

УДК 629.4.014.7

Ю.Я. Водяников, А.А. Сулим, П.А. Хозя, С.А. Столетов, Э.В. Третьяк

## ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПУТЬ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

*Приведены результаты исследования воздействия на путь грузового вагона при торможении; показано, что динамическая нагрузка на рельсовый путь передних и задних тележек отличаются – более нагруженной является передняя по ходу движения тележка. На основании расчетно-экспериментальных исследований установлено, что при снижении жесткостных характеристик рессорного подвешивания динамическая нагрузка на рельсовый путь уменьшается. Предложена интегральная оценка динамических сил на основе вероятности движения вагона с определенной скоростью.*

Создание транспортных коридоров и увеличение провозной способности за счет повышения скоростей движения как одну из актуальных выдвигает проблему воздействия на путь при движении грузового состава на скоростных железнодорожных линиях для пассажирского движения.

Одним из факторов, увеличивающих воздействие на путь, могут быть силы, возникающие при торможении поезда вследствие дополнительной нагрузки-разгрузки колесной пары, причем перегрузку получает передняя по ходу движения тележка, а разгрузку – задняя [1]. Это обусловлено тем, что при торможении вагона тормозная сила реализуется за счет коэффициента сцепления колеса с рельсом, при этом взаимодействие силы торможения и силы инерции, приложенных к центру тяжести вагона, создает момент сил, который нагружает первую по ходу движения тележку и обезгруживает вторую.

Исходя из равенства моментов сил [2], действующих на вагон при торможении (рис. 1) относительно оси, проходящей через шкворень, перпендикулярно плоскости чертежа, добавочная вертикальная составляющая сила  $\Delta q$  при торможении определяется по формуле:

$$\Delta q = \delta \cdot \varphi_k \cdot \left[ \frac{Q \cdot h_0}{2 \cdot A} - \frac{q' \cdot (h_2 - h_3)}{a} \right] + \sum (K) \cdot \varphi_k \cdot \left( \frac{h_1}{2 \cdot A} + \frac{h_2}{2 \cdot a} \right) \quad (1)$$

где  $\delta$  - расчетный коэффициент силы нажатия колодок на колеса;

$\varphi_k$  - коэффициент трения колодки и колеса;

$Q$  - статическая нагрузка на рельсы (брутто вагона), тс;

© Водяников Ю.Я., Сулим А.А., Хозя П.А., Столетов С.А., Третьяк Э.В.,  
2018

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$h_0$  - координата приложения силы инерции, м;

$q'$  - вес тележки,  $q' = 4,9$  тс;

$h_2$  - расстояние от головки рельса до подпятника, м;

$h_3$  - координата центра тяжести тележки, м;

$A$  - база вагона (расстояние между шкворнями тележек), м;

$a$  - база тележки,  $a = 1,8$  м;

$K$  - расчетная сила нажатия колодки на колесо;

$h_1$  - расстояние от пятника тележки до оси сцепления автосцепок, м.

Воздействие на путь определяется средней динамической погонной нагрузкой  $q_{дин}$  по формуле:

$$q_{дин} = \frac{n \cdot P_{oc}}{2 \cdot l_m + \Delta l} (1 + \kappa_{ов}) \quad (2)$$

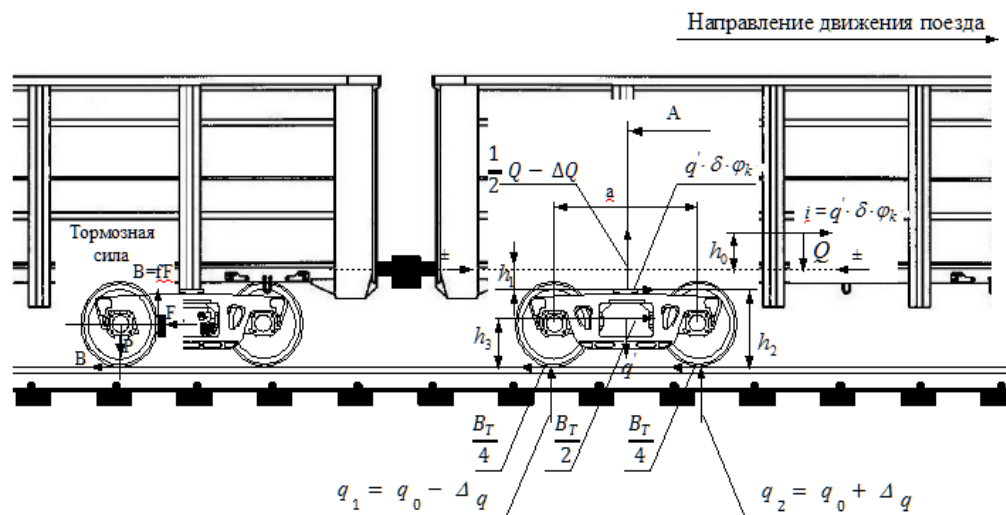
где:  $n$  - число осей в тележке,  $n = 2$ ;

$P_{oc}$  - расчетная статическая осевая нагрузка,  $P_{oc} = \frac{P_{бр}}{2 \cdot n}$  ( $P_{бр}$  - брутто вагона);

$2 \cdot l_m$  - база тележки;

$\Delta l = 2,2$  м – условная длина общей расчетной зоны влияния крайних осей;

$\kappa_{ов}$  - расчетный коэффициент вертикальной динамики вагона.



**Рис. 1. Схема сил, возникающих в процессе торможения вагона в составе поезда**

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Динамический коэффициент  $\kappa_{\text{дн}}$  воздействия на путь определяется как отношение средней динамической погонной нагрузки к средней статической погонной нагрузке по формуле:

$$\kappa_{\text{дн}} = \frac{q_{\text{дин}}}{q_{\text{ст}}}, \quad (3)$$

Средняя погонная статическая нагрузка зависит от брутто вагона  $P_{\text{бр}}$  и длины вагона по осям сцепления автосцепок  $L_c$  (4):

$$q_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{бр}}}{2 \cdot L_c}, \quad (4)$$

Дополнительная вертикальная сила, действующая на рельсы, возникающая при торможении, определялась на примере длиннобазных платформ для перевозки контейнеров. Длиннобазные платформы для перевозки контейнеров модели 13-7021, 13-7031, 13-1796 и др. имеют одинаковые конструктивные размеры: длина по осям сцепления автосцепок 25690 мм, база платформы 18500 мм.

