

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра стационарных и транспортных машин

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ КАРЬЕРНОМ ТРАНСПОРТЕ**

Методические указания к курсовому и дипломному проектированию  
по дисциплине «Транспортные машины» для студентов  
специальности 150402 «Горные машины и оборудование»

Составитель А. Ю. Захаров

Утверждены на заседании кафедры  
Протокол № 6 от 25.12.2012

Рекомендованы к печати  
учебно-методической комиссией  
специальности 150402  
Протокол № 8 от 15.01.2013

Электронная копия находится  
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2013

## 1. ВВЕДЕНИЕ

На карьерном железнодорожном транспорте применяются следующие способы торможения подвижного состава:

- фрикционное торможение, осуществляемое с использованием силы трения, возникающей при воздействии тормозных колодок на колеса или рельс (фрикционные тормоза по способу управления разделяются на пневматические, электропневматические, электромагнитные);

- электрическое (электродинамическое) торможение, осуществляемое переводом тяговых двигателей электровозов на работу в генераторном режиме. При этом различают рекуперативное торможение с возвращением вырабатываемой энергии в контактную сеть и электродинамическое – с поглощением тепла в окружающую среду.

Основным видом торможения поездов на карьерах является фрикционное, осуществляемое прижатием тормозных колодок к колесам локомотива и вагонов.

Тормозной путь поезда зависит от многих параметров системы «поезд – рельсовый путь»: начальной скорости движения поезда, вида локомотива, вида и количества вагонов в составе, вида торможения (фрикционное, электрическое), вида тормозных колодок (чугунные, композиционные) и их количества, уклона рельсового пути и т.д. Влияние этих параметров на тормозной путь поезда рассматривается ниже.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Тормозные средства поезда должны обеспечивать его движение и остановку на длине тормозного пути  $L$  в зависимости от начальной скорости движения  $V$  (рис. 1). Кривая, изображённая сплошной линией на рис. 1, имеет нелинейный характер и называется тормозной характеристикой поезда.

Полный тормозной путь поезда включает в себя подготовительный и действительный тормозные пути:

$$L = L_n + L_{\partial}, \quad (1)$$

где  $L_n$  – подготовительный путь торможения, проходимый поездом за время  $t_n$ , которое складывается из времени реакции машиниста локо-

мотива и времени приведения тормозов в действие;  $L_{\partial}$  – действительный тормозной путь (торможение при непосредственном взаимодействии тормозных колодок с колесами).

