

В.П. Степаненко

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА СЦЕПЛЕНИЯ РУДНИЧНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ ОТ АБРАЗИВНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Рассмотрены результаты многолетних исследований зависимости коэффициента сцепления контактных, аккумуляторных и контактно-аккумуляторных рудничных электровозов от абразивности горных пород. Исследования проводились при различной абразивности загрязнений головок рельсового пути. Приведены также результаты испытаний аккумуляторного электровоза с футерованными полиуретаном бандажами колес.

Ключевые слова: рудничные электровозы, абразивность, горные породы, коэффициент сцепления, головки рельсов, сила тяги, скольжение колес.

Коэффициент сцепления колес рельсами Ψ является одним из основных параметров, определяющим тяговые свойства локомотива [1]. Выбор коэффициента Ψ без учета абразивности горных пород конкретного подземного горно-добывающего предприятия может привести к существенным ошибкам при расчетах количества единиц рудничного подвижного состава и численности трудящихся на участках ВШТ. В настоящей статье освещены основные результаты исследований коэффициента сцепления рудничных контактных, аккумуляторных и контактно – аккумуляторных электровозов, выполненных в ИГД им. А.А. Скочинского и СГАО Висмут [2–11]. Были также проведены исследования коэффициента сцепления Ψ первого отечественного аккумуляторного электровоза АРП7-ФК с футерованными полиуретаном бандажами колес, который после проведения испытаний эксплуатировался на шахте Первомайская ПО Павлоградуголь в наклонных выработках на уклонах до 50‰ [12].

Коэффициент сцепления Ψ вычисляется по формуле [1]:

$$\Psi = F/Q \quad (1)$$

где: F – горизонтальная сила тяги; Q – вертикальная сила, прижимающая колесо к рельсу.

Сила тяги реализуется локомотивом при крипе – незначительном в пределах 1% проскальзывании колес. Коэффициент сцепления Ψ_o , соответствующий максимальной силе тяги $F_{\text{макс}}$, называется потенциальным и определяется расчетным путем:

$$\Psi_o = F_{\text{макс}} / Q_{\text{сц}} \quad (2)$$

где $F_{\text{макс}}$ – максимальная сила тяги на крюке электровоза, кН; $Q_{\text{сц}}$ – сцепной вес электровоза, кН.

Если $F_{\text{сц}} < F_{\text{макс}}$, то возникает избыточное скольжение колес относительно рельсов. Скольжение колес может быть различным: устойчивым, прерывистым, непрерывным и разносным. Особенно опасно разносное скольжение колес электровоза с тяговыми двигателями постоянного тока последовательного возбуждения. Рудничный электровоз на мокрых загрязненных рельсах часто передвигается с поступательной скоростью V и устойчивой скоростью скольжения колес относительно рельсов u .

Коэффициент сцепления колеса при скорости скольжения u равен:

$$\Psi_u = \Psi_o (1 - \rho \times u) \quad (3)$$

Таблица 1

Коэффициент сцепления рудничных локомотивов

Состояние рельсов	Коэффициент Ψ
Покрыты жидкой угольной или породной грязью	0,07–0,08
Влажные, практически чистые	0,09
Мокрые, чистые	0,12–0,13
Сухие, практически чистые	0,17
Посыпаны песком	0,18–0,24
Покрыты раздавленным песком	0,14–0,18

Где ρ – жесткость характеристики сцепления, сек/м.

$$\rho = d\Psi / \Psi_0 du \quad (4)$$

Необходимые для расчетов значения ρ и Ψ_0 определяются опытным путем. При расчетах подземного локомотивного транспорта на действующих и новых откаточных горизонтах шахт и рудников часто пользуются приведенными в табл. 1 значениями коэффициента сцепления Ψ [13].

Значения коэффициента Ψ , приведенные в табл. 1, пригодны только для приближенных расчетов, т.к. не учитывают абразивные включения в загрязнениях головок рельсов. Например, использование табл. 1 при расчетах локомотивной откатки в антрацитовых и сланцевых шахтах приводит к существенному расхождению

расчетных и фактических результатов. При проведении исследований использовалась классификация абразивности горных пород, разработанная Бароном Л.И. и Кузнецовым А.В. [14]. В соответствии методикой ИГД им. А.А. Скочинского абразивность горных пород β измерялись в мг/км.