Дальнейшему анализу подвергалась платформа модели 13-7024, для которой в груженом состоянии (брутто 93,5 тс) расстояние от головки рельса до центра тяжести составляет 2,01 м. Расчетные силы нажатия колодок на колеса груженой платформы с композиционными колодками, полученные в результате поездных тормозных испытаний [3] при экстренном пневматическом торможении на площадке, представлены в таблице 1.

**Таблица 1. Расчетные силы нажатия колодок на колеса груженой платформы с композиционными колодками**

Скорость в начале торможения, км/ч	Расчетный коэффициент силы нажатия композиционных колодок	Суммарная расчетная сила нажатия композиционных колодок на ось, тс/ось	Расчетный коэффициент силы нажатия композиционных колодок в пересчете на чугунные	Суммарная расчетная сила нажатия композиционных колодок на ось в пересчете на чугунные, тс/ось
40	0,14	3,273	0,297	6,909
50	0,143	3,343	0,319	7,407
60	0,145	3,389	0,337	7,835
70	0,146	3,413	0,363	8,2
80	0,148	3,460	0,369	8,573
90	0,15	3,506	0,382	8,885
100	0,151	3,530	0,394	9,158
110	0,153	3,576	0,405	9,413
120	0,154	3,600	0,416	9,669

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Так как, основными видами торможений при движении грузового поезда являются регулировочные (в том числе полное служебное торможение), то дополнительные нагрузки по формуле (1) определялись для экстренного и полного служебного торможений. Результаты расчета представлены на рис. 2 и 3.

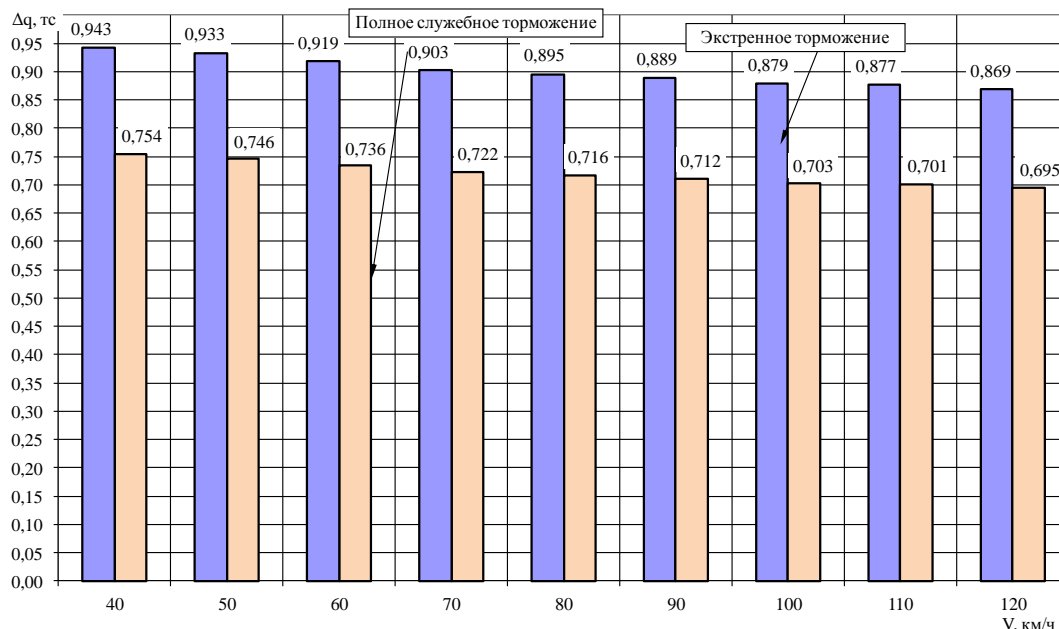


Рис. 2. Добавочная вертикальная нагрузка, действующая на каждую из колесных пар передней тележки при торможении

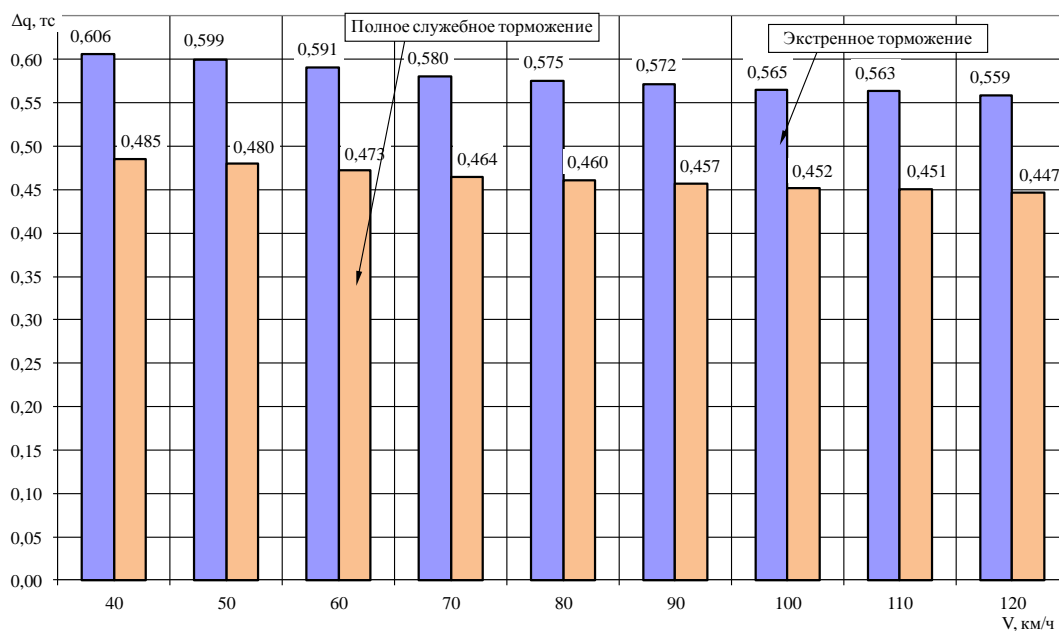


Рис. 3. Добавочная вертикальная нагрузка, действующая на каждую из колесных пар задней тележки при торможении

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Одним из основных факторов динамического воздействия на путь является коэффициент вертикальной динамики необрессоренных частей тележек грузового вагона, определяемый по формуле:

$$\hat{E}_{\dot{a}\dot{a}} = \frac{\bar{E}_{\dot{a}\dot{a}}}{\beta} \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \ln \frac{1}{1 - P(K_{\dot{a}\dot{a}})}}, \quad (5)$$

где  $\bar{K}_{\dot{a}\dot{a}}$  - среднее вероятное значение коэффициент вертикальной динамики;

$\beta$  - параметр распределения, для грузовых вагонов  $\beta = 1,13$ ;

$P(K_{\dot{a}\dot{a}})$  - вероятность распределения коэффициента вертикальной динамики, принимается равной  $P(K_{\dot{a}\dot{a}}) = 0,97$ .

