{v_{\text{max}} \cdot 90\%} + t_{\text{отпр}}, \quad (6)$$

где $I_{\text{приб-отпр}}$ – интервал времени между моментом прибытия предыдущего поезда на станцию и его остановкой и моментом проследования без остановки станции следующим поездом, включая время на приготовление маршрута и время прохождения следующим поездом одного или двух блок-участков и расстояния от входной горловины до центра станции; $I_{\text{приб-проп}}$ – минимальный интервал между временем прохода предшествующего поезда через станцию и временем отправления следующего за ним поезда, включающий время на выполнение операций по отпращиванию и проследование первым поездом выходной горловины и одного блок-участка; $L_{\text{поезд}}$ – длина пассажирского поезда, м, принимается равной 500 м; n – количество блок-участков между прибытием и отпращиванием пассажирских поездов, обгоны других поездов; $t_{\text{отпр}}$ – время на выполнение операций по отпращиванию поезда.

При скоростях движения пассажирских поездов $v_{\text{пас}} \leq 120$ км/ч формула (6) примет вид

$$I_{\text{приб-проп}} + I_{\text{приб-отпр}} = \frac{0,06(6L_{\text{б-у}} + L_{\text{поезд}})}{v_{\text{пас}} \cdot 90\%} + t_{\text{отпр}} \quad (7)$$

При увеличении скорости ($v_{\text{пас}} > 120$ км/ч) расчетное значение

$$I_{\text{приб-проп}} + I_{\text{приб-отпр}} = \frac{0,06(7L_{\text{б-у}} + L_{\text{поезд}})}{v_{\text{пас}} \cdot 90\%} + t_{\text{отпр}} \quad (8)$$

Кроме того, в зависимости от допускаемых скоростей движения поездов увеличивается длина тормозного пути, что влечет за собой увеличение длин блок-участков. Выполним расчеты значения интервала $I_{\text{приб-проп}} + I_{\text{приб-отпр}}$ при длинах блок-участков, равных 1500, 1850 и 2400 м (таблица 1).

Таблица 1 – Значения $I_{\text{приб-проп}} + I_{\text{приб-отпр}}$ при различных скоростях движения поездов и длинах блок-участков

В минутах

$V_{\text{пас}}, \text{ км/ч}$	$L_{\text{б-у}}, \text{ м}$		
	1500	1850	2400
100	7,33	8,73	10,93
120	6,28	7,44	9,28
140	6,24	7,40	9,24
160	5,58	6,60	8,21
200	4,67	5,48	6,77
250	3,93	4,59	5,61

На основании таблицы 1 можно сделать вывод, что, несмотря на необходимость увеличения длин блок-участков и их количества, увеличение скоростей движения пассажирских поездов способствует снижению продолжительности интервала $I_{\text{приб-проп}} + I_{\text{приб-отпр}}$.

На основании предыдущего анализа рассчитаем значения основного коэффициента съема $\epsilon_{\text{осн}}$ в зависимости от эксплуатационных параметров (таблица 2).

Таблица 2 – Величины $\epsilon_{\text{осн}}$ для различных значений скоростей движения поездов, длин блок-участков и межпоездных интервалов

$V_{\text{пас}}, \text{ км/ч}$	Минимальное значение I	$L_{\text{б-у}}, \text{ м}$		
		1500	1850	2400
100	12	1,03	1,14	1,33
	10	1,23	1,37	1,59
	8	1,54	1,72	1,99
120	12	0,94	1,04	1,19
	10	1,13	1,24	1,43
	8	1,41	1,56	1,78
140	12	0,94	1,03	1,19
	10	1,12	1,24	1,42
	8	1,40	1,55	1,78
160	12	0,88	0,97	1,10
	10	1,06	1,16	1,32
	8	1,32	1,45	1,65
200	12	0,81	0,87	0,98
	10	0,97	1,05	1,18
	8	1,21	1,31	1,47
250	12	0,74	0,80	0,88
	10	0,89	0,96	1,06
	8	1,12	1,20	1,33

На основании таблицы 2 можно сделать вывод, что основной коэффициент съема $\epsilon_{\text{осн}}$ имеет тенденцию к

уменьшению при увеличении скорости движения поездов при неизменной длине блок-участка. А увеличение длин блок-участков приводит к пропорциональному увеличению основного коэффициента съема $\epsilon_{\text{осн}}$.

3 Анализ факторов, влияющих на δT . Дополнительный коэффициент съема $\epsilon_{\text{доп}}$ напрямую зависит от δT и обусловлен разницей во времени хода поездов $\Sigma \Delta t_i$, неравномерностью распределения их на графике и неидентичностью перегонов.

