

В.А. Сергеенко

Белорусский национальный технический университет

Просчитывается процесс торможения автопоезда с выключенным сцеплением, движущегося прямолинейно по горизонтальной дороге с твердым покрытием, путем полного нажатия на тормозную педаль.

В качестве основных моделей приняты двухосные тягачи с двухосным прицепом и с одноосным полуприцепом. При наличии у транспортных звеньев автопоезда большего числа мостов, его расчетную схему необходимо привести к осевой схеме одной из основных моделей, $1 \times 1 + 1 \times 1$ либо $1 \times 1 + 1$.

Схемы сил, действующих при торможении на прицепной и седельный автопоезда, представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

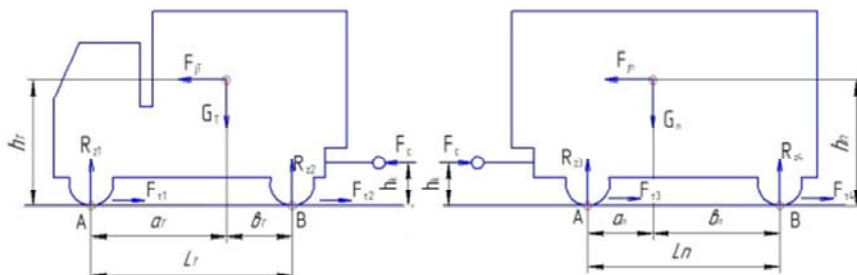


Рис. 1. Схема сил, действующих при торможении на прицепной автопоезд

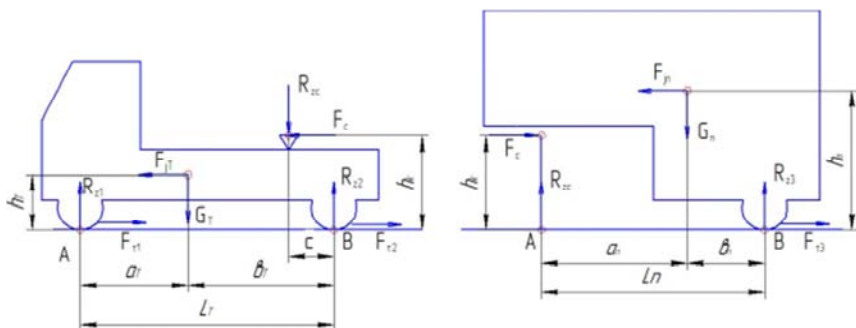


Рис. 2. Схема сил, действующих при торможении на седельный автопоезд

Уравнение движения автопоезда при торможении имеет вид

$$F_j = F_\tau + F_f + F_b \pm F_i, \quad (1)$$

где F_j – сила инерции поступательно движущихся и вращающихся масс автопоезда, F_τ – тормозная сила автопоезда, F_f – сила сопротивления качению колес, F_b – сила сопротивления воздуха, F_i – сила сопротивления подъему.

Сила инерции автопоезда $F_j = m_{\text{ап}} \cdot a_\tau \cdot \delta_{\text{ап}}$, где $m_{\text{ап}}$ – масса автопоезда, a_τ – замедление автопоезда, $\delta_{\text{ап}}$ – коэффициент учета вращающихся масс. При принятых выше условиях, $\delta_{\text{ап}} \approx 1$, $F_i = 0$, $(F_f, F_b) \ll F_\tau$ и выражение (1) приводится к виду

$$a_\tau = F_\tau / m_{\text{ап}}. \quad (2)$$

Тормозная сила автопоезда равна сумме тормозных сил мостов:

$$F_\tau = \sum_{i=1}^n F_{\tau i}, \quad (3)$$

где n – число мостов автопоезда.

При торможении без блокировки колес тормозные силы мостов автопоезда пропорциональны тормозным моментам и могут быть найдены по выражению: $F_{\tau i} = 2M_{\tau i} / r_0$, где $M_{\tau i}$ – момент, развиваемый одним тормозным механизмом i -того моста, r_0 – радиус качения без скольжения колес автопоезда.