До проведения замеров поверхность головок рельсов очищалась и наносилась определенная горная литология или смесь литологии в виде сухой пыли или мокрой массы. Затем делались неоднократные повторные (не менее 5 раз) наезды локомотива на место будущих замеров до образования на головках рельсов ровной пленки.

При исследованиях использовались рудничные измерительные вагонетки. Измерялись и записывались сила тяги на крюке электровоза, поступательная

Таблица 2

Коэффициент сцепления аккумуляторных электровозов на мокрых рельсах

Состав загрязнения головок рельсов	Абразивность β , мг/км	Коэффициент сцепления Ψ_0
Чистые рельсы	–	0,136
Угли: коксующиеся Ж, ПЖ, КС, СС, КСН, К	20–40	0,07
Антрацит А	800–1000	0,145
Глинистый сланец	40–350	0,073
Углисто-глинистый сланец	800	0,13
Углистые сланцы, силур С1	1500	0,19
Известняки глинистые и песчаные, силур С2	2300	0,02
Слюдисто-глинистые сланцы ОЖ (ордовик)	3000	0,24
Сухая пыль слюдисто-глинистого сланца	5000	–
Песчаный сланец	2800–3000	0,16

Таблица 3

Коэффициент сцепления Ψ_0 контактных электровозов на мокрых рельсах.

Состав загрязнения головок рельсов	Абразивность β , мг/км	Коэффициент сцепления Ψ_0
Чистые рельсы	–	0,145
Угли: коксующиеся Ж, ПЖ, КС, СС, КСН, К	20–40	0,07
Антрацит А	800–1000	0,136
Глинистый сланец	40–350	0,073
Углисто-глинистый сланец	800	0,12
Углистые сланцы, силур С1	1500	0,2
Известняки глинистые и песчанистые, силур С2	2300	0,22
Слюдисто-глинистые сланцы ОЖ (ордовик)	3000	0,227
Сухая пыль слюдисто-глинистого сланца	5000	–
Песчаный сланец	2800–3000	0,16

скорость движения, угловая скорость вращения колес электровоза, электрический ток тяговых двигателей и другие параметры. Определялась лимитирующая колесная пара электровоза и записывалось протекание процессов боксования. При движении электровоза вперед и назад производились замеры предельной по сцеплению силы тяги $F_{\text{макс}}$ и по формуле (2) вычислялся коэффициент сцепления.

Полученные в результате исследований значения потенциальных коэффициентов сцепления Ψ_0 при различной абразивности загрязнений головок

рельсов, при питании от контактных сетей и от аккумуляторных батарей представлены в табл. 2–5. Значения Ψ_0 на мокрых рельсах приведены в табл. 2.

Значения коэффициентов Ψ_0 контактных электровозов на мокрых рельсах приведены в табл. 3.

На мокрых рельсах практически при всех литологиях с ростом абразивности загрязнений рельсового пути значения Ψ_0 контактных электровозов выше, чем аккумуляторных.

Из рассмотрения табл. 2–5 следует, что значения коэффициента $\Psi_0 = 0,27–0,28$ достигаются при сухой

Таблица 4

Коэффициенты сцепления аккумуляторных электровозов на сухих рельсах

Состав загрязнения головок рельсового пути	Абразивность β , мг/км	Коэффициент сцепления Ψ_0
Чистые рельсы	–	0,191
Угли: коксующиеся Ж, ПЖ, КС, СС, КСН, К	20–40	0,1
Антрацит А	800–1000	0,182
Глинистый сланец	40–350	0,091
Углисто-глинистый сланец	800	0,17
Углистые сланцы, силур С1	1500	0,22
Известняки глинистые и песчанистые, силур С2	2300	0,18
Слюдисто-глинистые сланцы ОЖ (ордовик)	3000	0,25
Сухая пыль слюдисто-глинистого сланца	5000	0,27
Песчаный сланец	2800–3000	0,17

