

А.Н. Коптовец, канд. тех. наук, А.В. Новицкий
(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

С.Ф. Шибалов, канд. тех. наук
(Украина, Донецк, ДонУГИ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОРМОЗНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШАХТНЫХ ПОЕЗДОВ

Объект исследования – тормозная система шахтных поездов, содержащая колодочно–колесные и рельсовые тормоза, размещенные на локомотиве и прицепной части поезда. Тормозные механизмы колесных тормозов (барабанные, дисковые, электродинамические) используют сцепные возможности колесных пар локомотива и ходовых колес вагонов. Рельсовые тормоза ограничений по сцеплению не имеют.

Предмет исследования–параметры эффективности тормозной системы шахтных поездов (тормозная сила, количество тормозных единиц поезда) и торможения (длина тормозного пути, допустимая скорость движения по условиям останова на нормируемом тормозном пути).

Цель – обосновать область применения локомотивной откатки в зависимости от тормозной эффективности шахтных поездов. Исследования выполнены аналитически на основе решения уравнений теории тяги поездов с использованием экспериментальных данных [1-3]. Принят следующий подвижной состав: электровоз К14, секционный поезд ПСМ 3,5, грузовая вагонетка ВДК 2,5, пассажирская вагонетка ВПГ 18. Полученные результаты позволяют сделать выводы, которые являются общими для всех типов подвижного состава шахт.

С 1973 г. в горной промышленности [4] расширена область применения локомотивной откатки на выработки с завышенным профилем рельсового пути (от 5 до 50%). При этом эффективность средств торможения шахтных поездов не возросла. Торможение осуществляется колодочным и электродинамическим тормозами локомотива. На серийных локомотивах рельсовые тормоза не нашли широкого применения, вагоны типоразмерного ряда тормозного оборудования не имеют. Тормозной механизм шахтных локомотивов за всю историю горного машиностроения модернизации не подвергался.

Согласно правилам безопасности [5, п. 4.1.3] при перевозке людей в пассажирских вагонетках по горизонтальным выработкам скорость движения не должна превышать 20 км/ч (5,6 м/с), а в оборудованных грузовых вагонетках – 12 км/ч (3,4 м/с). Максимальная скорость движения грузовых поездов правилами безопасности не нормируется. Конструкционная скорость современных отечественных электровозов достигает 9 м/с, зарубежных–14 м/с.

В соответствии с ПБ (п. 4.4.2) тормозной путь состава на преобладающем уклоне пути при перевозке грузов не должен превышать 40 м, а при перевозке людей–20 м. В отдельных случаях в прямолинейных выработках с уклоном не более 5‰ по специальному проекту допускается увеличение тормозного пути

до 80 м при перевозке грузов и до 40 м при перевозке людей.

В работе принята следующая методика исследования.

При реализации электровозом максимальной силы тяги в средних условиях по сцеплению ($\psi=0,10-0,13$) устанавливали допустимое количество грузовых вагонеток при трогании на подъем порожнего поезда, полагая, что дополнительное сопротивление равно 0, уклон пути постоянный, а его дискретные значения изменяются в диапазоне 5...50‰. Ограничение силы тяги электровоза по нагреву тяговых двигателей в условиях угольных шахт не рассматривали, как несущественное для электровозов типа К14, которые имеют высокое значение коэффициента тяги (0,17). Для пассажирских перевозок характерным является условие трогания на подъем груженого поезда.

При длинах тормозного пути 20, 40, 80 м пассажирских и грузовых поездов, задаваясь значениями начальной скорости торможения 3, 5, 7, 9 м/с, определяли требуемую тормозную силу для груженого поезда (с допустимым по троганию числом вагонеток) на спуске с постоянным средним по длине выработки уклоном.

Для принятого тормозного оборудования локомотива и состава определяли величину тормозной силы и допустимую при этом скорость движения поезда.

При худших условиях сцепления ($\psi=0,08-0,10$) определяли тормозную силу подвижного состава для каждого вида тормозного оборудования и по требуемой величине тормозной силы устанавливали необходимое количество тормозных единиц в зависимости от скорости движения поезда.

Весовые коэффициенты порожнего и груженого поездов следующие:

$$K_{en} = \frac{m_{cn}}{m_l}; \quad K_{ez} = \frac{m_{cz}}{m_l}; \quad K_{ez} = K_{en} \left(\frac{1 + K_T}{K_T} \right),$$

где m_{cn} , m_{cz} —масса порожнего и груженого составов соответственно; m_l —масса локомотива; K_T —коэффициент тары вагонетки.

