

О.В. Шугаев, Т.П. Воскресенская

Сибирский государственный индустриальный университет

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОДОРОДНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ЭНЕРГИИ НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ТЯГОВЫХ АГРЕГАТОВ В УСЛОВИЯХ УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА

Карьерный транспорт, выделяющий в атмосферу диоксид углерода, углеводороды, оксиды азота и серы, в связи с увеличением глубины разреза требует альтернативных решений с проблемой загазованности, так как вышеперечисленные выбросы накапливаются из-за плохой выветриваемости системы открытых разработок полезных ископаемых. В связи с обозначенной проблемой значительно ухудшаются условия труда, происходит периодическая остановка эксплуатации карьера. Кроме того, на работу карьера также влияют климатические факторы. Простой открытой системы разработок полезных ископаемых ежегодно могут достигать 1000 ч и более [1], что влечет к значительным убыткам.

Железнодорожный транспорт обладает достаточно высокими экологическими показателями, имеет относительно небольшие затраты на тонно-километр перевозок, при этом потребляет сравнительно небольшое количество энергии при трогании с места и при движении. По сравнению с автомобильной технической дорогой железнодорожное полотно не требует при транспортировке груза увлажнения, приводящее к дополнительным расходам, однако нуждается в периодическом перенесении в связи с истощением места добычи полезных ископаемых.

С учетом вышеизложенного, определяется цель настоящего исследования, направленная на выбор более эффективного, для переоборудования под топливные элементы тягового, железнодорожного подвижного состава в открытых разработках полезных ископаемых.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ эксплуатационных характеристик электровозов и тепловозов, работающих в карьере;
- выявить тип тягового подвижного состава, наиболее совместимого с использованием топливных элементов;
- сравнить эксплуатационные характеристики подвижного состава на топливных элементах с характеристиками традиционных локомотивов.

На сегодняшний день наиболее часто используемым тяговым подвижным составом, работающим в карьерах, является электровоз. Такой вид транспорта требует бесперебойного питания от электросетей, а в связи с технологией работы разреза требуется периодический монтаж, демонтаж и транспортировка контактной сети, что в свою очередь приводит к дополнительным затратам, делает его менее мобильным.

Тепловозы более мобильны и не требуют периодического перенесения контактной сети, однако они потребляют дизельное топливо, что приводит к экологической проблеме, связанной с загазованностью карьера, и дополнительным убыткам от простоя техники.

Тяговый агрегат, объединяющий положительные качества электровоза и тепловоза, способствует снижению всех расходов к минимуму, при этом решая большинство проблем железнодорожного транспорта. Решением этого вопроса, возможно, станет использование твердополимерных топливных элементов в качестве основного силового агрегата тягового подвижного состава. Наряду с этим возникает актуальная проблема выбора вида железнодорожного транспорта, переоборудование которого не вызовет чрезмерного изменения конструкции и снизит экологические и технические расходы, не ухудшая тяговые характеристики подвижного состава.

Для исследования на основании данных, приведенных в работах [2, 3, 4, 5] были рассмотрены сравнительно мощный тепловоз ТЭМ-7, имеющий возможность обслуживать открытые разработки полезных ископаемых, и наиболее распространенный промышленный электровоз ОПЭ1АМ, предназначенный для работы в карьере, мощностные характеристики которого не уступают характеристикам представителей данного класса. На основании справочных данных [2 – 4, 6] была составлена таблица, включающая сводные технико-эксплуатационные характеристики приведенных локомотивов (табл. 1).

Сводные технико-эксплуатационные характеристики тепловоза ТЭМ-7А и промышленного электровоза ОПЭ1АМ

Характеристики	Значение	
	ТЭМ-7А	ОПЭ1АМ
Мощность тяговых электродвигателей (ТЭД) / с учетом использования МД, кВт	1080	3344/ 5016
Мощность дизельного двигателя, л.с.	2000	1500
Служебный вес/ с учетом использования моторного думпкара (МД), тс	180	248/327+45(грузоподъемность)
Сила тяги при продолжительном режиме/ с учетом использования МД, кгс	30600	39422/55064
Марка дизеля/трансформатора	2-2Д49	3А-6Д49/ОДЦЭ-8000/10
Габаритные размеры дизельного двигателя, мм:		
длина	5287	3355
ширина	1920	1665
высота	2475	2305
объем, м ³	25,123	12,876
вес сухого дизельного двигателя, т	20	9,6
Тип ТЭД	ЭД-120А	ДТ-9Н
Характеристики ТЭД:		
мощность номинальная, кВт	138	418
максимально допустимая частота вращения якоря, об/мин	1820	685
напряжение при продолжительном режиме работы, В	205	1500
Удельный расход топлива (дизельный двигатель), г/кВт·ч	208 – 217	204 – 215
Расход топлива (с учетом мощности дизельного двигателя), л/ч	368 – 384	231 – 243

