

В.П. Степаненко, Л.Н. Сорин**АКТУАЛЬНОСТЬ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ
НА ПОДЗЕМНЫХ РУДНИЧНЫХ ЛОКОМОТИВАХ
С КОМБИНИРОВАННЫМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ**

Рассмотрена актуальность сбережения ресурсов, электроэнергии и дизельного топлива, повышения экологической безопасности на подземном локомотивном транспорте. Расход электроэнергии аккумуляторными электровозами и горюче-смазочных материалов напочвенными и подвесными дизелевозами в настоящее время не отвечает современным требованиям. Повысить коэффициент полезного действия электровозов и дизелевозов, уменьшить количество тяговых аккумуляторных батарей, снизить расход горюче-смазочных материалов улучшить экологическую безопасность можно путем использования комбинированных накопителей энергии. В докладе приведена методика расчета основных параметров энергосиловых установок рудничных дизельных локомотивов с комбинированными накопителями энергии.

Ключевые слова: рудничные локомотивы, контактные и аккумуляторные электровозы, напочвенные и подвесные дизелевозы, комбинированные накопители энергии, аккумуляторные батареи, конденсаторы с двойным электрическим слоем.

В горной промышленности России эксплуатируются в основном старые типы рудничных электровозов и дизелевозов. Показатели экологической безопасности, ресурсо- и энергосбережения контактных электровозов выше, чем у аккумуляторных, контактно-аккумуляторных электровозов, дизелевозов и гировозов. Коэффициенты полезного действия контактных электровозов не превышают 50–55%, взрывозащищенных дизелевозов – 20–35%, аккумуляторных электровозов – 15–27% [1, 2, 3]. На отечественном подземном транспорте в последние десятилетия возросло количество дизельных транспортных средств. Это привело к увеличению расходов на дизельное топливо, горюче-смазочные материалы и вентиляцию горных выработок. За последние 45 лет нормативная подача воздуха для разбавления дизельных выхлопных газов уменьшилась с 23 м³/л.с. мин. до 5 м³/л.с. мин. На импортных дизельных машинах не устанавливаются жидкостные нейтрализаторы выхлоп-

ных газов. Вследствие этого снижается экологическая безопасность и возрастает риск заболеваний раком легких и отравлений окислами азота, в первую очередь, на глубоких горизонтах в сухих шахтах и рудниках. Повышение экологической безопасности взрыво-безопасных рудничных дизелевозов достигается следующими способами:

- увеличением угла опережения впрыска топлива до 14–18 град.;
- отключением цилиндров дизельного двигателя на холостом ходу и при малой нагрузке;
- применение антидымных присадок к дизельному топливу;
- установкой жидкостных водных нейтрализаторов и катализаторов и добавкой перманганата калия в жидкостные нейтрализаторы;
- конвертацией дизеля на водородное топливо.

Но у перечисленных способов повышения экологической безопасности имеются недостатки, заключающиеся в том, что все они снижают мощность на валу дизельного двигателя на 15–

20%, увеличивают стоимость дизельных транспортных машин и текущие затраты на их эксплуатацию. При конвертации дизельного двигателя на водородное топливо в выхлопных газах исчезают окислы углерода, альдегиды, канцерогены, сажа, продукты неполного сгорания топлива, но увеличивается объем окислов азота.

Повышения экологической безопасности, ресурсо – и энергосбережения можно достичь с помощью использования в качестве накопителей энергии аккумуляторных батарей, конденсаторов с двойным электрическим слоем и маховиков [4, 5, 6]. Для аккумуляторных и контактно-аккумуляторных электровозов использовать накопители энергии, собранные из конденсаторных модулей 10ЭК304, для контактных электровозов и дизелевозов – из моду-

лей 30ЭК404, имеющих большую мощность (см. табл. 1). Эти конденсаторные модули разработаны ЗАО «Элтон» и серийно выпускаются ОАО «Энергия» [7].

Для аккумуляторных электровозов количество отдельных модулей в накопителе определяется типом электровоза, рабочим напряжением аккумуляторной батареи и мощностью тяговых двигателей (см. табл. 2).