Средние вероятные значения коэффициента вертикальной динамики для скоростей  $V \geq 15$  м/с и  $V \leq 15$  м/с определяются соответственно по формулам [2]:

$$\bar{K}_{\dot{a}\dot{a}} = a + 3,6 \cdot 10^4 \cdot v \cdot \frac{V - 15}{f_{cm}}; \quad (6)$$

$$\bar{K}_{\dot{a}\dot{a}} = a \cdot \frac{V}{15}, \quad (7)$$

где  $a = 0,15$  (для необрессоренных частей тележки);

$v$  – коэффициент, учитывающий влияние числа осей,  $v = 1$ ;

$V$  – расчетная скорость движения, м/с;

$f_{cm}$  – статический прогиб рессорных комплектов:

$$f_{cm} = \frac{P_{\dot{\sigma}p}}{g}, \quad (8)$$

здесь  $P_{\dot{\sigma}p}$  брутто вагона, тс;

$g$  - жесткость рессорного комплекта тележки, тс/м.

Статический прогиб рессорных комплектов первой и второй тележек с учетом вертикальной добавочной нагрузки определяются по формулам:

$$f_{cm,1} = \frac{P_{\dot{\sigma}p} / 2 + 2 \cdot \Delta q}{n_1 \cdot g} \quad (9)$$

$$f_{cm,2} = \frac{P_{\dot{\sigma}p} / 2 - 2 \cdot \Delta q}{n_1 \cdot g} \quad (10)$$

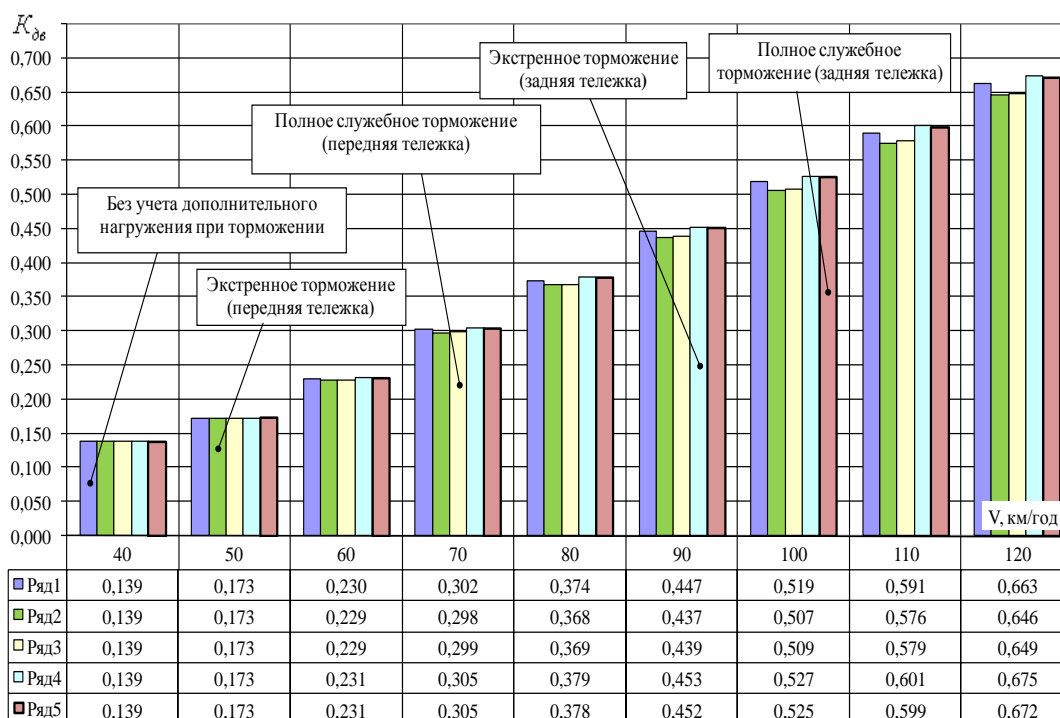
где  $n_1 = 2$  – число осей на тележке.

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

В настоящее время для грузовых вагонов с осевой нагрузкой 23,5 т/ось используются два типа тележек 18-100 и 18-7020, жесткость рессорных комплектов для которых равны соответственно 8849 Кн/м (901,5 т/м) и 6538 Кн/м (666 т/м).

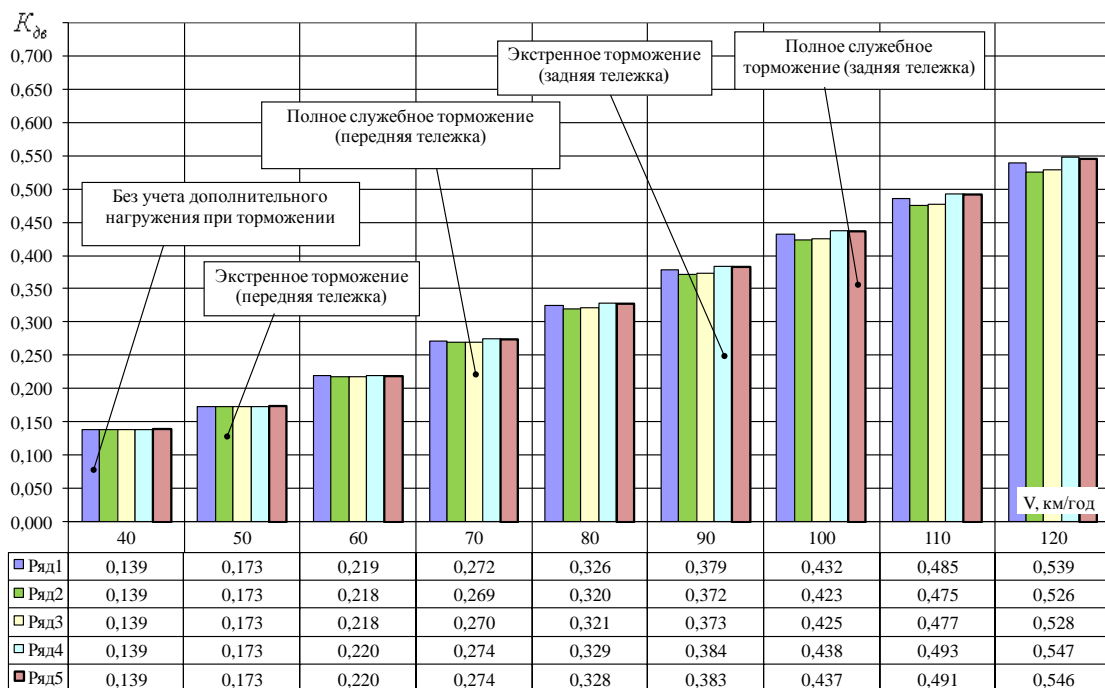
На рисунках 4 и 5 представлены диаграммы коэффициентов вертикальной динамики необрессоренных частей тележек платформы с учетом жесткостных характеристик рессорных комплектов грузовых тележек.