Общее значение δT . Согласно результатам соответствующих исследований δT обычно не превышает максимального значения разницы во времени $\Sigma \Delta t_i$ между пассажирским и грузовым поездами на участке. Это происходит, когда разница в скорости между пассажирскими и грузовыми поездами невелика, например, 120 и 80 км/ч, а расстояние между станциями составляет 10–15 км, δT не должно превышать 4 мин. Если схема обгона поездов оптимизирована, дополнительный коэффициент съема $\epsilon_{\text{доп}}$ не превышает 0,25.

Изменение δT при увеличении скорости пассажирского поезда. При увеличении скоростей движения пассажирских поездов и неизменных скоростях грузовых, непараллельное смещение линии пассажирского поезда влево приводит к изменению нитки грузового поезда в зоне его воздействия из-за увеличения разницы в скоростях движения Δt . Смещение влево ниток графика грузовых поездов как слева, так и справа от пассажирского поезда в зоне влияния связано со следующими факторами:

- 1) изменением количества обгонов и схем обгонов;
- 2) величиной значений δt для начальной и конечной станций участка и станций обгона до увеличения скорости;
- 3) величиной смещения влево линии хода пассажирского поезда на каждой станции участка и на всём участке $\Sigma t_{\text{пас},i}$, т. е. степенью увеличения скорости пассажирского поезда.

Для грузовых поездов, следующих слева и справа от пассажирского поезда, значения левого сдвига $\Delta t_{\text{слева}}$ и $\Delta t_{\text{справа}}$ могут быть получены из следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{слева}} &= \max\{t_{\text{пас},i} - \Delta t_{\text{слева}i}\}; \\ \Delta t_{\text{справа}} &= \max\{t_{\text{пас},i} - \Delta t_{\text{справа}i}\}. \end{aligned} \quad (9)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ – промежуточные станции, на которых может быть выполнен обгон (включая начальную и конечную станции участка).

Диапазон увеличения δT для различных значений скорости и расстояния между станциями показан в таблице 3.

Таблица 3 – Максимальное значение δT для различных скоростей движения поездов и расстояния между станциями

В минутах

Изменение скорости, км/ч	Расстояние между станциями, км				
	15	30	45	60	75
100 – 120	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5
100 – 140	2,6	5,1	7,7	10,3	12,9
100 – 160	3,4	6,8	10,1	13,5	16,9
100 – 200	4,5	9,0	13,5	18,0	22,5
100 – 250	5,4	10,8	16,2	21,6	27,0
120 – 140	1,1	2,1	3,2	4,3	5,4
120 – 160	1,9	3,8	5,6	7,5	9,4
120 – 200	3,0	6,0	9,0	12,0	15,0

Окончание таблицы 3

Изменение скорости, км/ч	Расстояние между станциями, км				
	15	30	45	60	75
120 – 250	3,9	7,8	11,7	15,6	19,5
140 – 160	0,8	1,6	2,4	3,2	4,0
140 – 200	1,9	3,9	5,8	7,7	9,6
140 – 250	2,8	5,7	8,5	11,3	14,1
160 – 200	1,1	2,3	3,4	4,5	5,6
160 – 250	2,0	4,1	6,1	8,1	10,1
200 – 250	0,9	1,8	2,7	3,6	4,5

Таблица 4 – Значения дополнительного коэффициента съема $\epsilon_{доп}$ при различных скоростях движения поездов и длинах блок-участков (расстояние между станциями = 15 км)

Изменение скорости, км/ч	Минимальный коэффициент съема		
	12	10	8
100 – 120	0,1	0,2	0,2
100 – 140	0,2	0,3	0,3
100 – 160	0,3	0,3	0,4
100 – 200	0,4	0,5	0,6
100 – 250	0,5	0,5	0,7
120 – 140	0,1	0,1	0,1
120 – 160	0,2	0,2	0,2
120 – 200	0,3	0,3	0,4
120 – 250	0,3	0,4	0,5
140 – 160	0,1	0,1	0,1
140 – 200	0,2	0,2	0,2
140 – 250	0,2	0,3	0,4
160 – 200	0,1	0,1	0,1
160 – 250	0,2	0,2	0,3
200 – 250	0,1	0,1	0,1

Таблица 5 – Значения дополнительного коэффициента съема $\epsilon_{доп}$ при различных скоростях движения поездов и длинах блок-участков (расстояние между станциями > 15 км)