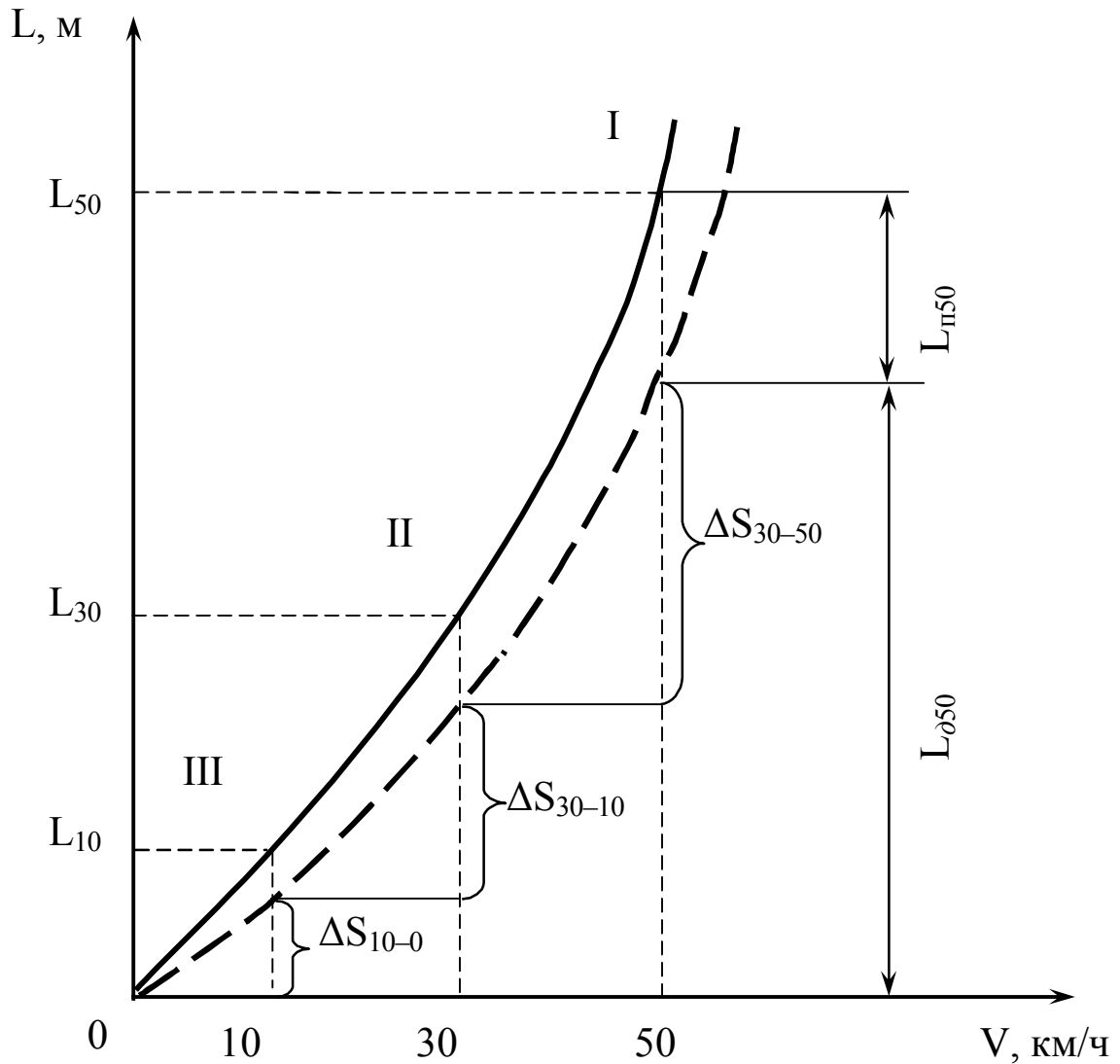


Рис. 1. Тормозная характеристика поезда при экстренном торможении

На железных дорогах подготовительный путь торможения принято определять по формулам:

при уклонах  $i \leq 20 \text{ ‰}$

$$L_n = \frac{1000V_n t_n}{3600}, \text{ м}; \quad (2)$$

при уклонах  $i > 20 \text{ ‰}$

$$L_n = \frac{1000V_n t_n}{3600} + 4,62 \cdot 10^{-4} (g i - w_o) t_n^2, \text{ м}, \quad (3)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $w_o$  – основное удельное сопротивление движению поезда, Н/т;  $V_n$  – начальная скорость движения.

Время подготовки  $t_n$  в зависимости от способа управления тормозами принимается равным 4-5 с при пневматическом приводе и 0,5 с – при электрическом приводе.

В процессе экстренного торможения скорость движения поезда изменяется от начальной до нуля. Для того чтобы учесть влияние скорости на величину удельного сопротивления движению и величину коэффициента трения тормозной колодки о колесо, начальная скорость движения поезда разбивается на интервалы и в каждом интервале определяется действительный тормозной путь  $L_\partial$  по среднему значению скорости в соответствующем интервале.