В процессе торможения скорость движения уменьшается от максимальной величины в начале торможения до нулевой (рис. 6) и, следовательно, динамическое воздействие на путь будет изменяться в соответствии с изменением скорости движения (рис. 7 и 8).

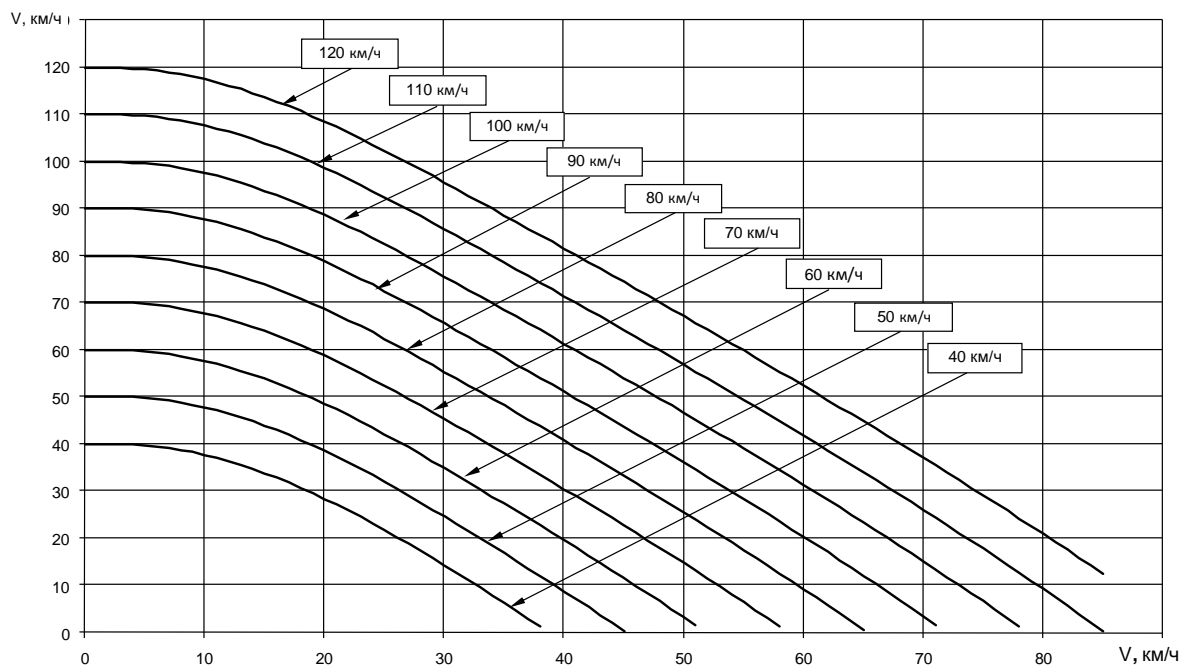


**Рис. 4. Коэффициенты вертикальной динамики необрессоренных частей тележки модели 18-100**

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД



**Рис. 5. Коэффициенты вертикальной динамики необрессоренных частей тележки модели 18-7020**



**Рис. 6. Изменение скорости движения вагона при торможении**

# РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

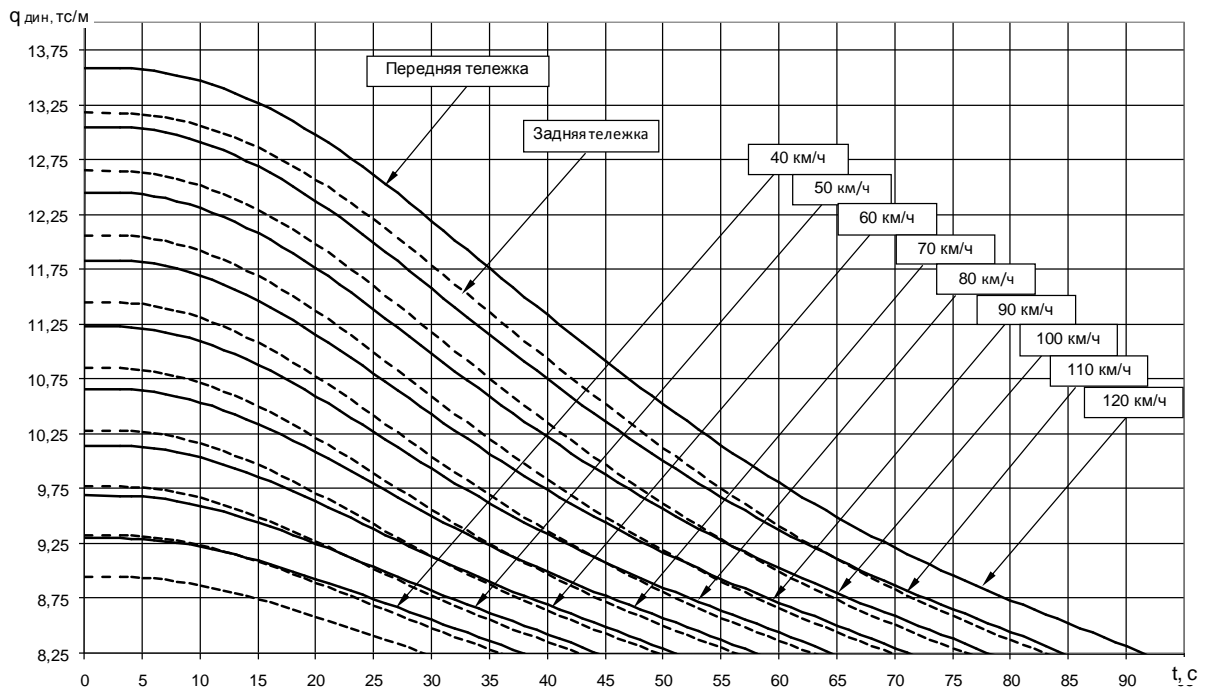


Рис. 7. Динамическая погонная нагрузка на путь от тележки модели 18-100 при торможении