Допустимый по тяге весовой коэффициент

$$K_{en} = \frac{1000\psi}{w_{on} + i + 108a_o} - 1, \quad (1)$$

где ψ —коэффициент сцепления электровоза в режиме тяги; w_{on} —удельное основное сопротивление движению порожнего состава; i —удельное сопротивление движению от уклона пути; a_o —расчетное ускорение поезда при трогании.

Решая уравнение (1) относительно уклона пути, находим наибольшее значение его, при котором возможно трогание локомотива с порожним составом:

$$i = \frac{1000\psi}{1 + K_{en}} - w_{on} - 108a_o.$$

Максимальный уклон пути, при котором возможно трогание поезда, бу-

дет при $K_{en}=0$, т.е. при трогании локомотива без состава

$$i_{max} = 1000\psi - w_{on} - 108a_o.$$

Так, при $\psi=0,08; 0,10; 0,13; 0,17$, $w_{on}=9\frac{H}{кН}$, $a_o=0,05$ м/с² максимальный уклон пути будет соответственно 65, 85, 115, 135‰, т.е. при уклонах рельсового пути 65‰ и более движение одиночного локомотива по условию тяги невозможно.

Частный случай локомотивного транспорта, когда $K_{en}=1$, $m_{cn}=m_l$. Тогда

$$i_{max} = \frac{1000 \cdot \psi}{2} - w_{on} - 108a_o.$$

При $\psi=0,08; 0,10; 0,13; 0,17$, $i_{max}=25; 35; 50; 70$ ‰, т.е. при уклонах рельсового пути более 25‰ откатка локомотивами невозможна по условию тяги поездов.

Решение уравнения (1) представлено на рис. 1, что позволяет определить допустимое по тяге электровоза число вагонеток (секций) z в поезде для любого типа грузового подвижного состава:

$$z = \frac{K_{en} m_l}{m_o},$$

где m_o – масса тары вагонетки.

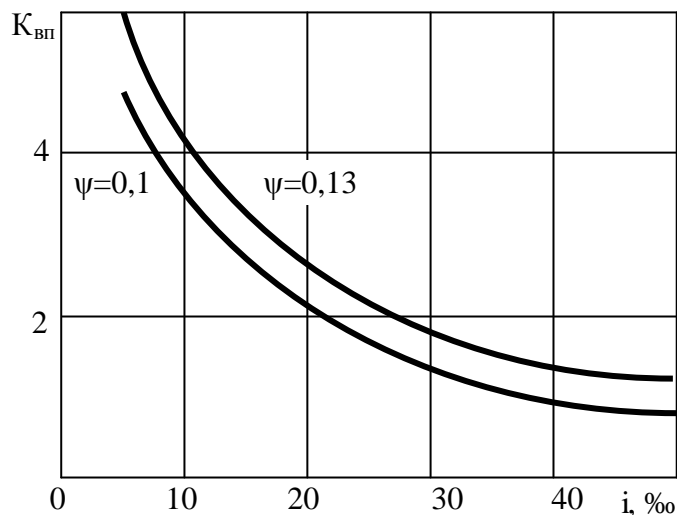


Рис.1. Графики зависимости допустимого по тяге локомотива K_{en} от уклона рельсового пути

При этом K_{en} , K_{e2} характеризуют степень повышения эффективности тормозной системы поезда при размещении тормозного оборудования на прицепной части поезда за счет использования ее сцепной массы. Суммарное значение тормозной силы поезда:

- порожнего $B_k = B_{c.l.} + B_{c.n.} = B_{c.l.}(1 + K_{en});$
- груженого $B_k = B_{c.l.} + B_{c.z.} = B_{c.l.}(1 + K_{e2}),$

где $B_{c.l.}$ —максимальное значение тормозной силы локомотива по сцеплению; $B_{c.n.}$, $B_{c.z.}$ —максимальное значение тормозной силы прицепной части порожнего и груженого поездов по сцеплению соответственно.

Принимаем следующие условия и допущения:

- 1) затормаживают груженный поезд, движущийся под уклон на прямой;
- 2) уклон пути, сопротивление движению поезда и тормозная сила постоянны.

Получим уравнение движения поезда при торможении

$$a_T = \frac{b_k + w_{oz} - i}{108}, \quad (2)$$

где a_T —замедление поезда при торможении; w_{oz} —удельное основное сопротивление движению груженого подвижного состава; b_k —удельная тормозная сила поезда.