Таблица 5

Коэффициент сцепления контактных электровозов на сухих рельсах

Состав загрязнения головок рельсового пути	Абразивность β , мг/км	Коэффициент сцепления Ψ_0
		Рельсы сухие
Чистые рельсы	–	0,21
Угли: коксующиеся Ж, ПЖ, КС, СС, КСН, К	20–40	0,12
Антрацит А	800–1000	0,191
Глинистый сланец	40–350	0,11
Углисто-глинистый сланец	800	0,18
Углистые сланцы, силур С1	1500	0,23
Известняки глинистые и песчанистые, силур С2	2300	0,24
Слюдисто-глинистые сланцы ОЖ (ордовик)	3000	0,26
Сухая пыль слюдисто-глинистого сланца	5000	0,285
Песчаный сланец	2800–3000	0,18

пылевидной пленке на головках рельсов и значения $\Psi_0 = 0,23–0,24$ – при мокрой пленке из слюдисто-глинистых сланцев со средней абразивностью $\beta = 2000$ мг/км. Добавка в мокрый ордовик до 50% мокрой туронской глины снижает коэффициент сцепления с $\Psi_0 = 0,23–0,24$ до $\Psi_0 = 0,14–0,16$. При наличии на головках рельсов пленки, состоящей из чистой туронской глины, коэффициент сцепления падал до $\Psi_0 = 0,08–0,11$.

При мокрых загрязненных рельсах протекание электрического тока через контактные пятна в режиме питания электровоза от контактной сети не увеличивает коэффициент сцепления Ψ , разброс максимальных и минимальных значений предельной по сцеплению силы на мокрых грязных рельсах в аккумуляторном режиме больше, чем в контактном. Это явление наблюдалось на немецких и советских рудничных электровозах различной сцепной массы и, очевидно, объясняется снижением плотности электрического тока в контактном пятне при наличии воды или влажного загрязнения на головках рельсов. На пленке, состоящей из смеси литологии силура 1 и силура 2 (глинистые сланцы 87% + глинистые

и песчаные известняки – 13%), коэффициент сцепления достигал значений $\Psi_0 = 0,22–0,24$. При попадании на головки рельсов ордовика (слюдисто-глинистого сланца) коэффициент сцепления составлял $\Psi_0 = 0,27–0,3$. Коэффициент сцепления снижался почти в 2 раза при наличии небольших примесей (до 12,5%) туронских глин.

Значения коэффициентов сцепления Ψ_0 контактных и аккумуляторных электровозов на сухих рельсах, приведенные в табл. 4 и табл. 5, выше, чем значения Ψ для тех же электровозов на мокрых рельсах.

Потенциальная сила тяги $F_{\text{макс}}$ и коэффициент сцепления $\Psi_{\text{макс}}$ контактных электровозов значительно выше, чем аккумуляторных вследствие протекания электрического тока через контакты колес с рельсами и большого внутреннего сопротивления аккумуляторных батарей.

На стенде НТЦ СГАО Висмут путем баллаستировки рудничного электровоза давление колес на рельсы увеличивалось с 5 кН до 30 кН, измерялись максимальная сила тяги $F_{\text{макс}}$ и площадь контактного пятна колесорельс S_k . В этих испытаниях было установлено, что при увеличении дав-

ления на колесо в 6 раз, площадь контактного пятна увеличивалась примерно в два раза (от $S_k = 4\text{--}12 \text{ мм}^2$ до $S_k = 22\text{--}24 \text{ мм}^2$), а коэффициент сцепления возрастал на 20–30%.

Максимальный коэффициент сцепления отечественного рудничного электровоза с полиуретановыми бандажами был высоким ($\Psi_0 = 1,0$). Электровоз развивал силу тяги равную силе его веса, но при этом наблюдался сильный нагрев и быстрое старение бандажей. По мере старения полиуретана площадь контактного пятна возрастала с $S_k = 5\text{--}8 \text{ см}^2$ до $S_k = 22 \text{ см}^2$. После шести недель эксплуатации диаметр бандажей из полиуретана твердостью 80 единиц ТМ увеличивался выше допустимого размера и потребовалась их замена. Увеличение твердости полиуретана до 82–85 единиц ТМ продлило срок службы бандажей до 8–10 недель (2–2,5 месяца), но бандажи выходили из строя вследствие перегрева и появления поперечных трещин [12]. Необходимо отметить, что срок службы бандажей из натурального каучука на рудничных электровозах известной английской фирмы Клейтон на проходке тоннеля под Ла-Маншем не превышал одного месяца.