Сводные технико-эксплуатационные характеристики тепловоза ТЭМ-7А и промышленного электровоза ОПЭ1АМ показывают, что тяговый подвижной состав рассматриваемой марки на электрической тяге обладает более мощными ТЭД, позволяющими значительно увеличить грузоподъемность состава, что напрямую зависит от силы тяги при продолжительном режиме. Двухсекционное исполнение электровоза позволяет использовать его в нескольких режимах работы: тяговые двигатели работают от контактной сети, ТЭД работают от генератора дизельной секции. Тепловоз ТЭМ-7А обладает сравнительно более мощным 12-цилиндровым [2] дизельным двигателем. Работающая на дизельном топливе (ДТ) автономная секция ОПЭ1АМ оснащена 8-цилиндровым [2] двигателем, способным обеспечить электроэнергией (955 кВт) [2] тяговые двигатели основной секции электровоза. При использовании рассматриваемого режима работы электровоза сила тяги при продолжительном режиме снизится на 43 % (11235 кгс). Так как суммарная максимально допустимая мощность ТЭД составляет 1672 кВт, тяговые двигатели не развивают необходимое тяговое усилие, наряду с этим уменьшится максимально допустимый вес состава. Тепловоз ТЭМ-7А по сравнению с электро-

вом ОПЭ1АМ обладает минимальной скоростью продолжительного режима, при которой ТЭД работают без перегрева статорно-роторной части, позволяющей ему преодолевать затяжные подъемы с минимальным значением радиуса кривизны профиля.

Для детального сравнения эксплуатационных характеристик тепловоза и электровоза, применяющихся для работы в условиях разреза, необходимо построить диаграмму, отражающую зависимость массы брутто поезда от уклона, величина которого, в условиях карьера, изменяется от минимального (15%) до максимально допустимого значения (60%) [7].

Для составления диаграммы зависимости массы брутто поезда от уклона определим необходимость включения подталкивающего локомотива в состав, исходя из максимально допустимого продольного усилия на автосцепке при трогании (930 кН) и при движении по уклону (1275 кН) [7].

Продольное усилие, действующее на автосцепное устройство локомотива с учетом массы брутто поезда, определяется по типовым расчетам, приведенным в работе [7]. Результаты расчетов отражены на диаграмме зависимости допустимого продольного усилия на автосцепке от