Параметры накопителей энергии, собранных из конденсаторных модулей 30 ЭК404 и предназначенных для размещения на контактных электровозах, в системе тягового электроснабжения на накопительных и тяговых подстанциях, приведены в табл. 3.

Расход воздуха Q м³/мин на разбавление выхлопных газов дизельных двигателей определяется в соответствии с Правилами технической

Таблица 1.

Параметры конденсаторных модулей 10 ЭК 304 и 30 ЭК 404

Тип	10 ЭК 304	30 ЭК 404
Рабочее напряжение, В	15–7,5	45–22,5
Емкость, Ф	4500	400
Запасаемая энергия, МДж/кВтч	0,506/0,141	0,303/0,084
Номинальная мощность, кВт	28	90
Масса, кг	34	17,1
Объем, м ³	0,023	0,03
Рабочая температура	от -60 °С до +70 °С	от -50 °С до +70 °С
Ресурсы, циклы	1 000 000	
Срок службы	Более 15 лет	

Таблица 2

Параметры накопителей энергии для аккумуляторных электровозов

Тип электровоза	Напряжение, В	Запасаемая энергия, МДж	Мощность, кВт	Количество модулей
АРП7-900	150–120	5,06	280	10
АМ8Д-600	150–120	5,06	280	10
АМ8Д-900	180–130	6,072	336	12
2АМ8Д-600	300–240	10,12	560	20
2хАМ8Д-900	360–260	12,144	762	24
АРП14Н-900 АРП14-900	240–160	7,084	393	14

Таблица 3

Накопители энергии для контактной электровозной откатки

Место установки	Диапазон рабочих напряжений, В	Запасаемая энергия, МДж	Максимальная мощность, кВт	Количество конденсаторных модулей ЗОЭК404
Электровозы контактные	540–270	3,64	1080	12
Накопительные подстанции	540–270	7,28	2160	24
Тяговые подстанции	540–270	14,56	4320	48

эксплуатации транспортных машин с дизельным приводом и Нормами безопасности на транспортные машины с дизельным приводом РД 05–312-99, утвержденными постановлением Госгортехнадзора России 30.9.1999 г. № 71 [8, 9]. В выработки, по которым проходят маршруты дизельных машин, должен подаваться свежий воздух не менее 5 м³/мин на 1 л.с. номинальной мощности дизельного двигателя. Определение суммарной мощности дизельных двигателей производится суммированием максимальных мощностей каждой из машин $N_{д\text{ так}}$, которую она может развивать при движении с установившейся скоростью с грузом по маршруту в период времени продолжительностью не менее 5 мин (например, при движении на преобладающем подъеме). Расчет требуемого количества воздуха в м³/мин выполняется методом расстановки по рабочим местам машин с дизельным приводом в последовательно проветриваемых выработках. Окисиды азота в 10 раз токсичнее, чем угарный газ, они хорошо растворяются в воде, не имеют цвета и запаха, признаки отравления проявляются в течение 24 часов. Расчет количества воздуха ведется по максимально допустимым концентрация окислов азота в выхлопных газах и рудничной атмосфере. Предельно допустимая концентрация окислов азота в пересчете на NO₂ равна 5 мг/м³ или 0,00025% по объему, а диоксида азота 0,0001% по объему. Требуемый

для разбавления выхлопных газов расход воздуха зависит от обводненности шахты или рудника, что в вентиляционных расчетах учитывается особым коэффициентом $K_{обв}$ [8, 9]. Для разбавления в выхлопных газах окиси азота в сухих шахтах требуется в 5 раз больше воздуха, чем в обводненных. Расчетные значения коэффициента $K_{обв}$ приведены в табл. 4.

Расчетные значения расхода воздуха сравниваются с фактическим расходом воздуха для действующих шахт и горизонтов или с расчетным для проектируемых или реконструируемых шахт, горизонтов. По результатам сравнения, если это требуется, вводятся коррективы расхода воздуха и при необходимости увеличивается подача воздуха. Если увеличить подачу воздуха невозможно, то уменьшается количество дизельных транспортных машин, работающих в последовательно проветриваемых выработках. С целью повышения уровня экологической безопасности, в первую очередь, в сухих шахтах дизельные двигатели необходимо оборудовать жидкостными нейтрализаторами, в дизельное топливо добавлять антидымные присадки, а в нейтрализаторы перманганат калия.