Таким образом:

$$L_\partial = \Delta S_{1-2} + \Delta S_{2-3} + \dots \Delta S_{n-1-n}, \quad (4)$$

причём точность расчётов будет тем выше, чем больше будет взято число интервалов скоростей в пределах от начальной  $V_n$  до нулевой. В качестве примера на рис. 1 начальная скорость поезда перед торможением принята равной 50 км/ч с разбиением её на три интервала (50-30; 30-10; 10-0). В основу определения действительных тормозных путей  $\Delta S_i$  в принятых интервалах скоростей положены следующие теоретические предпосылки.

Как известно из курса теоретической механики основное уравнение динамики для несвободной материальной точки имеет вид:

$$m a = \sum_{i=1}^n F_i,$$

где  $m$  и  $a$  – соответственно, масса и ускорение материальной точки;  $\sum_{i=1}^n F_i$  – векторная сумма всех действующих на материальную точку сил.

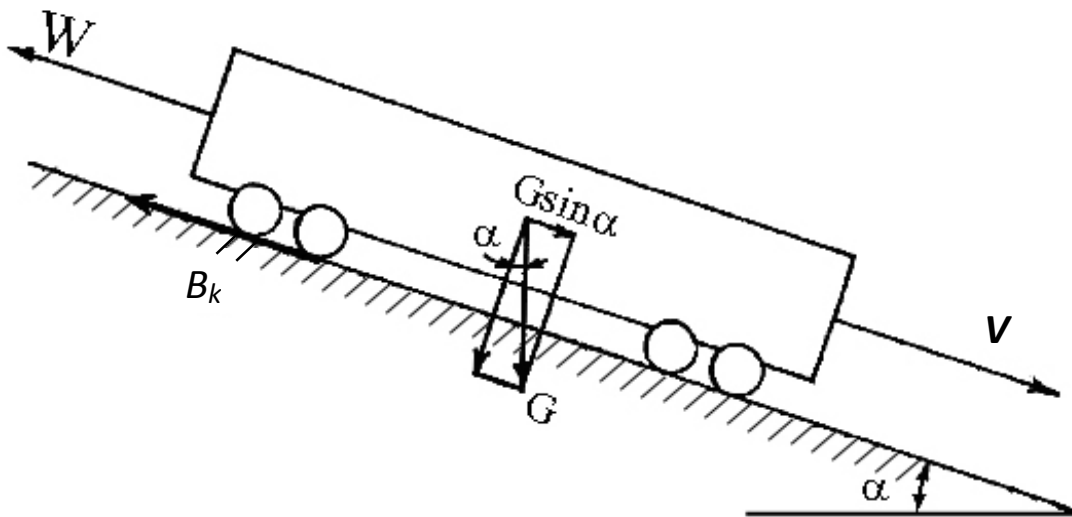
Для получения уравнения движения поезда примем допущение о том, что большинство его точек движется поступательно, а вращение

некоторых элементов совершающих плоскопараллельное движение (колёса поезда и вагонов, роторы электродвигателей, отдельные узлы в трансмиссиях и т.д.) учтём коэффициентом приведения  $k_{пр}$ . Тогда по теореме о поступательном движении твёрдого тела все точки поезда будут двигаться по одинаковым, совпадающим при наложении траекториям и иметь в данный момент времени равные скорости и ускорения. Следовательно, уравнение движения несвободной механической системы (поезда) будет таким же, как и уравнение движения одной несвободной точки, за исключением точек, находящихся в элементах, совершающих плоскопараллельное движение. Повышенный запас кинетической энергии этих элементов (за счёт вращательного движения) будет учитываться коэффициентом  $k_{пр}$ .

Спроецировав основное уравнение динамики на направление движения поезда (рис. 2), получим

$$ma = \pm G \sin \alpha + W_o + B_k, \quad (5)$$

где  $\pm G \sin \alpha$ ,  $W_o$ ,  $B_k$  – соответственно составляющая веса поезда (скапывающая сила), сила основного сопротивления движению, тормозное усилие, кН.