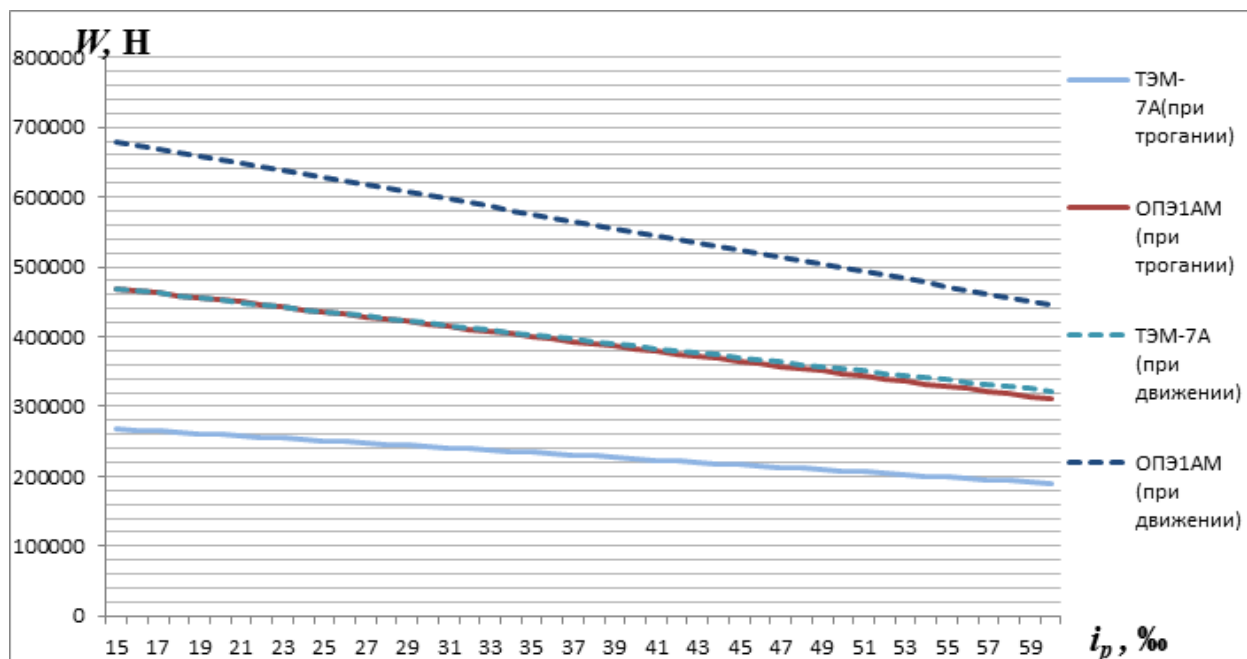


Рис. 1. Зависимость допустимого продольного усилия на автосцепке от уклона для тепловоза ТЭМ-7А и электровоза ОПЭ1АМ

уклона для тепловоза ТЭМ-7А и электровоза ОПЭ1АМ (рис. 1).

Анализ диаграммы (рис. 1) показал, что продольное усилие, действующее на автосцепное устройство локомотивов, не превышает максимально допустимых значений при трогании (930 кН) [7] и при движении по уклону (1275 кН) [7]. Использование подталкивающего локомотива

необходимо лишь в случае увеличения количества перевозимого груза.

Масса брутто поезда определяется по типовым расчетам, приведенным в работе [7]. Для расчетов используются вагоны думпкары серии 32-4079 массой 38 т и грузоподъемностью 90 т [8].

Диаграмма, отражающая зависимость массы брутто поезда от уклона (рис. 2), показывает, что

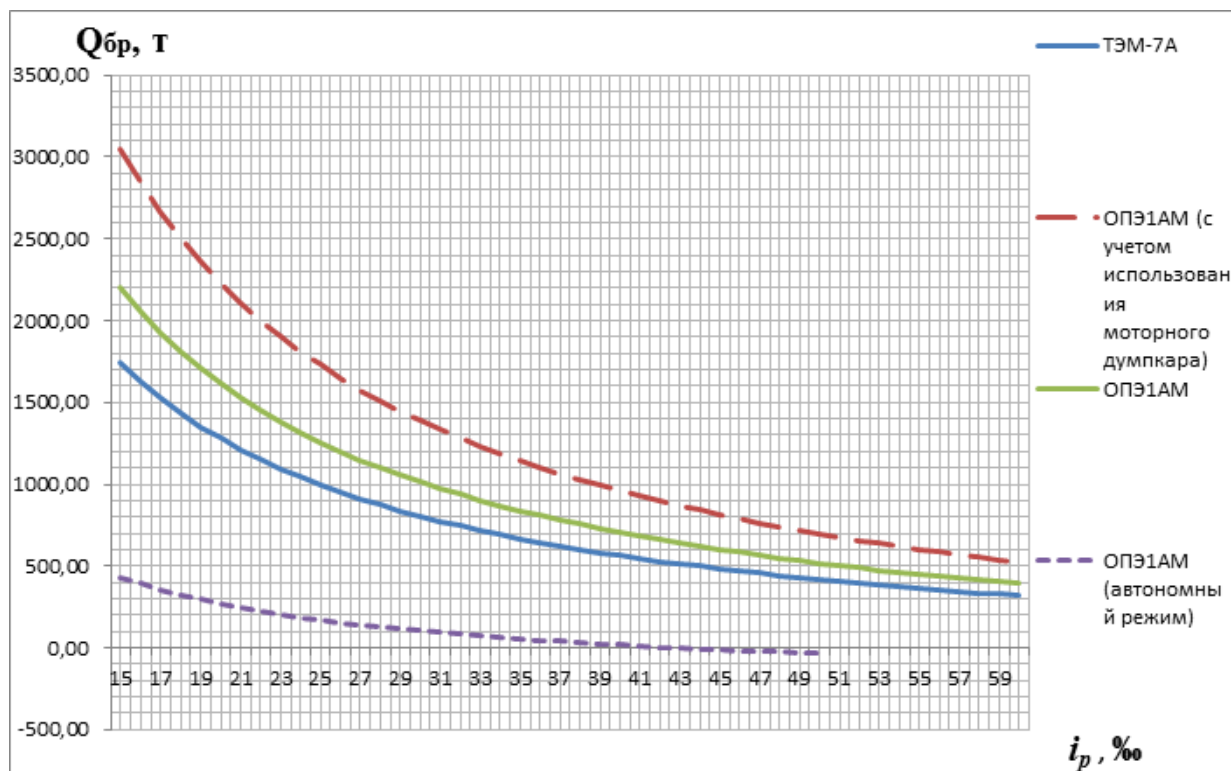


Рис. 2. Зависимость массы брутто состава от уклона для тепловоза ТЭМ-7А и электровоза ОПЭ1АМ