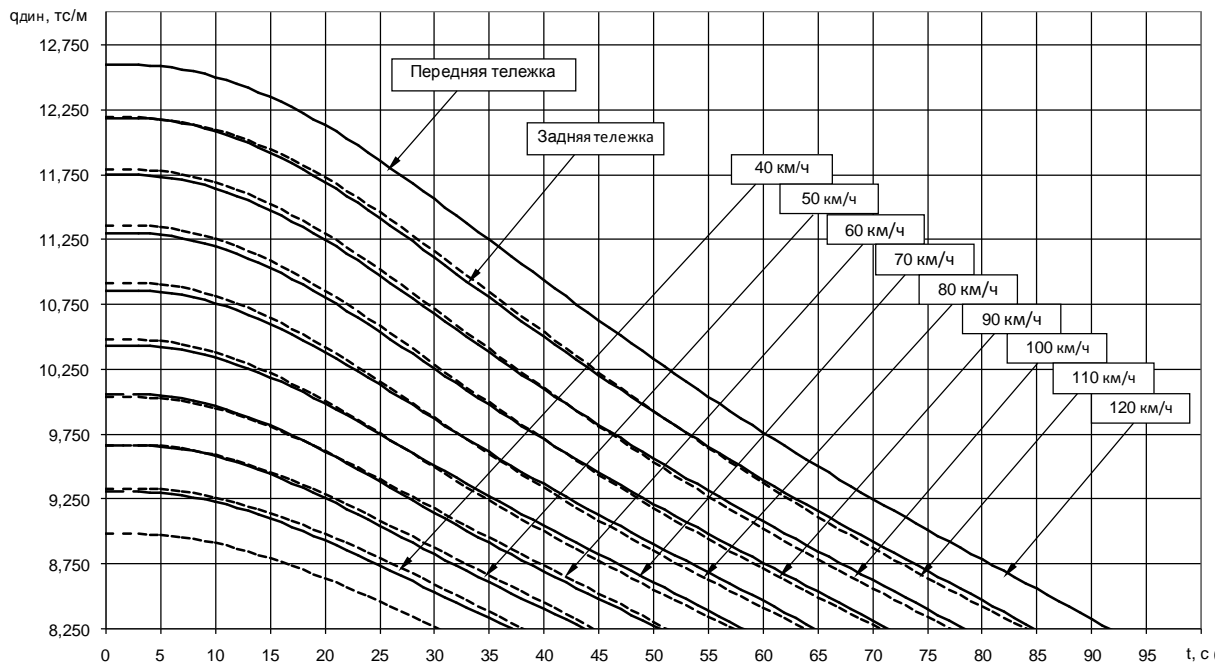


Рис. 8. Динамическая погонная нагрузка на путь от тележки модели 18-7020 при торможении



## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

С учетом характера изменения динамической погонной нагрузки на путь при торможении средняя величина динамической силы для колесной пары за время торможения определяется по формуле:

$$q_{\text{дин,торм}} = \frac{\frac{q_{\text{дин,1}}}{2} + \frac{q_{\text{дин,2}}}{2}}{2}, \quad (11)$$

где  $q_{\text{дин,1}}$  и  $q_{\text{дин,2}}$  - динамическая сила соответственно от передней и задней тележек.

Результаты расчета приведены в таблице 2, на рис. 9 приведены средние погонные нагрузки при торможении вагона.

Таблица 2. Динамические силы воздействия на путь при торможении

V, м/ч	Тележка модели 18-100			Тележка модели 18-7020		
	$q_{\text{дин,1}}$	$q_{\text{дин,2}}$	$q_{\text{дин,торм}}$	$q_{\text{дин,1}}$	$q_{\text{дин,2}}$	$q_{\text{дин,торм}}$
1	2	3	4	5	6	7
40	16,13	16,13	8,07	16,13	16,13	8,07
50	16,83	16,83	8,41	16,83	16,83	8,41
60	17,67	17,69	8,84	17,52	17,54	8,77
70	18,61	18,68	9,32	18,22	18,27	9,12
80	19,56	19,66	9,80	18,92	18,99	9,48
90	20,50	20,64	10,29	19,62	19,72	9,83
100	21,45	21,62	10,77	20,32	20,44	10,19
110	22,40	22,60	11,25	21,01	21,17	10,55
120	23,34	23,59	11,73	21,71	21,89	10,90

Анализ результатов исследования показывает, что наибольшее воздействие на путь проявляется при движении грузового поезда. Для сравнительного анализа были рассчитаны коэффициенты динамики необрессоренных частей тележек и динамические силы воздействия на путь для платформы и пассажирского вагона модели 61-779 (брутто вагона 63 тс, гибкость рессорного комплекта 0,97 м/МН (тележка КВЗ ЦНИИМ), длина по осям сцепления 26696 мм, база вагона 19000 мм). Результаты расчета представлены на рис. 10 и 11.