Допустимая перегрузка дизельного двигателя не превышает 120%. Максимальная сила тяги F на клюке напочвенного дизелевоза определяется по формуле:

$$F_{\text{max}} = (P_d + Q_c) (\omega_o + i_{\text{max}} + \omega_{\text{кр}}) \quad (1)$$

Таблица 4

Значения коэффициента обводненности

Характеристика обводненности выработок	$K_{обв}$
Стволы сухие (приток до $1 \text{ м}^3/\text{ч}$) и обводненные глубиной не более 200 м. Горизонтальные и наклонные выработки проводятся по сухим породам	0,8
Стволы обводненные (приток до $6 \text{ м}^3/\text{ч}$) глубиной более 200 м. Горизонтальные и наклонные выработки частично проводятся по водоносным породам (влажные выработки)	0,6
Стволы обводненные (приток от 6 до $15 \text{ м}^3/\text{ч}$), капеж в виде дождя. Горизонтальные и наклонные выработки на всю длину проводятся по водоносным породам или с применением водяных заслонов (обводненные выработки)	0,3
Стволы обводненные (приток более $15 \text{ м}^3/\text{ч}$), выделение воды в виде ливня	0,15

Максимальная мощность дизельного двигателя N_e в л.с. при движении дизельвоза с груженым составом со скоростью V на наибольшем подъеме i , в течение не более 5 мин вычисляется из выражения:

$$N_e = 1,36 \dot{V} (P_d + Q_c) (\omega_o + i_{\max} + \omega_{кр}) \quad (2)$$

где P_d – масса дизельвоза, т; Q_c – масса перевозимого груза, т; ω_o – основное удельное сопротивление движению, даН/т; $i_{\max}$ – величина наибольшего (преобладающего) уклона, °/оо; $\omega_{кр}$ – добавочное удельное сопротивление от движения в кривой пути, даН/т.

Наименьшая токсичность выхлопных газов наблюдается при мощности на валу дизеля 0,75 от номинальной. В условиях эксплуатации средневзвешенная мощность на крюке дизельвозов не превышает 0,3–0,5 от номинальной.

Запас энергии в аккумуляторной батарее комбинированного накопителя напочвенного дизельвоза следует выбирать достаточным для выполнения одного рейса в режиме автономного питания от накопителя. Удельный расход энергии в расчетах принимать равным 0,05 кВт·ч/ткм перевозимого груза. Мощность конденсатора с двойным электрическим слоем комбинированного накопителя энергии N_n должна быть большей, чем максимальная мощность дизельного двигателя N_e , т.е.

$$N_n > N_e \quad (3)$$

Запас энергии в конденсаторном накопителе должен обеспечивать запуски дизельного двигателя, сглаживание пиков нагрузки. Энергоемкость конденсаторного накопителя выбирается равной 1–2% энергоемкости аккумуляторной батареи.

Работа E в кВтч, выполняемая подвесным дизельвозом при движении с грузом на подъеме и порожним на спуске, определяется из выражения:

$$E = \frac{FL}{3,6} = \frac{0,278gL [Q_r (K + \sin \beta) + Q_n (K - \sin \beta)]}{\eta} \quad (4)$$

где F – сила сопротивления движению, Н; L – расстояние, м; K – коэффициент сопротивления движению подвесного локомотива; β – угол наклона горной выработки, град.; η – КПД накопителя энергии; g – ускорение свободного падения $9,8 \text{ м/с}^2$.

На спусках по уклонам выше самокатного, когда коэффициент сопротивления движению подвесного локомотива $K < \sin \beta$, энергия рекуперативного торможения $E_{пр}$ вычисляется по формуле:

$$E_{пр} = \frac{0,278LgQ(K - \sin \beta)}{\eta} \quad (5)$$

Выполненные расчеты показали, что подвесной дизельвоз мощностью 90 л.с., и гибридный локомотив, осна-

щенный дизельным двигателем мощностью 20 л.с. и накопителем энергоемкостью 15 кВтч, будут иметь равную производительность. В расчетах было принято, что дизельный двигатель гибридного локомотива работает в режиме постоянной мощности, равной 75% от номинальной. Объем выхлопных газов гибридного локомотива будет в 4,5 раза меньше, чем у дизельного. Гибридный локомотив питается энергией из накопителя в забоях, в выработках с недостаточной вентиляцией и в тупиковых забоях, а также в тех случаях, когда скорость и направление движения воздушной вентиляционной струи и локомотива совпадают [10].