Характерной особенностью процесса торможения автопоезда является неодновременность срабатывания тормозных механизмов различных мостов. Это оказывает влияние на распределение тормозных сил между мостами, усилие в сцепке и характер нарастания замедления.

На рис. 3 приведена динамическая характеристика тормозного привода прицепного автопоезда, представляющая изменение по времени давления в тормозных камерах при резком нажатии на тормозную педаль. За начало торможения принят момент, соответствующий началу нажатия на тормозную педаль. Из характеристики видно, что наиболее быстро начинает расти давление в тормозных камерах переднего моста, как наиболее близко расположенных к тормозному крану (кривая 1), затем – в задних тормозных камерах тягача (кривая 2) и тормозных камерах прицепа (кривые 3 и 4).

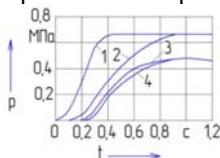


Рис. 3. Динамическая характеристика тормозного привода

Динамические характеристики тормозного привода при давлениях больше $0,1p_{\text{max}}$ аппроксимируются экспоненциальной зависимостью. При этом тормозной момент, развиваемый одним тормозными механизмами i -того моста, может быть записан выражением

$$M_{\tau i} = \alpha_i [p_{\text{max} i} (1 - 0,9e^{-k_i(t-t_{\text{з}} i)}) - \Delta p_i],$$

где α_i - константа, зависящая от типа и размерности тормозного механизма, $p_{\max i}$ - максимальное давление в тормозной камере, Δp_i - давление, необходимое для приведение в действие тормозного механизма и соответствующее появлению тормозного момента (обычно принимается равным $0,1 p_{\max i}$), t - текущая координата времени с момента нажатия на тормозную педаль, $t_{3 i}$ - время запаздывания тормозного привода моста (промежуток времени от момента нажатия на тормозную педаль до достижения давления Δp_i в тормозной камере), k_i - константа, определяющая выпуклость расчетной кривой $p_i = f(t)$ и, следовательно, скорость нарастания давления в тормозной камере.

Определить значение k можно по динамической характеристике тормозного привода (рис. 4). Допустим, известны значения времени τ_0 и τ_1 , при которых давление в тормозной камере рассматриваемого моста достигает значений p_0 и p_1 соответственно. Тогда константа k для расчетной кривой, показанной штриховой линией, может быть определена по формуле

$$k = [\ln(1 - p_0/p_{\max}) - \ln(1 - p_1/p_{\max})]/(\tau_1 - \tau_0), \quad (4)$$

где τ_0 и τ_1 - условное время, в течение которого давление в тормозных камерах нарастало бы до значений p_0 и p_1 соответственно, если бы оно изменялось по экспоненциальной зависимости.

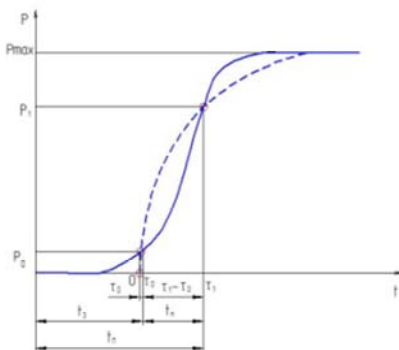


Рис. 4. Соотношение расчётной кривой и кривой реального процесса при аппроксимации динамической характеристики по экспоненциальной зависимости

Если p_0 принято равным Δp , то условное время τ_0 соответствует координате $t = t_3$ реального процесса, а текущие значения времени t и τ на отрезке $\tau = [\tau_0, \tau_1]$ связаны между собой соотношением $t = t_3 + \tau - \tau_0$, откуда $\tau = t - t_3 + \tau_0$.