Т а б л и ц а 2

Эксплуатационные характеристики топливных элементов марки НурМ HD-180

Характеристики	Значение
Удельный расход топлива (0 градусов °С, 760 мм рт.ст.), м ³ /кВт·ч (кг/кВт·ч)	0,648(0,0583)
Расход топлива (учитывая мощность ТЭ), м ³ /ч (кг/ч)	128,3 (11,54)
Рабочее давление, кПа	101,3
Напряжение, В	360-720
Допустимая сила тока, А	500
Номинальная мощность, кВт	198
КПД, %	55
Рабочая температура, °С	от -40 до +65
Степень чистоты водорода, требуемая для работы ТЭ, %	99,98
Масса, т	0,654
Габаритные размеры, мм:	
длина	955
ширина	1525
высота	690
объем, м ³	1,004

тяговая подвижная единица марки ОПЭ1АМ по сравнению с ТЭМ-7А в условиях разреза может транспортировать состав с более высокой массой брутто, особенно при условии использования моторизованного думпкара. Тепловоз не имеет возможности использовать МД, так как, если учесть мощность, необходимую для работы ТЭД (1104 кВт) [2] и вырабатываемую дизельным двигателем (1491 кВт) [6], остаточной мощности 387 кВт недостаточно для работы 4-х тяговых двигателей марки ЭД-120А (138,4 кВт) [2], при этом часть этой энергии расходуется для питания систем управления. Автономная секция питания электровоза эффективна на незначительных подъемах. Предельный уклон для ОПЭ1АМ при потреблении электроэнергии от дизельного двигателя равен 42 %. Если учитывать использование одного думпкара серии 32-4079, максимально допустимое значение уклона снизится до 27 %. Автономная секция эффективна при преодолении прямых, не электрифицированных участков.

На основании анализа диаграммы зависимости массы брутто состава от уклона и сводных технико-эксплуатационных характеристик можно сделать вывод: электровоз по сравнению с тепловозом выполняет работу по транспортировке грузов наиболее эффективнее. Однако этот вид тягового подвижного состава имеет ряд недостатков, препятствующих перевозке грузов. К основным недостаткам можно отнести следующие: «косвенная мобильность» — локомотив оснащен автономной секцией, которая выделяет недостаточную мощность для работы на затяжных уклонах свыше 27 %; высокое значение

скорости продолжительного режима; необходимость перенесения контактной сети благодаря периодическому истощению мест разработки полезных ископаемых; вредные выбросы при работе в режиме питания тяговых двигателей от генератора и дизельного двигателя.

Для частичного решения вышеперечисленных проблем предлагается в качестве основного источника питания использование топливных элементов (ТЭ). Для исследования были взяты водородно-кислородные генераторы электроэнергии марки НурМ HD-180, электролит которых состоит из протонопроводящей полимерной мембраны [9]. На основании данных, приведенных в работах [9, 10], была составлена таблица, включающая эксплуатационные характеристики вышеперечисленных ТЭ (табл. 2).

Для дальнейшего сравнения локомотивов наиболее пригодных для переоборудования системы питания, на основании данных, приведенных в работах [2 – 4, 9, 10], составлена таблица, отражающая отличительные характеристики локомотивов ТЭМ-7А и ОПЭ1АМ, оснащенных вышеперечисленными топливными элементами без значительных конструктивных изменений (табл. 3).

После использования ТЭ тяговые подвижные единицы стали обладать общими отличительными достоинствами, но учитывая силу тяги при продолжительном режиме как основную сравнительную характеристику, электровоз ОПЭ1АМ является наиболее подходящим карьерным локомотивом для использования топливных элементов в качестве основного источника питания.

Т а б л и ц а 3

Отличительные характеристики локомотивов ТЭМ-7А и ОПЭ1АМ, оборудованных топливными элементами марки НурМ HD-180

Характеристики	Значение	
	ТЭМ-7А	ОПЭ1АМ
Мобильность	+	+
Вредные выбросы	-	-
Необходимость использования контактной сети	-	-
Суммарная мощность ТЭ, кВт	1386	3366
Количество ТЭ соответствующей марки, шт	7	17
Сила тяги при продолжительном режиме/ с учетом использования МД, кгс	30600	39422/55064
Служебный вес/ с учетом использования моторного думпкара (МД), т·с	500	246,25/370,25
Расход топлива с учетом мощности локомотива, м ³ /ч (кг/ч)	699,84(62,98)	2166,91(195,02)