Если подвижной состав поезда оборудован колодочно-колесными тормозами, то при торможении поезд сможет реализовать удельную тормозную силу

$$b_k = \frac{B_k}{(m_l + m_{c.z.})g} = \frac{1000(m_l + m_{c.z.})\psi_n}{(m_l + m_{c.z.})} = 1000\psi_n, \quad (3)$$

где ψ_n —приведенный коэффициент сцепления поезда,

$$\psi_n = \frac{m_l\psi_T + m_{c2}\psi_в}{m_l + m_{c2}}, \quad (4)$$

где ψ_T —коэффициент сцепления электровоза в тормозном режиме; $\psi_в$ —расчетный коэффициент сцепления, реализуемый тормозными колесами вагонеток.

Для равнозамедленного движения поезда при торможении допустимая скорость начала торможения по условию остановки на нормируемом тормозном пути l_T

$$V_{дон} = \sqrt{2l_T a_T + (a_T t_n)^2} - a_T t_n, \quad (5)$$

где t_n —время подготовки тормозов к действию.

Численное решение (5) с учетом (2) и (3) представлено на рис. 2.

Таким образом, размещение тормозного оборудования на прицепной части поезда, когда для торможения используется сцепной вес локомотива и вагонов, позволяет значительно повысить скорость движения поездов в грузовом направлении и расширить область применения локомотивного транспорта на тяжелом профиле рельсового пути. Однако допустимая при этом правилами

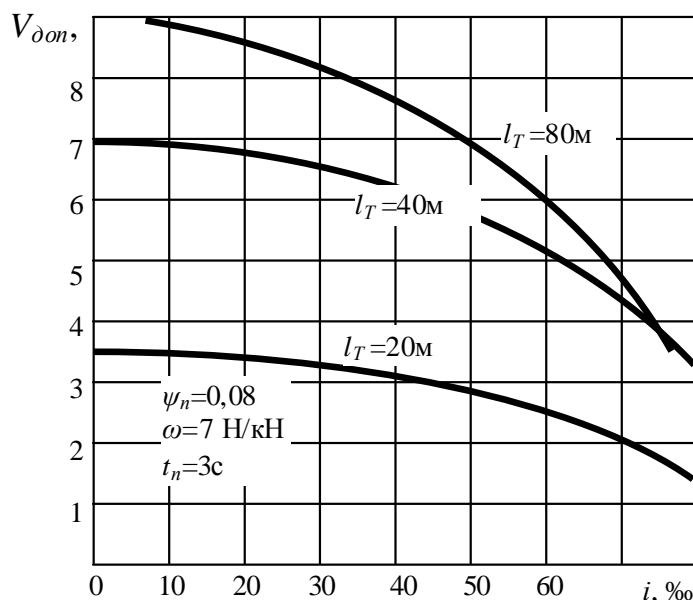


Рис. 2. Графики зависимостей допустимой по торможению скорости движения поезда от уклона рельсового пути

безопасности максимальная скорость движения 5,6 и 3,4 м/с не может быть достигнута по условиям торможения на тормозном пути 20 м. На тормозном пути 40 м максимальная скорость движения может быть достигнута только на профиле до 10‰.

Масса порожнего поезда по тяге локомотива

$$m_{cn} = \frac{1000m_l \psi}{w_{он} + i + 108a_o} - m_l.$$

Максимальная тормозная сила локомотива по сцеплению

$$B_{c.l} = 1000m_l g \psi.$$

Тогда удельное значение тормозной силы поезда в этом случае составит

$$b_k = \frac{B_{c.l.}}{g(m_l + m_{c.n})} = w_{он} + i + 108a_o.$$

Итак, удельное значение тормозной силы порожнего поезда по сцеплению локомотива достигает фактической величины удельного сопротивления движению подвижного состава (при $i=0$, $a_o=\min$), а груженого – в несколько раз меньше (при $K_T < 1$), т.е.

$$b_k = \frac{B_{c.l.}}{g[m_l + m_{c.n}(1 + \frac{1}{K_T})]}.$$

Из уравнения движения поезда в режиме торможения (2) имеем расчетную величину тормозной силы поезда массой $m_l + m_{cн}$, движущегося со скоростью в момент начала торможения V_n , которая необходима для остановки его на тормозном пути l_T при времени подготовки тормозов к действию t_n :

$$B_{к.р} = g(m_l + m_{c.н}) \left(\frac{54V_n}{l_T - V_n t_n} - w_{oz} + i \right).$$

Суммарная тормозная сила, которую может реализовать поезд

$$B_{к} = B_l + B_в = B_{сл} + B_{мл} + B_{св} + B_{мв},$$

где $B_l, B_в$ – тормозная сила локомотива и вагонов прицепной части поезда, соответственно; $B_{сл}$ – тормозная сила локомотива по сцеплению; $B_{мл}$ – тормозная сила рельсового тормоза локомотива; $B_{св}$ – тормозная сила вагонов прицепной части поезда по сцеплению; $B_{мв}$ – тормозная сила рельсовых тормозов вагонов прицепной части поезда.