я

движения поезда

Ускорение  $a$ , массу  $m$  и элементарный путь  $dS$  можно записать в виде:

$$a = \frac{dV}{dt}; \quad m = 1000(1 + \kappa_{np})(P + Q); \quad dS = Vdt,$$

где  $P$  и  $Q$  – массы локомотива и прицепной части состава, т;  $(1 + \kappa_{np})$  – коэффициент приведения, учитывающий инерцию вращающихся масс, равный 1,2-1,3 – для тяговых агрегатов, 1,03-1,05 – для груженных вагонов, 1,08 – для эксплуатационных расчётов.

После подстановки этих равенств в (5) и небольших преобразований получим

$$dS = \frac{1000(1 + \kappa_{np})VdV}{G \cdot \sin \infty} + \frac{W_o}{P + Q} + \frac{B_k}{P + Q},$$

или в удельной форме

$$dS = \frac{VdV}{C(\pm gi + w_o + b)}, \quad (6)$$

где  $C = 1/1000(1 + \kappa_{np})$  – инерционный параметр;  $I = 1000 \operatorname{tg} \alpha \approx 1000 \sin \infty$  – уклон в промилях, так как угол при локомотивной тяге не превышает  $4^\circ$ . Поэтому можно допустить  $\sin \infty \approx \operatorname{tg} \infty$ ;  $w_o = W_o/(P + Q)$  – удельная сила сопротивления на 1 т состава, Н/т;  $b = B_k/(P + Q)$  – удельная тормозная сила на 1 т состава, Н/т.

После интегрирования равенства (6) в соответствующих пределах найдём действительный тормозной путь на рассматриваемом интервале скоростей

$$\Delta S_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{VdV}{C(\pm gi + w_o + b)} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2(\pm gi + w_o + b)}.$$

Считая за начальную скорость  $V_n = V_2$ , а за конечную  $V_k = V_1$ , получим

$$\Delta S_{1-2} = \frac{1000(1 + \kappa_{np})(V_n^2 - V_k^2)}{2 \cdot 3,6(\pm gi + w_o + b)}.$$

Окончательно

$$\Delta S = L_{\partial} = \frac{41,6(V_{\kappa}^2 - V_{\text{н}}^2)}{\pm gi + w_o + b}. \quad (7)$$

Тогда действительный тормозной путь (рис. 1) при начальной скорости движения поезда 50 км/ч согласно (4) будет равен

$$L_{\partial 50} = \Delta S_{50-30} + \Delta S_{30-10} + \Delta S_{10-0}, \quad (7a)$$

а полный тормозной путь по (1)

$$L_{50} = L_{n 50} + L_{\partial 50}. \quad (8)$$

Величина  $L_{50}$  соответствует ординате точки I на рис. 1. Для нахождения каждой последующей точки (II, III) тормозной характеристики поезда весь расчёт необходимо повторить заново при соответствующих начальных скоростях поезда. Тормозные пути поезда при начальных скоростях его движения 30 и 10 км/ч найдём по формулам.

$$L_{30} = L_{n 30} + L_{\partial 30} \quad (9)$$

и

$$L_{10} = L_{n 10} + L_{\partial 10}, \quad (10)$$

где  $L_{\partial 30} = \Delta S_{30-10} + \Delta S_{10-0}$ ;  $L_{\partial 10} = \Delta S_{10-0}$ .

Теперь рассмотрим более подробно величины  $w_o$  и  $b$ , входящие в формулу (5).