При переоборудовании ОПЭ1АМ с незначительными конструктивными изменениями возможен демонтаж дизельного двигателя автономной секции питания и использование освобожденного пространства для топливных элементов. Учитывая объем ДВС (12,876 м³) и топливных элементов НурМ HD-180 (1,004 м³), можно предположить, что количество ТЭ рассматриваемой марки составит 12 единиц, свободно вписывающихся в пространство демонтированного дизеля. Вырабатываемая мощность автономной секции составит 2376 кВт, а служебный вес снизится на 1,752 т. Для работы ТЭД электровоза, без учета использования моторизованного думпкара (МД), необходимо 3344 кВт, следовательно, полноценная эксплуа-

тация локомотива возможна при использовании дополнительных пяти топливных элементов марки НурМ HD-180. Размещение ТЭ возможно в головной секции (ГС) локомотива вместо тягового трансформатора, объем которого составляет 12,76 м³, соответственно количество ТЭ, которые возможно разместить вместо ОДЦЭ-8000/10, без нарушения конструктивных особенностей локомотива, составит 12 единиц, при этом служебный вес снизится на 40 грамм. Для детального исследования особенностей электровоза ОПЭ1АМ, оборудованного ТЭ, составлена таблица на основании работ [2, 4, 11], отражающая варианты компоновки локомотива топливными элементами НурМ HD-180 и их характеристики (табл. 4). Перечисленные в табл. 4

Т а б л и ц а 4

Характеристики и варианты компоновок топливными элементами НурМ HD-180 локомотива ОПЭ1АМ

Варианты компоновок секций локомотива	Характеристики					
	Суммарная мощность ТЭ, кВт	Общее количество ТЭД ДТ-9Н	Общая мощность, необходимая для работы ТЭД, кВт	Служебный вес состава, т·с	Сила тяги при продолжительном режиме, кгс	Расход топлива с учетом мощности локомотива, м ³ /ч
12 ТЭ (автономная секция) + 5 ТЭ (головная секция)	3366	8	3344	246,25	39422	2166,9
12 ТЭ (АС) + 10 ТЭ (ГС) + (моторизованный думпкар 80 % мощности)	4752	12	4681	370,25	51935	3033,3
Использование двух автономных секций содержащих по 12 ТЭ в каждой + 2 ТЭ (ГС)	5148	12	5016	368,5	55064	3250,4
12 ТЭ (АС)×2 + 10 ТЭ (ГС) + (МД 100% мощности)	6732	16	6688	492,5	73418	4333,8