Выводы

1. В результате исследований установлена зависимость коэффициента Ψ от абразивности β . При значениях абразивности $\beta = 10 \text{ мг/км}$ до $\beta = 350 \text{ мг/км}$ (мокрые туронские глины, коксующиеся угли марок Ж, ПЖ, КС, СС, КСН, К, глинистые сланцы) значения коэффициента сцепления находятся в пределах от $\Psi = 0,05$ до $\Psi = 0,11$.

2. При значениях абразивности $\beta = 350\text{--}1200 \text{ мг/км}$ (уголь антрацит марки А, углисто-глинистый сланец, бурый уголь) коэффициент Ψ находится в пределах от $\Psi = 0,11$ до $\Psi = 0,16$.

3. При значениях абразивности от $\beta = 1300$ до $\beta = 8000 \text{ мг/км}$ при литологиях: углистые сланцы (силур С1), известняки глинистые и песчаные (силур С2), слюдисто-глинистые сланцы ОЖ (ордовик), коэффициент Ψ находится в пределах от $\Psi = 0,17$ до $\Psi = 0,29$.

4. Учет абразивности загрязнений головок рельсового пути позволяет избежать ошибок в расчетах количества локомотивов, вагонеток, численности транспортного и ремонтного персонала горнодобывающего предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минов Д.К. Механическая часть электрического подвижного состава. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959 – С. 382.

2. Stepanenko W.P., Wenzlaff W., Andrees V. Ein Berechnungsverfahren für Lokomotiv und Wagenforderung mit Hilfe von Nomogrammen // Wissenschaftlich-technische Information, 1982, № 10, pp. 19–31.

3. Stepanenko W.P., Wenzlaff W., Andrees V., Kuhnert L., Wassilenko W.I. Die Umrüstung von Batteriegrubenlokomotiven zu Verbundlokomotiven // Wissenschaftlich-technische Information, Karl-Marx-Stadt. 1984, № 12, pp. 14–22.

4. Stepanenko W.P., Wenzlaff W., Andrees V., Kuhnert L., Berger M., Oehme U., Malz M. Grubenlokomotive für Batterie- und Fahrleitungsbetrieb. Patentschrift WP B61 C № /254 798 3, 1983.

5. Stepanenko W.P., Wenzlaff W., Andrees V. Schaltungsanordnung zur Fernsteuerung batteriegetriebener Lokomotiven. Patentschrift 207523, WP B60L/2394636, 1984.

6. Stepanenko W.P., Wenzlaff W., Andrees V., Kuhnert L., Wassilenko W.I. Schaltungsanordnung zur Steuerung der Bahnmotoren von Verbundlokomotiven. Patentschrift WP B60L 15/32, № 224280A1. 1984.

7. Степаненко В.П., Венцлафф В., Дайнеке Р., Василенко В.И. Разработка и испытание контактно-аккумуляторных электровозов V-860 // Уголь. – 1986. – № 12. – С. 32–33.

8. Справочник по шахтному транспорту / Под ред. Г.Я. Пейсаховича, И.П. Ремизова. – М.: Недра, 1977. – С. 619.

9. Рудничный транспорт и механизация вспомогательных работ / Под ред. Б.Ф. Братченко – М.: Недра, 1978 – С. 418.

10. Основные положения по проектированию подземного транспорта повых и действующих шахт – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1978. – С. 319.

11. Степаненко В.П., Синчук О.Н., Гузов Э.С. Шахтный контактно-аккумуляторный электровоз // Горный журнал. – 1988. – № 6. – С. 55–57.

12. Степаненко В.П., Ремизов И.П., Чуприн В.П. Результаты испытаний рудничного электровоза с футерованными бандажами колес // Известия ИГД им. А.А. Скочинского. – 1991. – № 1. – С. 50–57.

13. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. – М.: Недра, 1982. – С. 300.

14. Спивак А.И. Абразивность горных пород. – М.: Недра, 1972.

15. Степаненко В.П., Кондрашин Ю.А., Верхутов Ю.А. Шахтные транспортные средства с безредукторным бесколлекторным приводом // Научные сообщения Национального Центра горного производства ИГД им. А.А. Скочинского. – 2000. – № 314. – С. 172–177. **ПИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Степаненко Валерий Павлович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: ud@msmu.ru.