Основное удельное сопротивление движению у локомотива и вагонов различно, поэтому в расчётах берётся их средневзвешенное значение

$$w_o = \frac{w'_o \cdot P + w''_o \cdot Q}{P + Q}, \quad (11)$$

где  $w'_o$  и  $w''_o$  – удельные сопротивления движению локомотива и вагонов-думпкаргов, определяемые в функции от средней скорости движения поезда на рассматриваемом интервале торможения, Н/т:

для локомотива при движении под током

$$w'_o = 28 + 0,8V, \quad (12)$$

и без тока

$$w'_o = 36 + 0,9V; \quad (13)$$

для гружёных вагонов-думпкаргов четырехосных

$$w'_o = 31 + 0,2V, \quad (14)$$

шестиосных и восьмиосных на постоянных путях

$$w'_o = 36 + 0,4V. \quad (15)$$

Удельное тормозное усилие  $b$  пропорционально тормозной силе  $B_k$  и обратно пропорционально общей массе состава  $(P+Q)$ . Схема возникновения тормозной силы  $B_k$  показана на рис. 3.

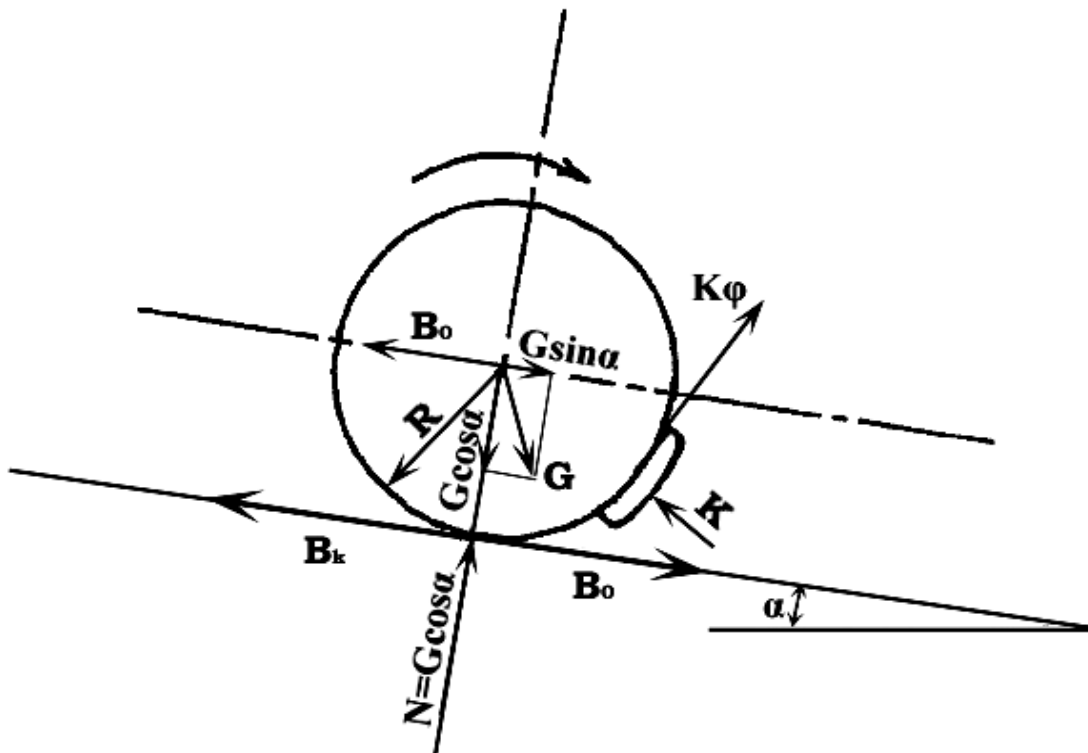


Рис. 3. Схема возникновения тормозной силы



При прижатии тормозной колодки к колесу с усилием  $\bar{K}$  возникает сила трения  $\bar{K}\varphi$  и реакция в оси колеса  $\bar{R}$ . Ничего не изменится, если пару сил  $(\bar{K}\varphi, \bar{R})$  заменить эквивалентной парой сил  $(\bar{B}_o, \bar{B}'_o)$  с тем же моментом и плечом, равным радиусу колеса. Тогда, согласно третьему закону Ньютона, в области взаимодействия колеса с рельсом возникает сила  $\bar{B}_k$  – внешняя по отношению к поезду, приложенная со стороны рельса и вызывающая торможение поезда. Заметим также, что модули сил в эквивалентных парах равны между собой

$$|\bar{K}\varphi| = |\bar{R}| = |\bar{B}_o| = |\bar{B}'_o| = |\bar{B}_k|,$$

так как равны их моменты и плечи.