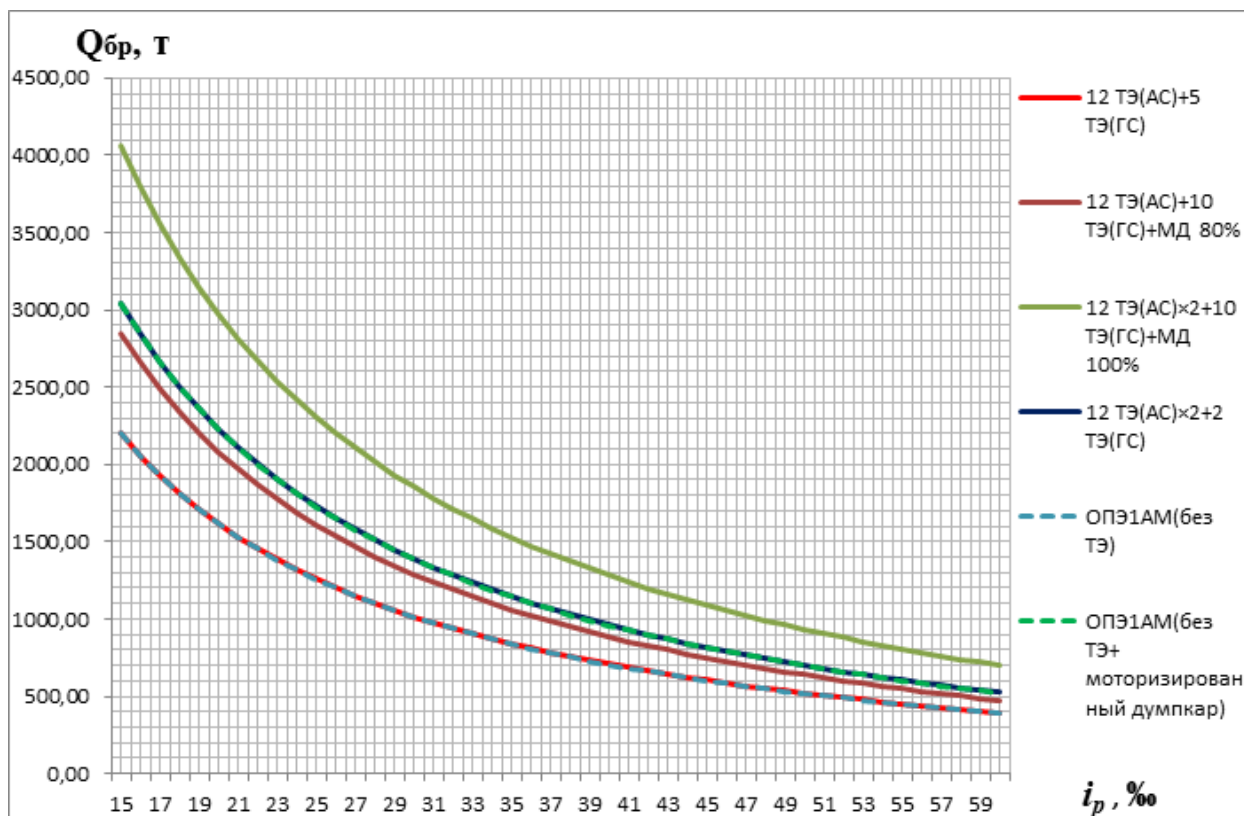


Рис. 3. Зависимость массы брутто состава от уклона для электровоза ОПЭ1АМ и видов его компоновки ТЭ НуРМ HD-180

виды размещения ТЭ тягового подвижного состава составлены с учетом требуемой мощности для работы ТЭД, максимально допустимого объема тягового трансформатора основной части локомотива и габаритов дизельного двигателя автономной секции (АС) питания.

В целях детального сравнения эксплуатационных характеристик вариантов компоновки ТЭ НуРМ HD-180 электровоза ОПЭ1АМ, на основании данных, приведенных в табл. 4, составлена диаграмма, отражающая зависимость массы брутто поезда от уклона, величина которого в условиях карьера изменяется от минимального 15‰ [7] до максимально допустимого значения 60‰ [7] (рис. 3). Масса брутто поезда определяется по типовым расчетам, приведенным в работе [7]. Для расчетов используется вагоны думпкары серии 32-4079 массой 38 т и грузоподъемностью 90 т [8].

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод, что после переоборудования электровоза ОПЭ1АМ топливными элементами НуРМ HD-180, тяговые характеристики практически не изменятся. Однако если сравнить максимально допустимую массу брутто состава, питающегося от контактной сети и использующего моторизированный думпкар, с аналогичной компоновкой на топливных элементах, можно выявить, что мощность МД будет ис-

пользоваться на 80 %. Для того, чтобы три секции электровоза, использующего ТЭ, работали на 100 %, возможно использование двух автономных секций.

Для определения экономического эффекта от переоборудования локомотива ОПЭ1АМ топливными элементами НуРМ HD-180 на основании работ [6, 12 – 14] составлена таблица расхода топлива (табл. 5), в которой приведены возможные затраты на энергоресурсы для работы рассматриваемого выше электровоза и его модификаций на топливных элементах. Расчет стоимости потребленного водорода проведен с учетом использования уравнения Менделеева – Клапейрона и цены на баллон 40 л водорода ГОСТ 9909-81 [10, 13, 15] (не рассматривая расходы на емкость). Стоимость дизельного топлива принята с учетом средней цены рассматриваемого энергоресурса в Кемеровской области на 11 апреля 2017 г. Необходимое количество ДТ, электровоза ОПЭ1АМ, не использующего ТЭ, рассчитано с учетом удельного расхода и общей мощности, необходимой для работы ТЭД на 100 %. Для сравнения затрат на топливо, используемого для работы локомотива от автономной секции, в табл. 5 приведен эквивалент, работающий от топливных элементов с учетом допустимой мощности АС.

Т а б л и ц а 5

Расход топлива электровоза ОПЭ1АМ и его модификаций на топливных элементах

Вид модификации локомотива		Общая мощность, необходимая для работы ТЭД, кВт	Вид топлива	Требуемое количество топлива		Стоимость, руб/ч
				Ед. измерения	Значение	
ОПЭ1АМ с использованием ТЭ	12 ТЭ (АС) + 5 ТЭ (ГС)	3344	Водород газообразный технический марка А ГОСТ 3022-80 (степень чистоты водорода 99,99 %)	м ³ /ч (кг/ч)	2166,9 (195)	2668,98
	12 ТЭ (АС) + 10 ТЭ (ГС) + (МД 80% мощности)	4681			3033,3 (272,97)	3736,13
	12 ТЭ (АС)×2 + 2 ТЭ (ГС)	5016			3250,4 (292,51)	4003,53
	12 ТЭ (АС)×2 + 10 ТЭ (ГС) + (МД 100% мощности)	6688			4333,8 (390)	5337,96
	ГС+5 ТЭ (АС) (57% мощности ГС)	955			618,84 (55,69)	762,22
ОПЭ1АМ без использования ТЭ	ГС+АС	3344	Эл.энергия (по среднесуточному тарифу)	кВт·ч	3344	13810,72
			Дизельное топливо (ср.значение)	л/ч	829	29520,69
	ГС+АС+МД	5016	Эл.энергия (по среднесуточному тарифу)	кВт·ч	5016	20716,08
			Дизельное топливо (ср.значение)	л/ч	1244	44298,84
	Работа локомотива от дизельной секции (57% мощности ГС)	955	Дизельное топливо (ср.значение)	л/ч	237	8439,57