UDC 622.621.311.1

ANALYSIS OF TRACTION COEFFICIENT OF MINE LOCOMOTIVES VERSUS ROCK ABRASIVENESS

Stepanenko V.P., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Senior Researcher, Moscow Mining Institute, National University of Science and Technology «MISS», Moscow, Russia, e-mail: ud@msmu.ru.

The article gives a review of many-years research of the relationship between traction coefficient of trolley, accumulator and trolley-accumulator mine locomotives and abrasiveness of rocks. The analysis involved different values of abrasiveness of impurity on the top of rails. Test data for an accumulator locomotive with polyurethane-coated wheels are presented.

Key words: mine locomotives, abrasiveness, rocks, traction factor, top of rail, locomotive power, skidding of wheels.

REFERENCES

1. Minov D.K. *Mekhanicheskaya chast' elektricheskogo podvizhnogo sostava* (Mechanical portion of electric vehicles), Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat, 1959, pp. 382.
2. Stepanenko W.P., Wenzlaff W., Andrees V. Ein Berechnungsverfahren fur Lokomotiv und Wagenforderung mit Hilfe von Nomogrammen. *Wissenschaftlich-technische Information*, 1982, no 10, pp. 19–31.
3. Stepanenko W.P., Wenzlaff W., Andrees V., Kuhnert L., Wassilenko W.I. Die Umrustung von Batteriegrubenlokomotiven zu Verbundlokomotiven. *Wissenschaftlich-technische Information*, Karl-Marx-Stadt, 1984, no 12, pp. 14–22.
4. Stepanenko W.P., Wenzlaff W., Andrees V., Kuhnert L., Berger M., Oehme U., Malz M. Grubenlokomotive fur Batterie- und Fahrleitungsbetrieb. *Patentschrift WP B61 C no /254 798 3*, 1983.
5. Stepanenko W.P., Wenzlaff W., Andrees V. Schaltungsanordnung zur Fernsteuerung batteriegetriebener Lokomotiven. *Patentschrift 207523, WP B60L/2394636*, 1984.
6. Stepanenko W.P., Wenzlaff W., Andrees V., Kuhnert L., Wassilenko W.I. Schaltungsanordnung zur Steuerung der Bahnmotoren von Verbundlokomotiven. *Patentschrift WP B60L 15/32, no 224280A1*, 1984.
7. Stepanenko V.P., Ventslaff V., Daineke R., Vasilenko V.I. *Ugol'*, 1986, no 12, pp. 32–33.
8. *Spravochnik po shakhtnomu transportu*. Pod red. G.Ya. Peisakhovicha, I.P. Remizova (Mine transport reference book. Peisakhovich G.Ya., Remizov I.P. (Eds.)), Moscow, Nedra, 1977, pp. 619.
9. *Rudnichnyi transport i mekhanizatsiya vspomogatel'nykh rabot*. Pod red. B.F. Bratchenko (Mine transport and non-productive operations mechanization. Bratchenko B.F. (Ed.)), Moscow, Nedra, 1978, pp. 418.
10. *Osnovnye polozheniya po proektirovaniyu podzemnogo transporta povykh i deistvuyushchikh shakht* (General principles of underground transport design for new and operating mines), Moscow, IGD im. A.A. Skochinskogo, 1978, pp. 319.
11. Stepanenko V.P., Sinchuk O.N., Guзов E.S. *Gornyi zhurnal*, 1988, no 6, pp. 55–57.
12. Stepanenko V.P., Remizov I.P., Chuprin V.P. *Izvestiya IGD im. A.A. Skochinskogo*, 1991, no 1, pp. 50–57.
13. Volotkovskii S.A. *Rudnichnaya elektrovoznaya tyaga* (Motive power of mine locomotives), Moscow, Nedra, 1982, pp. 300.
14. Spivak A.I. *Abrazivnost' gornykh porod* (Rock abrasiveness), Moscow, Nedra, 1972.
15. Stepanenko V.P., Kondrashin Yu.A., Verkhutov Yu.A. *Nauchnye soobshcheniya Natsional'nogo Tsentra gornogo proizvodstva IGD im. A.A. Skochinskogo*, 2000, no 314, pp. 172–177.