Выбор точки τ_1 определяет величину отношения p_1/p_{\max} и влияет на качество аппроксимации: чем больше значение p_1/p_{\max} , тем, очевидно, ближе τ_1 к точке достижения установившегося значения тормозного момента,

однако больше расхождение расчетной кривой и кривой реального процесса на участке $\tau_0-\tau_1$ (рисунок 4).

Точку τ_1 удобно выбирать таким образом, чтобы знаменатель $\tau_1-\tau_0$ в формуле (4) был близок к значению времени t_n нарастания тормозного момента моста.

Теоретически t_n тормозного момента моста равно промежутку времени от появления M_τ до достижения его установившегося значения, что соответствует изменению давления в тормозной камере от Δp до установившегося значения давления, обычно, p_{\max} .

На практике, однако, затруднительно определить точно момент достижения установившегося значения M_τ моста. Поэтому условились считать временем t_n тормозного момента моста промежуток, соответствующий изменению давления в тормозной камере от Δp до $0,75p_{\max}$.

При $p_0/p_{\max}=0,1$ и $p_1/p_{\max}=0,75$ значение константы k_i для i -того моста автопоезда может быть рассчитано по формуле:

$$k_i = (\ln 0,9 - \ln 0,25) / (\tau_1 - \tau_0) = 1.28 / t_{ni},$$

где t_{ni} — время нарастания тормозного момента моста.

Значения t_{ni} и t_{si} для каждого моста определяются по динамической характеристике тормозного привода.

Константа α_i является коэффициентом пропорциональности тормозного механизма. При правильно рассчитанном тормозном приводе значение α_i таково, что при достижении в тормозных камерах давления p_{\max} на колесах моста создается максимальная по условиям сцепления колес с дорогой тормозная сила.

Это возможно при соблюдении равенства:

$$\varphi \cdot R_{zi} = 2 \cdot \alpha_i \cdot p_{\max i} - \Delta p_i / r_0,$$

откуда

$$\alpha_i = 0,5 \cdot \varphi \cdot R_{zi} \cdot r_0 / (p_{\max i} - \Delta p_i).$$

Так, в частности, при $\varphi = 0,7$ и $\Delta p_i = 0,1p_{\max i}$, константа

$$\alpha_i = 0,389 \cdot R_{zi} \cdot r_0 / p_{\max i},$$

где размерности переменных: $[R_{zi}] = \text{Н}$, $[r_0] = \text{м}$ и $[p_{\max i}] = \text{МПа}$.

В общем виде тормозная сила i -того моста автопоезда $F_{\tau i}$ может быть определена следующим образом.

При $t \leq t_{si}$ тормозная сила $F_{\tau i} = 0$.

При $t_{si} < t < t_{si} + t_{ni}$ и отсутствии блокировки колес тормозная сила

$$F_{\tau i} = 2 \alpha_i [p_{\max i} (1 - 0,9e^{-k_i(t-t_{si})}) - \Delta p_i] / r_0. \quad (5)$$

При $F_{\tau i} > \varphi R_{zi}$ происходит блокировка колес, тормозная сила принимается

$$F_{\tau i}^\varphi = \varphi \cdot R_{zi}. \quad (6)$$

Нормальные реакции дороги R_{zi} , действующие на мосты автопоезда при торможении, находятся из уравнений моментов сил относительно точек А и В тягача и прицепа.

Для прицепного автопоезда

$$R_{z1} = \frac{1}{L_T} (g \cdot m_T \cdot b_T + a_T \cdot m_T \cdot h_T + F_c \cdot h_k), \quad (7)$$

$$R_{z2} = \frac{1}{L_T} (g \cdot m_T \cdot a_T - a_T \cdot m_T \cdot h_T - F_c \cdot h_k), \quad (8)$$

$$R_{z3} = \frac{1}{L_T} (g \cdot m_{п} \cdot b_{п} + a_T \cdot m_{п} \cdot h_{п} - F_c \cdot h_k), \quad (9)$$

$$R_{z4} = \frac{1}{L_T} (g \cdot m_{п} \cdot a_{п} - a_T \cdot m_{п} \cdot h_{п} + F_c \cdot h_k), \quad (10)$$

где g – ускорение свободного падения, m_T , L_T , a_T , b_T , h_T , $m_{п}$, $L_{п}$, $a_{п}$, $b_{п}$, $h_{п}$ – масса, база и координаты центра масс тягача и прицепа, F_c , h_k – усилие в сцепке автопоезда и высота его приложения.