Тормозная сила локомотива по сцеплению

$$B_{сл} = 1000P\psi_T.$$

Тормозная сила рельсового тормоза локомотива

$$B_{мл} = K_{мл}\varphi_M,$$

где $K_{мл}$ – общая сила нажатия рельсовых тормозов; φ_M – приведенный коэффициент трения башмаков о рельсы.

Тормозная сила вагонеток состава по сцеплению

$$B_{св} = 1000z_{mc}(m_o + m)g\psi_в,$$

где z_{mc} – число тормозных вагонеток в составе с колодочно-колесными тормозами.

Тормозная сила вагонеток состава с рельсовыми тормозами

$$B_{мв} = z_{mm}K_{мв}\varphi_M,$$

где z_{mm} – число тормозных вагонеток в составе с рельсовыми тормозами; $K_{мв}$ – суммарная сила прижатия башмаков одной вагонетки к рельсу.

Допустимое количество вагонеток в составе по тяге локомотива:

– для грузовых поездов

$$z = \frac{m_{cn}}{m_o} = \frac{K_{en} m_l}{m_o};$$

– для пассажирских поездов

$$z = \frac{m_{c2}}{m_o + m}.$$

Допустимое количество вагонеток в составе по условию торможения локомотивом

$$z = \frac{m_{c2}}{m_o + m};$$

$$m_{c2} = \frac{B_l}{\left(\frac{54V_n^2}{l_m - V_n t_n} - w_{oz} + i\right)g} - m_l.$$

Необходимое количество тормозных вагонеток в составе при следующем размещении тормозного оборудования:

- локомотив и вагонетки состава оборудованы колодочно-колесными тормозами

$$z_{mc} = \frac{B_{кр} - 1000m_l g \psi_T}{1000(m_o + m)g \psi_\epsilon};$$

- локомотив и вагонетки состава оборудованы колодочно-колесными тормозами, на локомотиве, кроме этого, установлены рельсовые тормоза

$$z_{mm} = \frac{B_{кр} - 1000m_l g \psi_m - K_{мл} \phi_M}{1000(m_o + m)g \psi_\epsilon};$$

- локомотив оборудован колодочно-колесными и рельсовыми тормозами, вагонетки состава имеют рельсовые тормоза

$$z_{vm} = \frac{B_{кр} - 1000m_l g \psi_m - K_{мл} \phi_M}{K_{мл} \phi_M}.$$

Закономерность изменения тормозных сил и количества тормозных единиц грузовых поездов представлены на рис. 3 (всего 12 вариантов начальных условий для каждого типа подвижного состава при $l_T = \text{const}$).

Массы, абсолютные значения тормозных сил по сцеплению поездов с разными типами локомотивов являются кратными отношению сцепных масс локомотивов, удельные значения тормозных сил, тормозные замедления, до-

пустимые по условиям торможения скорости движения поездов приблизительно равны при прочих равных условиях.

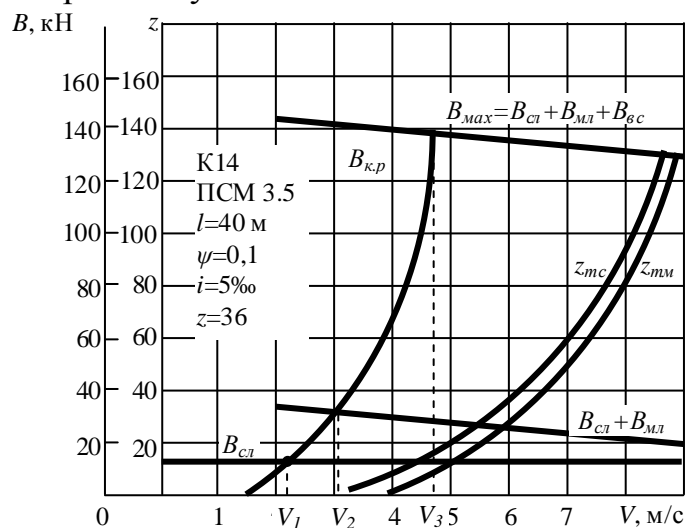


Рис. 3. Графики зависимости тормозных сил и количества тормозных вагонеток от скорости движения (V_1, V_2, V_3 – допустимые по торможению скорости движения поезда в зависимости от величины тормозной силы)

Основные результаты работы сводятся к следующему.