Так как силы торможения тягового агрегата и думпкаров различны из-за различного прижатия колодок к колесу, исполнения колодок (чугунные, композиционные) и их количества, то за расчётное значение удельной тормозной силы принимается её средневзвешенная величина

$$b = \frac{\sum B_k}{P+Q} = \frac{1000(K_\varepsilon^\Sigma \varphi_\varepsilon + nK_\delta^\Sigma \varphi_\delta)}{P+Q}, \quad (16)$$

где  $K_\varepsilon^\Sigma$  – суммарное усилие нажатия тормозных колодок локомотива;  $K_\delta^\Sigma$  – суммарное усилие нажатия тормозных колодок думпкара;  $n$  – количество думпкаров в составе;  $\varphi_\varepsilon, \varphi_\delta$  – коэффициенты трения колодки о колесо, определяемые из эмпирических выражений:

для чугунных колодок

$$\varphi = 0,78 \frac{16K + 100g}{80K + 100g} \cdot \frac{100}{3,18V_{cp} + 100}, \quad (17)$$

для композиционных колодок

$$\varphi = 0,603 \frac{5K + 100g}{20K + 100g} \cdot \frac{100}{1,4V_{cp} + 100}; \quad (18)$$

где  $V_{cp}$  – средняя скорость движения поезда в рассматриваемом интервале скоростей, км/ч;  $K$  – усилие нажатия отдельной колодки.

Сила трения между колодкой и колесом не должна превышать силу трения между колесом и рельсом, так как в противном случае будет происходить скольжение колеса по рельсу. Условие, при котором скольжение колеса о рельс отсутствует, имеет вид:

для системы «одна тормозная колодка – колесо – рельс»

$$K\varphi \leq N\psi ,$$

для всего подвижного состава

$$\sum K_{\tilde{e}}^{\Sigma} \varphi_{\tilde{e}} + \sum K_{\partial}^{\Sigma} \varphi_{\partial} n \leq (P + Q)g\psi , \quad (19)$$

где  $\psi$  – коэффициент трения колеса о рельс в режиме торможения.

### 3. ПОРЯДОК РАСЧЁТА

1. Выбираем параметры поезда и железнодорожного пути в соответствии с вариантом задания (табл.1): массу локомотива  $P$  (т) (табл.3 приложения), массу вагона  $q_T$  (т) (табл.2 приложения), вид колодок (чугунные, композиционные) принимается в соответствии с табл. 1 приложения и по этой же таблице определяется усилие прижатия колодок к колёсам локомотива и думпкаров  $K$ ,  $K_{\tilde{e}}^{\Sigma}$ ,  $K_{\partial}^{\Sigma}$ .

2. Определяется прицепная масса поезда  $Q = q_T n$ ;

3. Разбиваем абсциссу  $V$  (рис. 1) на три интервала 50-30, 30-10, 10-0 км/ч при средней скорости в каждом интервале соответственно 40, 20 и 5 км/ч;

4. Задаем начальную скорость движения поезда 50 км/ч:

- по формуле (3) вычисляем подготовительный тормозной путь ( $w_o$  – определяем по формулам (11-15) при значении  $V=50$  км/ч).