Детальное отражение расхода топлива локомотива ОПЭ1АМ приведена на диаграмме (рис. 4) зависимости стоимости эксплуатации электровоза от мощности для различных видов топлива, составленной на основании удельного расхода энергоресурсов и данных табл. 5. Значение мощности варьируются от минимально допустимой (работа локомотива от автономной секции) до максимальной (головная секция + 2 автономных секции + моторизированный думпкар) (табл. 5).

Анализируя полученные данные, приведенные в табл. 5 и на рис. 4, можно сделать вывод, что использование ТЭ марки НуРМ HD-180 позволит сократить затраты на электроэнергию, питающую локомотив ОПЭ1АМ, в пять раз, а расходы на дизельное топливо практически в 11 раз. При этом использование топливных элементов значительно не изменяет тяговых характеристик, не увеличивая общий вес электровоза и не изменяя конструкции (табл. 1 и табл. 4).

Выводы. Локомотив ОПЭ1АМ, оборудованный топливными элементами НуРМ HD-180, использует возобновляемые энергоресурсы, при

этом не выделяет вредных выбросов, что позволяет снизить количество периодических остановок работы карьера от чрезмерной загазованности и сократить убытки от простоя техники. Рассматриваемый электровоз на ТЭ не нуждается в использовании контактной сети, что делает его более мобильным без снижения тяговых характеристик, при этом сокращаются периодические расходы на содержание и перемещение системы питания локомотива, вызванное истощением мест разработки полезных ископаемых. Возможность изменения количества последовательно и параллельно включенных топливных элементов тягового подвижного состава, позволяет изменять выходное напряжение без потери мощности, что обеспечивает плавную регулировку скоростных качеств локомотива, не снижая его тяговых характеристик. Использование ТЭ НуРМ HD-180 в локомотиве ОПЭ1АМ способствует снижению расходов на потребление электроэнергии в пять раз, использование дизельного топлива в 11 раз. Электровоз на топливных элементах использует возобновляемые источники энергии.