Допустимая скорость движения грузовых поездов по условиям торможения с увеличением уклона рельсового пути снижается. Так, на уклонах пути до 20‰ при торможении колодочно-колесным тормозом локомотива допустимая скорость движения по условию торможения на тормозном пути 40 м уменьшается от 2,1 до 1,3 м/с. На уклонах пути 20‰ и более, когда торможение осуществляется силами сцепления колесных пар с рельсами, остановить поезд тормозной системой локомотива на тормозном пути 40 и 80 м невозможно ($V_{дон} \leq 0$). Усиление тормозной системы локомотива рельсовыми тормозами позволяет выполнять откатку на уклонах до 50‰, при этом скорость движения допускается от 1,8 до 1,5 м/с.

При уменьшении коэффициента сцепления электровоза на одном и том же профиле пути допустимое количество вагонеток снижается, но допустимая скорость движения поезда по условию торможения увеличивается.

Применение на грузовых поездах колодочно-колесного и рельсового тормозов на локомотиве позволяет повысить допустимую по торможению скорость движения поезда примерно в 1,5 раза, а применение колодочно-колесных тормозов на локомотиве и прицепной части – до 3 раз. При этом расчетное значение тормозной силы рельсовых тормозов локомотива при $\psi_m = 0,10$

$$B_{лм} \approx B_{сл}.$$

Поэтому абсолютное значение тормозной силы локомотива

$$B_k = B_{сл} + B_{лм}$$

и удельное значение тормозной силы поезда b_k удваиваются.

Для пассажирских перевозок масса поезда по условиям тяги и торможения равны. На профиле пути от 5 до 50‰ количество вагонов изменяется для локомотива К14 от 22 до 2, допустимая скорость движения по условиям торможения от уклона пути не изменяется. Колодочно-колесного тормоза локомотива достаточно для того, чтобы выполнять откатку со скоростью до 4 м/с при длине тормозного пути 40 м и до 2,8 м/с – при $l_T=20$ м. Совместное применение колодочно-колесного и рельсового тормозов на локомотиве допускает скорость движения до 6 м/с при $l_T=40$ м и до 4 м/с – при $l_T=20$ м. Применение тормозной системы на прицепную часть поезда не позволяет достичь максимальной скорости движения 5,6 м/с при условии торможения на длине тормозного пути 20 м. В этом случае необходимо увеличить длину тормозного пути до 40 м или уменьшить массу поезда при $l_T=20$ м. В обоих случаях достаточно использовать тормозную систему локомотива, усиленную рельсовыми тормозами.

Число тормозных единиц поезда можно определить для конкретных условий эксплуатации и принятой скорости движения поезда (скорость начала торможения V_n), которая не должна превышать допустимую скорость движения $V_{дон}$. Так, при $i=5‰$, $\psi = 0,1$, $l_T=40$ м, $z=36$ (ВД 3,3), $V_{дон}=5,8$ м/с для $V_n=5,0$ м/с необходимо оборудовать тормозами 60% массы поезда ($z_{mc}=20$), а для таких же условий при $l_T=80$ м, $z=49 - 16%$ ($z_{mc}=8$).

Список литературы

1. Ренгевич А. А. Коэффициент сцепления рудничных электровозов// Вопросы рудничного транспорта: Сб. науч. статей. - 1961 - Вып. 5. – С. 57-62
2. Разработать нормативные значения основного удельного сопротивления движению подвижного состава: Отчет о НИР/ Днепропетровский горн. ин-т (ДГИ); Руководитель А.А. Ренгевич. - № ГР 01.85.0035070. - Днепропетровск, 1985. - 143с.
3. Сопротивление движению серийного подвижного состава угольных шахт./А.А. Ренгевич, А.Н. Коптовец, Т.А. Сергеева, А.В. Денищенко, Ю.Е. Пономарев // Горная электромеханика и автоматика: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1990 - Вып. 56. - С. 18–23.
4. Типовые решения по безопасной перевозке людей и грузов в выработках с уклоном от 0,005 до 0,050. – Донецк: Дон УГИ, 1973. – 62 с.
5. ДНАОП 1.1.30 – 1.01 – 00. Правила безопасности в угольных шахтах: Утв. Приказом Министерства труда и социальной политики Украины от авг. 2000г. № 215. – К., 2001 - 182с.