- вычисляем действительный тормозной путь в интервале 50-30 км/ч:

- определяем  $w_o$  (11-15) и  $\varphi$  (17,18) при средней скорости движения в интервале 40 км/ч;

- вычисляем  $L_{\partial}$  по формуле (7);

- вычисляем действительный тормозной путь в интервале 30-10 км/ч:

- определяем  $w_o$  (11-15) и  $\varphi$  (17,18) при средней скорости движения в интервале 20 км/ч;
- вычисляем  $L_o$  по формуле (7);
- вычисляем действительный тормозной путь в интервале 10-0 км/ч
- определяем  $w_o$  (11-15) и  $\varphi$  (17,18) при средней скорости движения в интервале 5 км/ч;
- вычисляем  $L_o$  по формуле (7);
- вычисляем полный тормозной путь  $L_{50}$  при начальной скорости 50 км/ч (7а, 8) и наносим соответствующую точку в координаты тормозной характеристики (рис. 1);
- 5. Задаемся начальной скоростью движения поезда 30 км/ч:
  - по формуле (3) вычисляем подготовительный тормозной путь ( $w_o$  – определяем по формулам (11-15) при значении  $V=30$  км/ч);
  - вычисляем полный тормозной путь  $L_{30}$  при начальной скорости 30 км/ч (9) и наносим соответствующую точку в координаты тормозной характеристики (рис. 1);
- 6. Задаем начальную скорость движения поезда 10 км/ч:
  - по формуле (3) вычисляем подготовительный тормозной путь ( $w_o$  – определяем по формулам (11-15) при значении  $V=10$  км/ч);
  - вычисляем по формуле (9) полный тормозной путь  $L_{30}$  при начальной скорости 30 км/ч и наносим соответствующую точку в координаты тормозной характеристики (рис. 1);
- 7. Через полученные три точки из начала координат проводим плавную кривую.

Таблица 1

## Варианты задания по построению тормозной характеристики

Вариант	Число думпкаров	Уклон	Локомотив	Думпкар
1	5	50	ОПЭ-1(3-секц.)	ВС-60
2	6	40	ОПЭ-1(3-секц.)	ВС-85
3	7	30	ОПЭ-1(3-секц.)	ВС-105
4	8	20	ОПЭ-1(3-секц.)	ВС-136
5	9	10	ОПЭ-1(3-секц.)	ВС-180
6	8	35	ОПЭ-1(2-секц.)	ВС-60
7	7	25	ОПЭ-1(2-секц.)	ВС-85
8	6	15	ОПЭ-1(2-секц.)	ВС-105
9	6	5	ОПЭ-1(2-секц.)	ВС-136
10	8	0	ОПЭ-1(2-секц.)	ВС-180

11	9	30	ОПЭ-1А(3-секц.)	BC-60
12	10	25	ОПЭ-1А(3-секц.)	BC-85
13	11	20	ОПЭ-1А(3-секц.)	BC-105
14	8	15	ОПЭ-1А(3-секц.)	BC-136
15	11	10	ОПЭ-1А(3-секц.)	BC-180
16	7	40	ОПЭ-1А(2-секц.)	BC-60
17	8	35	ОПЭ-1А(2-секц.)	BC-85
18	9	30	ОПЭ-1А(2-секц.)	BC-105
19	10	25	ОПЭ-1А(2-секц.)	BC-136
20	11	20	ОПЭ-1А(2-секц.)	BC-180
21	5	15	EL - 1	BC-60
22	5	10	EL - 1	BC-85
23	5	20	EL - 1	BC-105
24	5	5	EL - 1	BC-136
25	4	0	EL - 1	BC-180

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1

Значения тормозных нажатий для различного подвижного состава

Подвижной состав	Действительные нажатия (Н) при давлении в тормозном цилиндре, МПа					
	0,4 (гружёный)		0,36		0,14 (порожний)	
	тормозной колодки	суммарное всех колодок	тормозной колодки	суммарное всех колодок	тормозной колодки	суммарное всех колодок
Электровоз EL-1	69	828	42	504	20	240
Тяговый агрегат ПЭ2М, ОПЭ2, ОПЭ1А, ОПЭ1Б, ПЭЗТ (три секции)	43/19	2064/912	26/12	1248/576	12/5	576/240
Тяговый агрегат ОПЭ1 (три секции)	50	2400	32	1536	15	720
Думпкары:						
6ВС-60	37/24	296/192	23/15	184/120	11/9	88/72
2ВС-85	35	420	22	264	11	132
2ВС-105	38/22	368/216	24/14	232/136	12/7	120/64
ВС-180	-/22	-/352	-/14	-/224	-/7	-/112