Для седельного автопоезда

$$R_{z1} = \frac{1}{L_T} (g \cdot m_T \cdot b_T + a_T \cdot m_T \cdot h_T + F_c \cdot h_k + R_{zc} \cdot c), \quad (11)$$

$$R_{z2} = \frac{1}{L_T} (g \cdot m_T \cdot a_T - a_T \cdot m_T \cdot h_T - F_c \cdot h_k + R_{zc} (L_T - c)), \quad (12)$$

$$R_{z3} = \frac{1}{L_{п}} (g \cdot m_{п} \cdot a_{п} - a_T \cdot m_{п} \cdot h_{п} + F_c \cdot h_k), \quad (13)$$

где $m_{п}$, $L_{п}$, $a_{п}$, $b_{п}$, $h_{п}$ – масса, база и координаты центра масс полуприцепа, R_{zc} , F_c , c и h_k – вертикальная и горизонтальная нагрузки, приходящиеся на седельно-сцепное устройство автопоезда и координаты точки их приложения.

Вертикальная нагрузка, действующая на седельно-сцепное устройство:

$$R_{zc} = \frac{1}{L_{п}} (g \cdot m_{п} \cdot b_{п} + a_T \cdot m_{п} \cdot h_{п} - F_c \cdot h_k + R_{zc} \cdot c).$$

Усилие F_c в случае как прицепного, так и седельного автопоезда может быть определено из уравнения баланса проекций сил на продольную ось тягача: $F_c = F_{\tau 1} + F_{\tau 2} - a_T \cdot m_T$.

Скорость автопоезда V_T и тормозной путь S_T в процессе торможения определяются выражениями: $V_T = V_0 - \int_0^t a_T \cdot dt$, $S_T = \int_0^t V_T \cdot dt$, где V_0 – начальная скорость торможения.

В расчете используются следующие исходные данные: $m_{ап}$, кг; m_T , кг; L_T , $L_{п}$, мм; b_T , h_T , $b_{п}$, $h_{п}$, мм; h_k , мм; c , мм – для седельного автопоезда; g_0 , мм; по каждому мосту – t_{3i} , $t_{пi}$, с, p_{maxi} , МПа, α_i ; φ ; V_0 , м/с.

Процесс просчитывается на трех этапах торможения.

Первый этап соответствует времени запаздывания тормозного привода автопоезда, т.е. $t_3 = \min[t_{3i} \ i = (1; n; 1)]$. Тормозные силы и усилие в сцепке равны нулю, автопоезд движется равномерно со скоростью V_0 и проходит путь $S_T = V_0 \cdot t_3$. Нормальные реакции дороги R_{zi} равны их значениям в статическом положении автопоезда.

Второй этап торможения соответствует времени нарастания замедления автопоезда $t_{п} = \max[(t_{3i} + t_{пi}) \ i = (1; n; 1)] - t_3$.

За это время последовательно срабатывают тормозные механизмы мостов и происходит нарастание тормозных моментов от нуля до достижения

ими установившихся значений. Процесс торможения на этапе просчитывается наиболее подробно – с интервалом $\Delta t = 0,1t_{\text{н}}$.