Компания «Комбарко» разработала комбинированный накопитель для электромобилей, состоящий из аккумуляторной батареи и маховика. Инерционный накопитель энергии соединен с колесами многопоточной бесступенчатой электромеханической передачей – супервариатором, через который вращающий момент может передаваться от маховика на колеса и обратно. Опыт компании «Комбарко» может

представлять интерес при разработке отечественного комбинированного дизельного [11].

Выводы

1. Актуальность ресурсо- и энергосбережения на подземном локомотивном транспорте сохраняется и в настоящее время. Использование комбинированных накопителей в перспективе уменьшит удельные расходы ресурсов и энергии и повысит экологическую безопасность.

2. Для повышения экологической безопасности, в первую очередь на глубоких горизонтах сухих шахт и рудников на дизельных локомотивах необходимо устанавливать жидкостные нейтрализаторы, применять антидымные присадки к дизельному топливу, регулярно добавлять воду и перманганат калия в жидкостные нейтрализаторы.

3. В статье определен тип, запасаемая энергия и мощность конденсаторных накопителей энергии для дизельных локомотивов, аккумуляторных и контактных электровозов, накопительных и тяговых подстанций.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Степаненко Валерий Павлович – кандидат технических наук, доцент, МГИ ННТУ «МИСиС», e-mail: valestepanenکو@yandex.ru,

Сорин Леонид Наумович – доктор технических наук, ООО «АВП Технология», e-mail: osv@mail.ru.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степаненко В.П., Кондрашин Ю.А., Мохельник П., Коварж П. Одиночные и спаренные дизельные локомотивы для угольных шахт // Уголь. – 1998. – № 5. – С. 44–48.

2. Степаненко В.П., Иващенко В.В. Сравнительное исследование процессов газовыделения из тяговых никель-железных и никель-кадмиевых батарей рудничных контактно-аккумуляторных электровозов.

3. Тельнов С.В. Расчет отдаваемой емкости аккумуляторов рудничных электровозов // Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского. Выпуск 150. – М., 1975. – С. 8–86.

4. Степаненко В.П. Применение комбинированных (гибридных) энергосиловых установок в горной промышленности // Горный

информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 11. – С. 322–328.

5. Белозеров В.И., Степаненко В.П. Актуальность создания карьерных локомотивов с накопителем энергии // Горная промышленность. – 2014. – № 4. – С. 76.

6. Степаненко В.П., Белозеров В.И. Применение комбинированных (гибридных) энергосиловых установок горнотранспортных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 2. – С. 174–181.

7. Варакин И.Н., Менухов В.В., Самитин В.В. Перспективы применения электрохимических конденсаторов в составе комбинированных энергосиловых установок

на автосамосвалах // Горная промышленность. – 2008. – № 3. – С. 79–86.

8. Чубаров Л.А., Степаненко В.П., Ремизов И.П., Сергеев И.В., Карпов Е.Ф., Верхутов Ю.А., Беляк Л.А., Васильчук М.П. Технические требования по безопасной эксплуатации транспортных машин с дизельным приводом в угольных шахтах РД-05-312-99. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 30.09.1999 г. № 71.

9. Чубаров Л.А., Степаненко В.П., Ремизов И.П., Сергеев И.В., Карпов Е.Ф., Верхутов Ю.А., Беляк Л.А., Васильчук М.П. Нормы безопасности на транспортные машины с ди-

зельным приводом для угольных шахт. РД-05-312-99. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 30.09.1999 г. – № 71.

10. Степаненко В.П. Дизель-аккумуляторные подвесные монорельсовые локомотивы / Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского. Выпуск 150. – М., 1975. – С. 80–83.