**Примечание:** Перед чертой приведены данные для чугуновых колодок, за чертой – для композиционных.

Таблица 2

## Технические характеристики думпкаров

Параметры	6ВС-60	ВС-85	2ВС-105	ВС-136	2ВС-180
1	2	3	4	5	6
Грузоподъемность, т	60	85	105	136	180
Объем кузова геометрический, м <sup>3</sup>	26,2	38	48,5	68	58,0
Масса тары вагона, т	29,0	35,0	48,0	67,5	68,0

## Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6
Коэффициент тары	0,484	0,41	0,45	0,5	0,38
Число осей	4	4	6	8	8
Нагрузка на ось, кН	218	294	250	249	304
Число разгрузочных цилиндров	4	4	6	8	8
Угол наклона кузова при разгрузке, градус	45	45	45	45	45

Таблица 3

Технические характеристики карьерных электровозов и тяговых агрегатов

Параметры	Электровоз пост. тока	Тяговые агрегаты постоянного тока		Тяговые агрегаты переменного тока			
		EL-1	ПЭ2М	ПЭ3Т	ОПЭ1	ОПЭ2	ОПЭ1А
1	2	3	4	5	6	7	8
Сцепная масса, т	150	368	372	360	372	372	372
Состав тягового агрегата	-	ЭУ+МД+ +МД	ЭУ+ДС+ +МД	ЭУ+ДС+ +МД	ЭУ+МД+ +МД	ЭУ+ДС+ +МД	ЭУ+ДС+ +МД
Осевая формула	$2_0+2_0+2_0$	$3(2_0-2_0)$	$3(2_0-2_0)$	$3(2_0-2_0)$	$3(2_0-2_0)$	$3(2_0-2_0)$	$3(2_0-2_0)$
Напряжение сети, В	1500	1,5/3,0	3,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Часовой режим: мощность, кВт	-	5460	5325	6480	5325	5325	5325
тяг. усилие, кН	-	694	662	810	662	662	662
Скорость, км/ч	30	28,9	29,5	30	29,5	29,5	29,5
Нагрузка на ось, кН	250	310	310	300	310	310	310

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8
Грузоподъемность моторного думпкара, т	-	44	44	45	44	44	44
Мощность дизеля автономного питания, кВт	-	-	1470	1470	-	1100	1470
Наименьший радиус кривой, м	50	80	80	80	80	80	80
Длина по осям автосцепок, мм	-	51306	51306	59900	51506	51306	51306

Примечание: ЭУ – электровоз управления; ДС – дизельная секция, МД – моторный думпкара.

### СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудничный транспорт и механизация вспомогательных работ : каталог-справочник / под ред. В. М. Щадова. – М.: Горная книга, 2010. – 534 с.

2. Захаров, А. Ю. Основы расчета карьерного транспорта : учеб. пособие по курсу «Транспортные машины» / А. Ю. Захаров. – КузГТУ. – Кемерово, 2012. – 110 с.

3. Галкин, В. И. Транспортные машины / В. И. Галкин, Е. Е. Шешко. – М.: Горная книга; Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2010. – 578 с.

Составитель

Александр Юрьевич Захаров

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ КАРЬЕРНОМ ТРАНСПОРТЕ**

Методические указания к курсовому и дипломному проектированию  
по дисциплине «Транспортные машины» для студентов  
специальности 150402 «Горные машины и оборудование»

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 30.01.2013. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Уч.-изд. 0,8 л. Тираж 36 экз. Заказ

КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Типография КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.