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

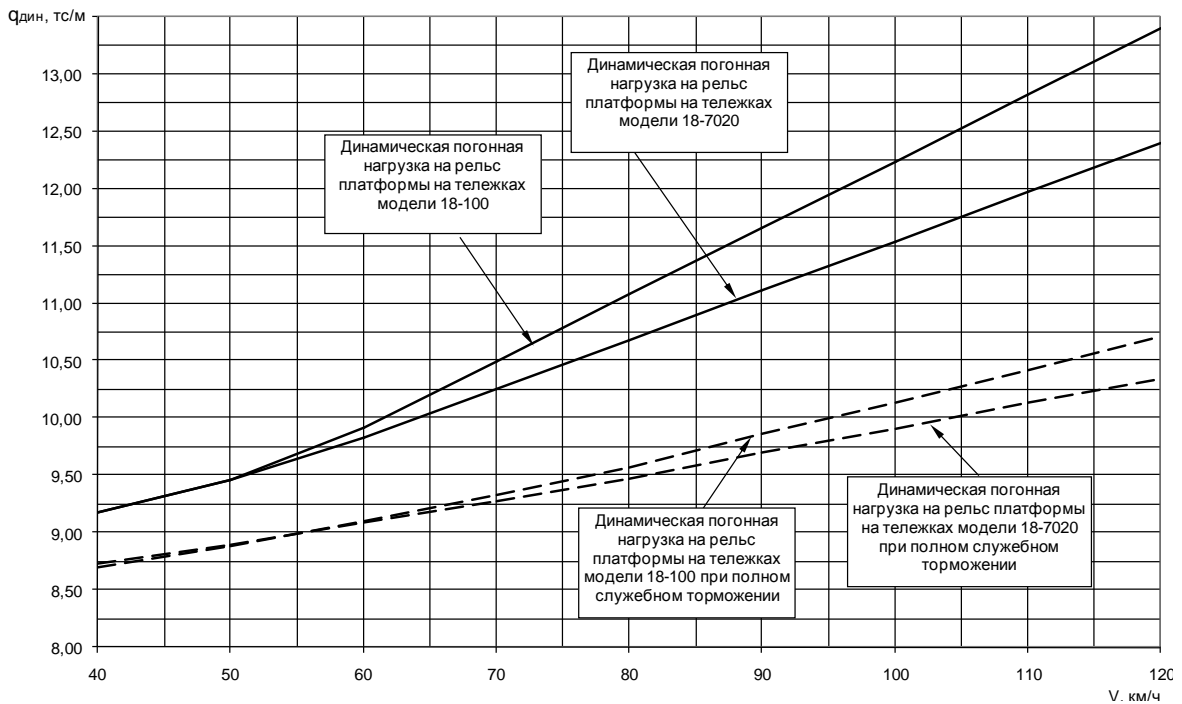


Рис. 9. Средние динамические погонные нагрузки на путь при торможении

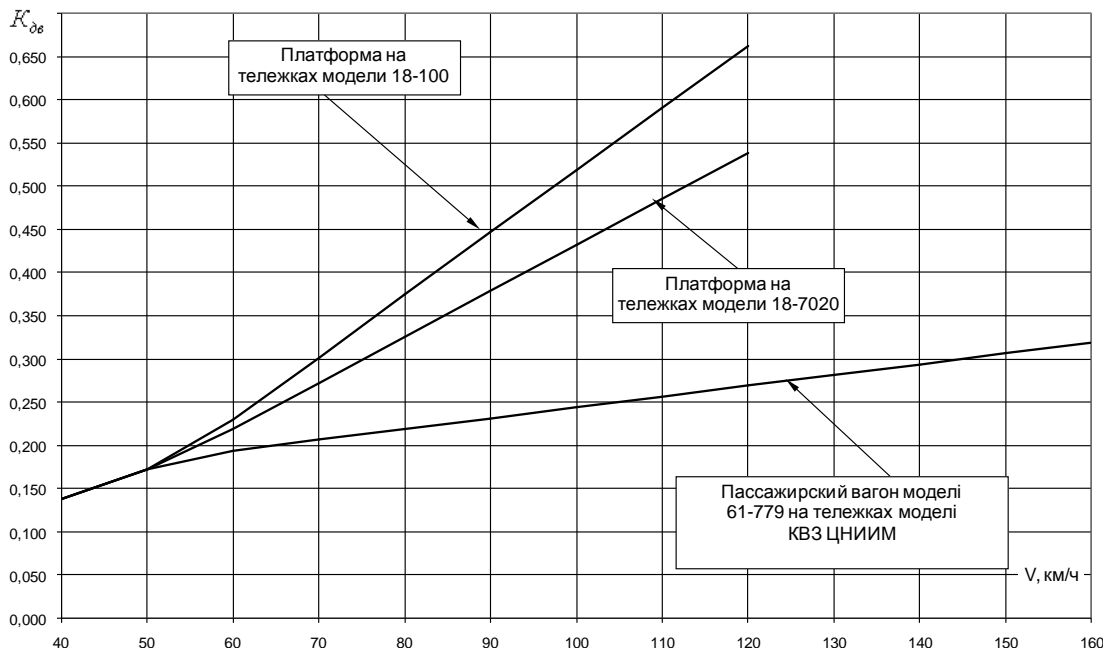
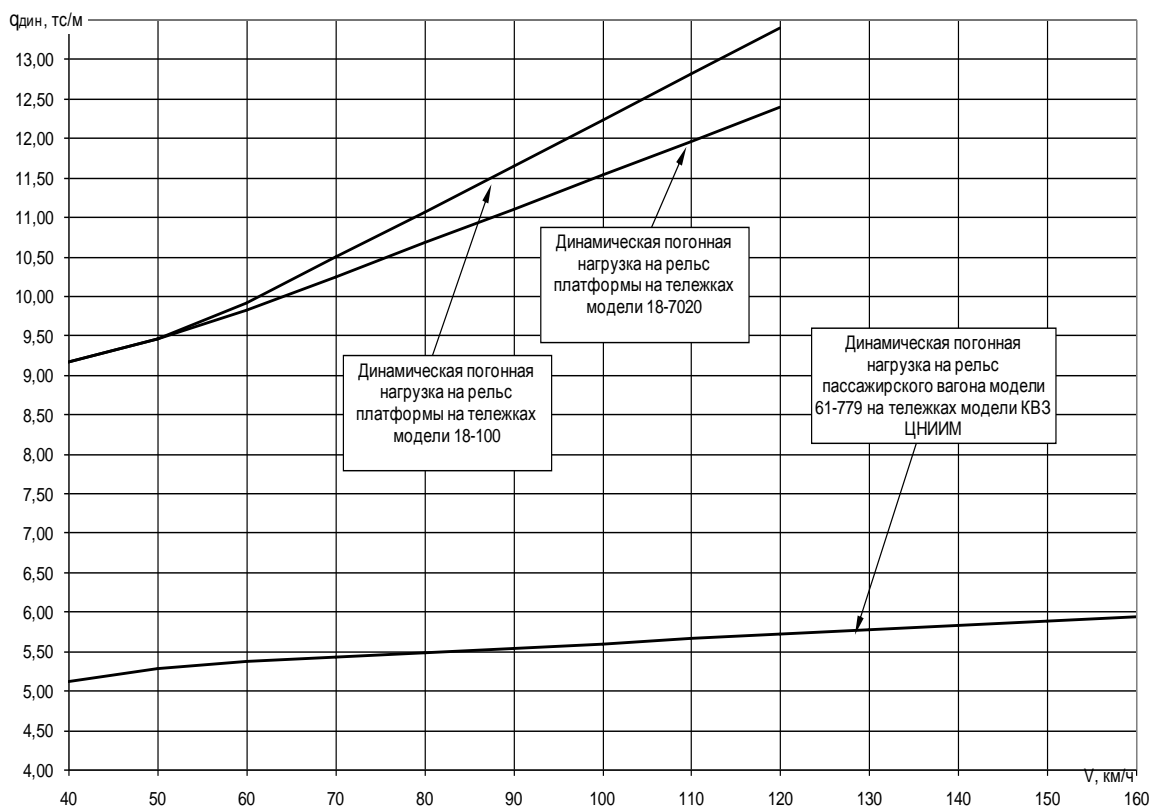