Для каждой текущей координаты t рассчитываются тормозные силы каждого моста $F_{\tau i}$ (5), тормозная сила автопоезда F_{τ} (3), замедление автопоезда a_{τ} (2), усилие в сцепке автопоезда $F_c = F_{\tau 1} + F_{\tau 2} - a_{\tau} \cdot m_{\tau}$, путь $\Delta S = (V_{\tau} - a_{\tau} \cdot \Delta t/2) \cdot \Delta t$, проходимый за время Δt , текущая координата пути $S_{\tau} = S_{\tau} + \Delta S$, текущая координата скорости $V_{\tau} = V_{\tau} - a_{\tau} \cdot \Delta t$.

Рассчитываются нормальные реакции дороги $R_{z i}$ на мосты автопоезда (7)–(13). Значения тормозных сил $F_{\tau i}$ проверяются на ограничение по условию сцепления колес с дорогой (6).

Третий этап торможения соответствует промежутку времени от $t > t_3 + t_{\text{н}}$ до остановки автопоезда. Здесь расчёт параметров выполняется по приведённым выше формулам с интервалом $\Delta t = 0,5$ с.

На печать выводятся исходные и информационные данные, тормозное время t_{τ} , с (T) и тормозной путь S_{τ} , м (ST). В скобках даны идентификаторы переменных.

Независимой переменной является время торможения t . Для каждой расчетной точки в табличной форме приводятся: номер точки N ; текущая координата времени t , с (T); замедление a_{τ} , м/с² (AT); скорость V_{τ} , м/с (VT), путь S_{τ} , м (ST); нормальные реакции дороги на мосты $R_{z i}$, Н (RZ); предельные тормозные силы по сцеплению $F_{\phi i}$, Н (FF); тормозные силы, создаваемые тормозными механизмами мостов $F_{p i}$, Н (FP); действительные тормозные силы мостов $F_{\tau i}$, Н (FT), $F_{\tau i} = \min(F_{\phi i}, F_{p i})$; тормозная сила автопоезда F_{τ} , Н (FTS); усилие в сцепке автопоезда F_c , Н; нагрузка на седло седельного автопоезда $R_{zс}$, Н (RZC).

Исходный код написан на алгоритмическом языке Fortran.

Пример вывода данных представлен в таблицах 1 и 2, на рис. 5 и 6 приведены графики, построенные по данным таблиц результатов расчета.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

K1 = 5.12 K2 = 3.46 K3 = 3.05 K4 = 2.67

ТАБЛИЦА 1

N	T С	FT1 Н	FT2 Н	FT3 Н	FT4 Н	FTS Н	AT Н/С2	FC Н	VT Н/С	ST М
0	0.00	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	0.	16.67	0.00
1	0.15	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	0.	16.67	2.50
2	0.27	16651.	0.	0.	0.	16651.	0.89	8637.	16.56	4.46
3	0.39	25752.	7957.	0.	0.	33709.	1.80	17405.	16.35	6.40
4	0.56	30726.	13970.	0.	0.	44703.	2.39	23188.	16.07	8.32
5	0.62	33444.	17980.	0.	0.	51424.	2.75	26575.	15.75	10.19
6	0.74	34929.	20541.	0.	0.	55571.	2.97	28026.	15.39	12.03
7	0.86	35741.	22411.	5751.	529.	64432.	3.45	27142.	14.99	13.82
8	0.98	35185.	23587.	14736.	7150.	81650.	4.37	20471.	14.47	15.56
9	1.09	36428.	24369.	21037.	11984.	93787.	5.02	15658.	13.88	17.23
10	1.21	38560.	24352.	25303.	15513.	101809.	5.44	12462.	13.24	18.83
11	1.63	36713.	24046.	33950.	21700.	116417.	6.22	6527.	10.13	24.68
12	2.33	36719.	24010.	35161.	21534.	117433.	6.27	6163.	6.99	28.96
13	2.03	36720.	24013.	35423.	21487.	117643.	6.29	6054.	3.05	31.67
14	3.35	36720.	24013.	35400.	21494.	117707.	6.29	6073.	0.71	32.81
15	3.44	36720.	24012.	35493.	21487.	117712.	6.29	6056.	0.00	32.85