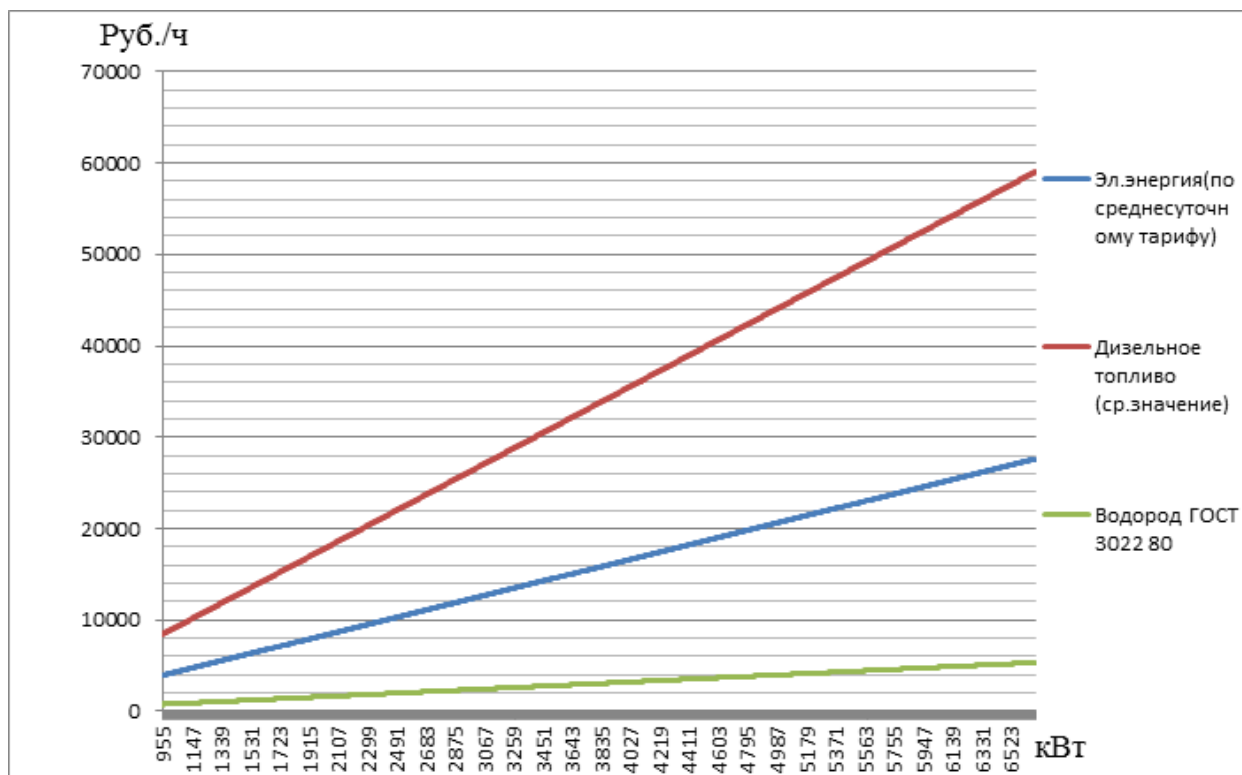


Рис. 4. Зависимость стоимости эксплуатации локомотива ОПЭ1АМ от мощности для различных энергоресурсов

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тарасов П.И., Журавлев А.Г., Фелелов Е.В., Фурин В.О., Ворошилов А.Г., Тарасов А.П., Бабаскин С.Л. Сокращение загазованности карьерного пространства при применении новых видов карьерного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 2. С. 260 – 271.
2. Залит Н.Н. Тепловозы промышленного транспорта: Справочник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1980. – 366 с.
3. Раков В.А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза (1966 – 1975 гг.). – М.: Транспорт, 1979. – 213 с.
4. Потапов М.Г. Карьерный транспорт: Учеб. для горн. спец. техникумов. – М.: Недра, 1985. – 239 с.
5. Кравчук В.В., Понявкин Д.Ю. Методика обнаружения и устранения неисправностей дизель-генераторов типа Д49 в процессе эксплуатации и ремонта: Учебное пособие. – Хабаровск: изд. ДВГУПС, 2002. – 94 с.
6. Сырбаков А.П., Корчуганова М.А. Топливо и смазочные материалы: учебное пособие. – Томск: изд. Томского политехнического университета, 2015. – 159 с.
7. Кузьменко С.В., Чередниченко С.П., Игнатьев О.Л. Железнодорожные транспортные средства: Практикум. – Луганск: Ноулидж, 2012. – 120 с.
8. 4-осный вагон-самосвал, модель 32-4079: [Электронный ресурс] // RailAgent железнодорожная транспортная биржа. URL: <http://railagent.ru/manuals/wagon-31846/>. (Дата обращения: 05.04.2017).
9. HyPM HD180: [Электронный ресурс] // Hydrogenics. URL: <http://pdf.directindustry.com/pdf/hydrogen-systems/hypm-hd180/14703-316895.html/>. (Дата обращения: 04.04.2017).
10. Краснораменский В.И. Топливные элементы для повышения эффективности ТЭС и НПП // Энергосовет. 2013. № 5(30). С. 43 – 47.
11. Силовой трансформатор ОДЦЭ, ОНДЦЭ 10 КВ – ЧТЗ: [Электронный ресурс] // РосЭнергоХолдинг Инновации. Технологии. Успех. Пермь. – URL: <http://www.rosenergoholding.ru/catalog/transformatorysilovie.html?podcatalog=64&product=1107/>. (Дата обращения: 05.04.2017).
12. Каких тарифов на электроэнергию ожидать предприятиям России в 2017 году?: [Электронный ресурс] // ENERGYLOGIA Энергоэффективные решения для дома и бизнеса. – URL: <http://energylogia.com/business/jekonomija-jelektroenergii/tarify-na-jelektroenergiju-dlja-predpriyatij-rossii-2017.html/>. (Дата обращения: 08.04.2017).
13. Водород газообразный технический марки А: [Электронный ресурс] // НИИ КМ 2000-2017. URL: http://www.niikm.ru/products/hydrogen/hydrogen_40/. (Дата обращения: 08.04.2017).
14. Цены на бензин, ДТ, газ в Кемеровской области: [Электронный ресурс] // Цены на бензин и карта АЗС России. – URL: https://www.benzin-price.ru/price.php?region_id=42
15. <http://pkvolga.ru/vodorodni-ballon-40/>. (Дата обращения: 08.04.2017).

© 2018 г. О.В. Шугаев, Т.П. Воскресенская
Поступила 10 сентября 2018 г.