Рис. 10. Коэффициенты вертикальной динамики необрессоренных частей тележки

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД



**Рис.11. Середня динамічна погонна навантаження на рейку**

Оцінка впливу на рейку по інтервалам швидкостей руху  $A_{дин}(V_i)$  в допустимому діапазоні вироблялась за формулами:

$$A_{дин}(V_i) = q_{дин}(V_i) \cdot P(V_i), \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n A_{дин}(V_i) = \sum_{i=1}^n q_{дин}(V_i) \cdot P(V_i), \quad (13)$$

де  $A_{дин}(V_i)$  - динамічне вплив на рейку з урахуванням ймовірності руху поїзда зі швидкістю  $V_i$ ;

$q_{дин}(V_i)$  - динамічне вплив на рейку при швидкості  $V_i$ ;

$P(V_i)$  - ймовірність руху поїзда зі швидкістю  $V_i$  (рис. 12).

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

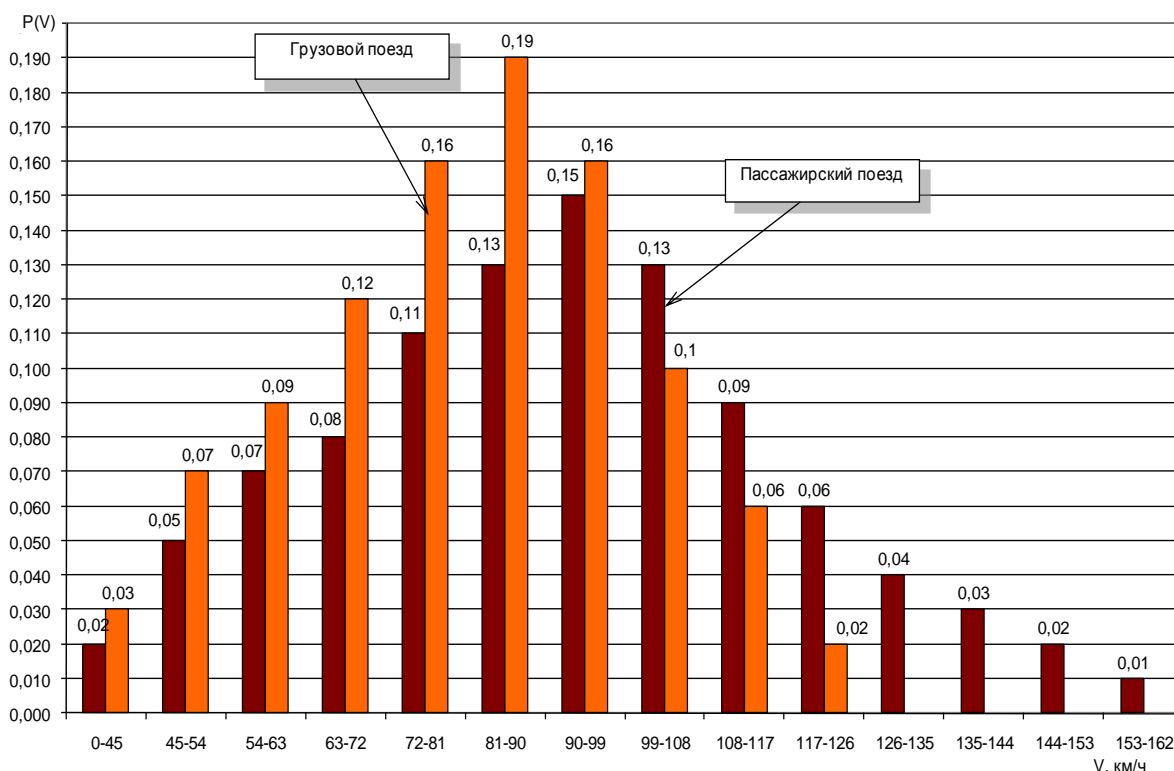


Рис. 12. Вероятность движения поезда в заданных диапазонах скоростей

Результаты расчета по формуле 13 представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Динамическое воздействие на путь по интервалам скоростей движения (платформа на тележках модели 18-100)

Диапазон скорости движения, км/ч	Вероятность [2], $P(V_i)$	В движении		При торможении	
		$q_{дин}(V_i)$	$A_{дин}(V_i)$	$q_{дин}(V_i)$	$A_{дин}(V_i)$
0-45	0,03	16,13	0,48	8,07	0,24
45-54	0,07	16,83	1,18	8,41	0,59
54-63	0,09	17,67	1,59	8,84	0,80
63-72	0,12	18,61	2,23	9,32	1,12
72-81	0,16	19,56	3,13	9,80	1,57
81-90	0,19	20,50	3,90	10,29	1,95
90-99	0,16	20,50	3,28	10,29	1,65
99-108	0,1	21,45	2,15	10,77	1,08
108-117	0,06	22,40	1,34	11,25	0,68
117-126	0,02	23,34	0,47	11,73	0,23
Итого			19,75		9,90

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

*Таблица 4. Динамическое воздействие на путь по интервалам скоростей движения (платформа на тележках модели 18-7020)*