ПОЛНОЕ ВРЕМЯ ТОРМОЖЕНИЯ T = 3.44 С
ПОЛНЫЙ ТОРМОЖНОЙ ПУТЬ ST = 32.85 М

ТАБЛИЦА 2

N	R21 Н	R22 Н	R23 Н	R24 Н	FF1 Н	FF2 Н	FF3 Н	FF4 Н	FP1 Н	FP2 Н	FP3 Н	FP4 Н
0	35316.	52974.	47579.	47579.	24721.	37082.	33305.	33305.	0.	0.	0.	0.
1	35316.	52974.	47579.	47579.	24721.	37082.	33305.	33305.	0.	0.	0.	0.
2	40139.	40151.	40154.	47003.	20097.	33706.	33708.	32902.	16651.	0.	0.	0.
3	45079.	43211.	40744.	46413.	31555.	30240.	34121.	32409.	25752.	7957.	0.	0.
4	40263.	40027.	49124.	46033.	33784.	20019.	34307.	32223.	30726.	13970.	0.	0.
5	50210.	30000.	49357.	45000.	35147.	26656.	34550.	32060.	33444.	17900.	0.	0.
6	51411.	36879.	49500.	45657.	35080.	25815.	34650.	31960.	34929.	20641.	0.	0.
7	52219.	36071.	51272.	43005.	36553.	25250.	35090.	30720.	35741.	22411.	5751.	529.
8	52030.	35452.	55509.	39648.	36907.	24816.	30056.	27754.	36100.	23507.	14736.	7150.
9	53242.	35040.	50520.	36637.	37269.	24534.	40964.	25646.	36400.	24369.	21607.	11904.
10	53501.	34709.	60510.	34647.	37451.	24352.	42357.	24253.	36500.	24009.	25303.	15513.
11	53939.	34351.	64157.	31000.	37757.	24040.	44910.	21700.	36713.	25790.	33930.	23220.
12	53970.	34312.	64394.	30763.	37705.	24010.	45076.	21534.	36719.	25090.	35161.	24572.
13	53906.	34304.	64461.	30696.	37790.	24013.	45172.	21407.	36720.	25916.	35423.	24920.
14	53906.	34304.	64451.	30706.	37790.	24013.	45116.	21494.	36720.	25919.	35000.	25022.
15	53907.	34303.	64461.	30696.	37791.	24012.	45123.	21407.	36720.	25920.	35493.	25047.

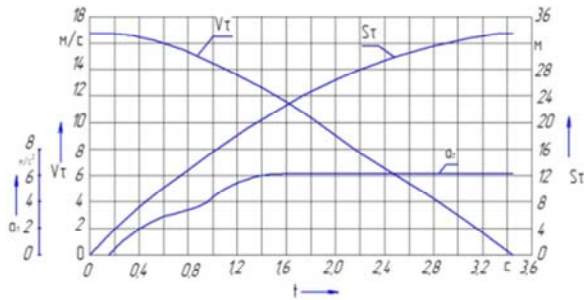


Рис. 5. Тормозная диаграмма.

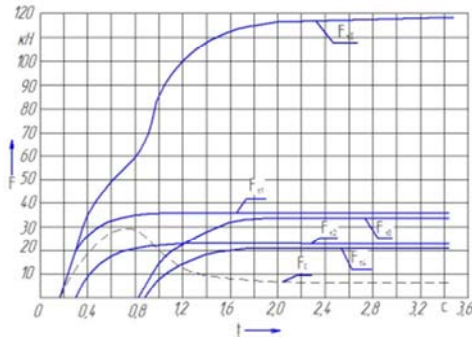


Рис. 6. Диаграмма тормозных сил и усилия в сцепке прицепного автопоезда

Литература: Автомобили: Специализированный подвижной состав/ М.С. Высоцкий [и др.] – Мн.: Выш. шк., 1989. – 240 с.