11. Маматов А.И., Калинин Я.В., Давыдов В.В., Лаврентьев А.И. Математическое моделирование комбинированного тягового привода с маховичным накопителем для электромотоцикла // Журнал автомобильных инженеров. – 2010. **ГИАВ**

UDC 622.625.28:621.355

RELEVANCE OF RESOURCE AND ENERGY SAVING IN UNDERGROUND MINING LOCOMOTIVES WITH A COMBINED ENERGY STORAGE

Stepanenko V.P., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: valestepanenko@yandex.ru, Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia, Sorin L.N., Doctor of Technical Sciences, AVP Technology, Moscow, Russia, e-mail: ocv@mail.ru.

The article considers the relevance of resource conservation, electricity and diesel fuel, increase of ecological safety in underground locomotive transport. The power consumption of the battery electric and fuel and lubricants surface and an outboard diesel locomotives currently does not meet modern requirements. To improve the efficiency of electric locomotives and diesel locomotives, to reduce the amount of traction batteries, to reduce the consumption of lubricants to improve the environmental safety by use of the combined energy storage. The report describes a method of calculating the basic parameters of power plants of mine diesel locomotives with a combined energy storage.

Key words: mine locomotives, contact and battery electric, ground and suspended diesel locomotives, the combined energy storage devices, batteries, capacitors, electric double layer.

REFERENCES

1. Stepanenko V.P., Kondrashin Yu.A., Mokhel'nik P., Kovarzh P. *Ugol'*. 1998, no 5, pp. 44–48.
2. Stepanenko V.P., Ivashchenko V.V. *Sravnitel'noe issledovanie protsessov gazovydeleniya iz tyagovykh nikel'-zheleznykh i nikel'-kadmievyykh batarei rudnichnykh kontaktno-akkumulyatornykh elektrovozov* (Comparative analysis of gas emission from nickel-iron and nickel-cadmium batteries of mine overhead wire-accumulator locomotives).
3. Tel'nov S.V. *Nauchnye soobshcheniya IGD im. A.A. Skochinskogo* (Transactions of the Skochinsky Institute of Mining), issue 150, Moscow, 1975, pp. 8–86.
4. Stepanenko V.P. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2014, no 11, pp. 322–328.
5. Belozarov V.I., Stepanenko V.P. *Gornaya promyshlennost'*. 2014, no 4, pp. 76.
6. Stepanenko V.P., Belozarov V.I. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2015, no 2, pp. 174–181.
7. Varakin I.N., Menukhov V.V., Samitin V.V. *Gornaya promyshlennost'*. 2008, no 3, pp. 79–86.
8. Chubarov L.A., Stepanenko V.P., Remizov I.P., Sergeev I.V., Karpov E.F., Verkhutov Yu.A., Belyak L.A., Vasil'chuk M.P. *Tekhnicheskie trebovaniya po bezopasnoi ekspluatatsii transportnykh mashin s dizel'nyim privodom v ugol'nykh shakhtakh RD-05-312-99*. Uтверждены постановлением Gosgortekhnadzora Rossii ot 30.09.1999 g (Technical requirements on safe operation of diesel-drive transportation machines in coal mines RD-05-312-99. Approved by the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia as of September 30, 1999), no 71.
9. Chubarov L.A., Stepanenko V.P., Remizov I.P., Sergeev I.V., Karpov E.F., Verkhutov Yu.A., Belyak L.A., Vasil'chuk M.P. *Normy bezopasnosti na transportnye mashiny s dizel'nyim privodom dlya ugol'nykh shakht. RD-05-312-99*. Uтверждены постановлением Gosgortekhnadzora Rossii ot 30.09.1999 g (Safety standards for diesel-drive transportation machines for coal mines. RD-05-312-99. Approved by the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia as of September 30, 1999), no 71.
10. Stepanenko V.P. *Nauchnye soobshcheniya IGD im. A.A. Skochinskogo* (Transactions of the Skochinsky Institute of Mining), issue 150, Moscow, 1975, pp. 80–83.
11. Mamatov A.I., Kalinin Ya.V., Davydov V.V., Lavrent'ev A.I. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*. 2010.