Диапазон скорости движения, км/ч	Вероятность [2], $P(V_i)$	В движении		При торможении	
		$q_{дин}(V_i)$	$A_{дин}(V_i)$	$q_{дин}(V_i)$	$A_{дин}(V_i)$
0-45	0,03	16,13	0,48	8,06615	0,24
45-54	0,07	16,83	1,18	8,413045	0,59
54-63	0,09	17,52	1,58	8,765396	0,79
63-72	0,12	18,22	2,19	9,121377	1,09
72-81	0,16	18,92	3,03	9,477355	1,52
81-90	0,19	19,62	3,73	9,833333	1,87
90-99	0,16	19,62	3,25	9,833333	1,63
99-108	0,1	20,32	2,10	10,1893	1,05
108-117	0,06	21,01	1,30	10,54527	0,65
117-126	0,02	21,71	0,00	10,90123	0,22
Итого			18,83		9,66

*Таблица 5. Динамическое воздействие на путь по интервалам скоростей движения (пассажирский вагон модели 61-779)*

Диапазон скорости движения, км/ч	Вероятность [2], $P(V_i)$	В движении	
		$q_{дин}(V_i)$	$A_{дин}(V_i)$
0-45	0,02	10,87	0,22
45-54	0,05	11,34	0,57
54-63	0,07	11,59	0,81
63-72	0,08	12,50	1,00
72-81	0,11	11,82	1,30
81-90	0,13	11,93	1,55
90-99	0,15	11,93	1,79
99-108	0,13	12,04	1,57
108-117	0,09	12,15	1,09

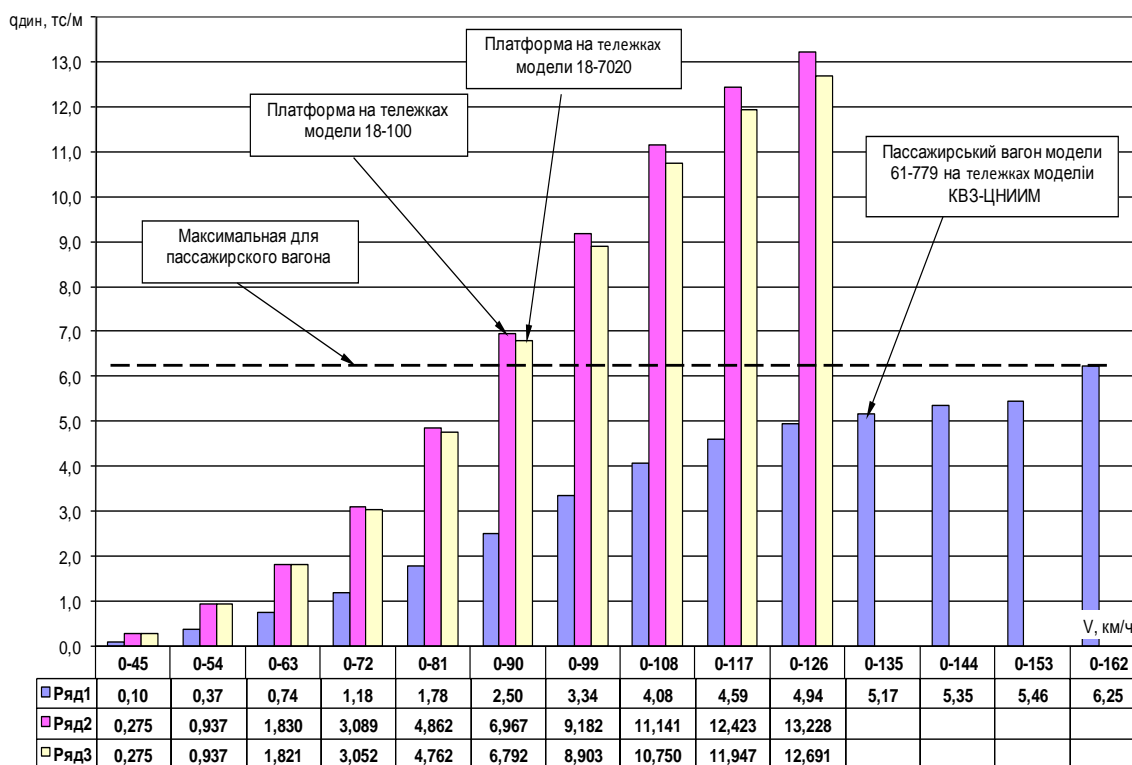
## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Конец таблицы 5

117-126	0,06	12,27	0,74
126-135	0,04	12,38	0,50
135-144	0,03	12,49	0,37
144-153	0,02	12,60	0,25
153-162	0,01	12,71	0,13
Итого			11,88

Величина динамической погонной нагрузки на путь по скоростям движения представлена на рис. 13.

Выполненные расчеты показывают (рис. 13), что допустимая скорость грузового поезда, по эквивалентному воздействию на путь пассажирского в диапазоне скоростей (0-160) км/ч, может быть принята на тележках 18-100 не более 80 км/ч, на тележках 18-7020 – не более 85 км/ч.



**Рис. 13. Величина динамической погонной нагрузки на путь**

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

---

### **Выводы.**

1. Наибольшее воздействие на путь оказывает платформа для контейнеров на тележках модели 18-100 по сравнению с тележками модели 18-7020.
2. При торможении воздействие на путь в два и более раз меньше по сравнению с воздействием при движении.
3. Величина динамической погонной нагрузки для грузового поезда для скоростей не более 90 км/ч на тележках модели 18-100 и на тележках модели 18-7020 будет соответствовать величине динамической погонной нагрузки пассажирского поезда на тележках модели КВЗ-ЦНИИМ на скорости 160 км/ч.

### **Рекомендации.**

- ✓ Скорость грузовых поездов для перевозки контейнеров при движении по железнодорожному пути для скоростного пассажирского движения должна быть ограничена до 80 км/ч на тележках модели 18-100 и 85 км/ч на тележках модели 18-7020;
- ✓ Одним из факторов уменьшения воздействия на путь платформ может стать: применение надбуксового подрессоривания боковины тележки или использование специальной тележки по типу пассажирской с билинейной характеристикой рессорного подвешивания.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 В.М. Казаринов, В.Г. Иноземцев, В.Ф. Ясенцев. Теоретические основы проектирования и эксплуатации автотормозов, Из-во , «Транспорт», 1968 г. – 400 с.
- 2 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных), ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996 г.– 319 с.
- 3 Протокол № 530 от 20 сентября 2005 г. предварительных поездных испытаний вагона для перевозки контейнеров модели 13-7024, ВЦ ПВ УкрНИИВ.