Изменение скорости, км/ч	Минимальный коэффициент съема при расстоянии между станциями, км											
	30			45			60			75		
	12	10	8	12	10	8	12	10	8	12	10	8
100 – 120	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,5	0,6	0,8	0,6	0,8	0,9
100 – 140	0,4	0,5	0,6	0,6	0,8	1,0	0,9	1,0	1,3	1,1	1,3	1,6
100 – 160	0,6	0,7	0,8	0,8	1,0	1,3	1,1	1,4	1,7	1,4	1,7	2,1
100 – 200	0,8	0,9	1,1	1,1	1,4	1,7	1,5	1,8	2,3	1,9	2,3	2,8
100 – 250	0,9	1,1	1,4	1,4	1,6	2,0	1,8	2,2	2,7	2,3	2,7	3,4
120 – 140	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,7
120 – 160	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,6	0,8	0,9	0,8	0,9	1,2
120 – 200	0,5	0,6	0,8	0,8	0,9	1,1	1,0	1,2	1,5	1,3	1,5	1,9
120 – 250	0,7	0,8	1,0	1,0	1,2	1,5	1,3	1,6	2,0	1,6	2,0	2,4
140 – 160	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5
140 – 200	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,6	0,8	1,0	0,8	1,0	1,2
140 – 250	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	1,1	0,9	1,1	1,4	1,2	1,4	1,8
160 – 200	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,5	0,6	0,7
160 – 250	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,8	0,7	0,8	1,0	0,8	1,0	1,3
200 – 250	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6

Получено 10.11.2021

Wang Yubian. Analytical calculation of the train take-off ratio when organizing high-speed traffic.

The methodology for calculating the rate of train removal in the organization of high-speed traffic has been clarified. The factorial analysis of the influence of the operational parameters of the railway line on the values of the main and additional removal has been carried out. Analytical dependences of the components of the take-off coefficient on the speed of movement of freight and passenger trains, the lengths of block sections, the distance between overtaking stations are obtained. Recommendations are formulated for increasing the throughput when organizing mixed traffic of freight and high-speed passenger trains.

На основании анализа таблиц 3–5 можно сделать вывод, что увеличение δT пропорционально увеличению скорости и расстоянию между станциями. При расстоянии между станциями 15 км увеличение δT составляет от 1,5 до 5,5 мин. В диапазоне изменения скоростей пассажирского поезда от 100 до 250 км/ч и значениях межпоездного интервала $I = 12, 10$ и 8 мин значения $\epsilon_{доп}$ составляют от 0,1 до 0,7 соответственно. Когда расстояние между станциями обгона увеличивается, значения $\epsilon_{доп}$ составляют от 0,3 до 3,4 соответственно.

Вывод. Таким образом, при увеличении скоростей движения пассажирских поездов и организации смешанного движения грузовых и высокоскоростных пассажирский поездов коэффициент съема может равняться 5, что приводит к существенному снижению пропускной способности железнодорожных линий. При увеличении разницы в скоростях движения грузовых и пассажирских поездов снижается коэффициент основного съема, но на большую величину увеличивается коэффициент дополнительного съема.

В таких условиях повышение пропускной способности может быть достигнуто за счет увеличения скоростей движения грузовых поездов и сокращения расстояния между обгонными станциями.

Список литературы

- 1 Методические рекомендации по расчету пропускной и перерабатывающей способности железнодорожных сооружений и устройств. Ч. 1. Методика расчета : утв. приказом от 03.09.2009 № 1043 НЗ.
- 2 **Каретников, А. Д.** Совершенствование графика движения поездов и улучшение использования пропускной способности железнодорожных линий / А. Д. Каретников, Н. А. Воробьев. – М : ВНИИЖТ, 1960. – 222 с.
- 3 **Чернюгов, А. Д.** Организация эксплуатационной работы железнодорожных направлений // Труды ВНИИЖТа / А. Д. Чернюгов. – М. : Транспорт, 1975. – Вып. 547. – С. 5.
- 4 **Каретников, А. Д.** График движения поездов / А. Д. Каретников, Н. А. Воробьев. – М. : Транспорт, 1979. – 301 с.
- 5 **Козлов, И. Т.** Пропускная способность транспортных систем / И. Т. Козлов. – М. : Транспорт, 1985. – 214 с.
- 6 Инструкция по определению станционных и межпоездных интервалов. СТП 09150.15.002-2001 : приказ № 548НЗ от 29.12.2001. – Минск : Белорусская железная дорога, 2001. – 107 с.
- 7 СТП 09150.15.114-2009. : Порядок разработки графика движения поездов на Белорусской железной дороге : утв. приказом № 1127НЗ от 30.09.2009. – Минск : Белорусская железная дорога, 2009. – 112 с.
- 8 **Ерофеев, А. А.** Система автоматизированного проектирования графика движения поездов / А. А. Ерофеев, Е. А. Ерофеева. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 150 с.

