

УДК 621.833.3

DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-24-28

В. Н. Анферов, доктор технических наук, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск
А. П. Ткачук, кандидат технических наук, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск
А. В. Зайцев, аспирант, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск

РАСЧЕТ РЕСУРСА СПИРОИДНОГО РЕДУКТОРА В ПРИВОДЕ КАБЕЛЕСБОРОЧНОГО МЕХАНИЗМА ЭЛЕКТРОПОГРУЗЧИКА

Погрузчики различных типов получили широкое распространение в промышленности, на транспорте, в строительстве и горном производстве при проведении погрузочно-разгрузочных работ. Одним из самых распространенных видов являются универсальные электропогрузчики грузоподъемностью 0,8...3 тонн с приводом от аккумуляторных батарей. Наиболее часто их используют для погрузочных и разгрузочных работ в крытых складских помещениях с расстоянием транспортировки 100...120 м.

При многих положительных качествах аккумуляторных электропогрузчиков они имеют ограниченную энергоемкость (6...8 ч), что вызывает необходимость частой подзарядки аккумуляторных батарей. Для этой цели оборудуются специальные помещения, в которых используются зарядные станции, обслуживаемые квалифицированными специалистами. Содержание таких помещений и обслуживающего персонала, а также периодическое приобретение новых аккумуляторных батарей требует больших материальных затрат. Кроме того, в течение смены аккумуляторные батареи не обеспечивают постоянных параметров тока, поэтому характеристики электроприводов погрузчика в конце смены существенно отличаются от паспортных данных; в результате снижается производительность машин. При температуре ниже $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ вообще невозможна длительная эксплуатация электропогрузчиков с аккумуляторным питанием [1–4].

В связи с этим одним из направлений повышения эффективности работы электропогрузчиков, особенно в регионах страны с холодным климатом, является перевод их на кабельное питание от промышленной сети переменного тока напряжением 380 В. На кафедре «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины» Сибирского государственного университета путей сообщения разработан и реализован вариант модернизации универсальных электропогрузчиков с целью их перевода на кабельное питание.

Комплект оборудования, используемый при модернизации, состоит из устройства подвода электроэнергии 1, источника питания погрузчика 2 и кабелесборочного механизма 3 (рис. 1) [5, 6].

Устройство подвода электроэнергии представляет собой кабельшторную подвеску, токосъемный узел и устройство электрозащиты, а источник питания – блок из трансформатора и преобразователя тока.

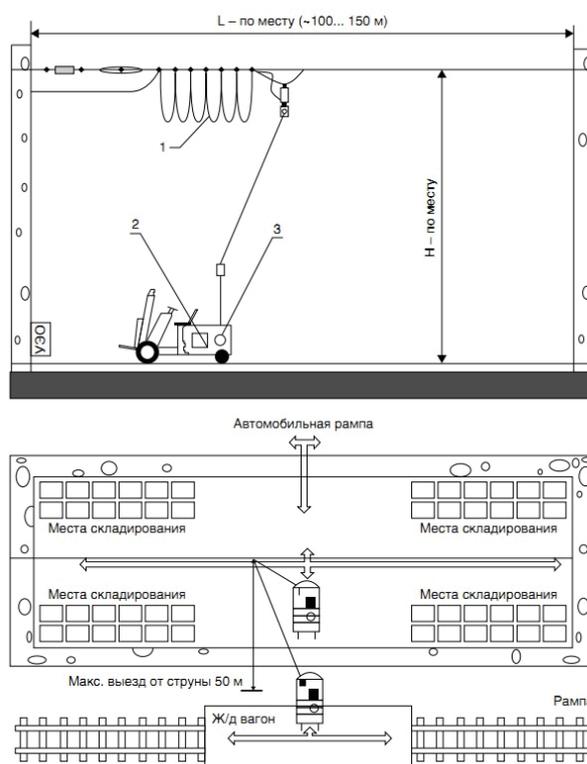


Рис. 1. Комплект оборудования для модернизации универсального электропогрузчика и технология производства работ [7–9]

Кабелесборочный механизм (рис. 2) состоит из барабана с токосъемным устройством и спирального мотор-редуктора. Конструкция механизма защищена патентом [10]. Его работа осуществляется следующим образом. При включении электродвигателя мотор-редуктора вращение через дисковую фрикционную муфту передается на вал кабелесборочного механизма, сблокированного с токосъемным узлом.

Вращение вала с барабаном одностороннее, только на натяжение (подмотку) кабеля. Кабель, проходя через кабель-водило, флюгер, наматывается на барабан. Передача электроэнергии к источнику питания осуществляется через токосъемный узел. Электродвигатель кабелесборочного устройства включается одновременно с двигателем механизма передвижения погрузчика. В соответствии с режимом работы электропогрузчика в предложенном варианте кабель наматывается и сматывается с постоянной частотой вращения барабана, но разным по величине вра-

цающим моментом из-за изменения усилия натяжения кабеля независимо от направления и скорости движения погрузчика. Во время работы электропозрузчика в процессе ожидания и захвата груза, а также в процессе правки и укладки груза возможны рывки кабеля при трогании с места и на разворотах, что приводит к созданию максимального усилия натяжения кабеля и максимального вращающего момента T_{max} , превышение которого приводит к пробуксовыванию фрикционной муфты. При передвижении электропозрузчика с грузом и без груза кабель наматывается с минимальным вращающим моментом $T_{min} = 0,55T_{max}$. Исключается также значительное провисание кабеля и обеспечивается плавное вращение барабана (рис. 3, табл.).

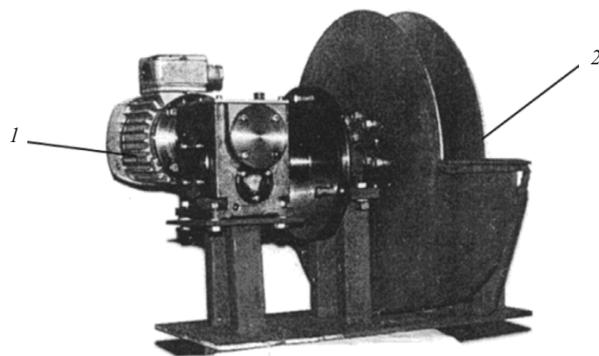


Рис. 2. Общий вид кабелесборочного механизма [11]: 1 – спиральный мотор-редуктор; 2 – барабан с токосъемным устройством

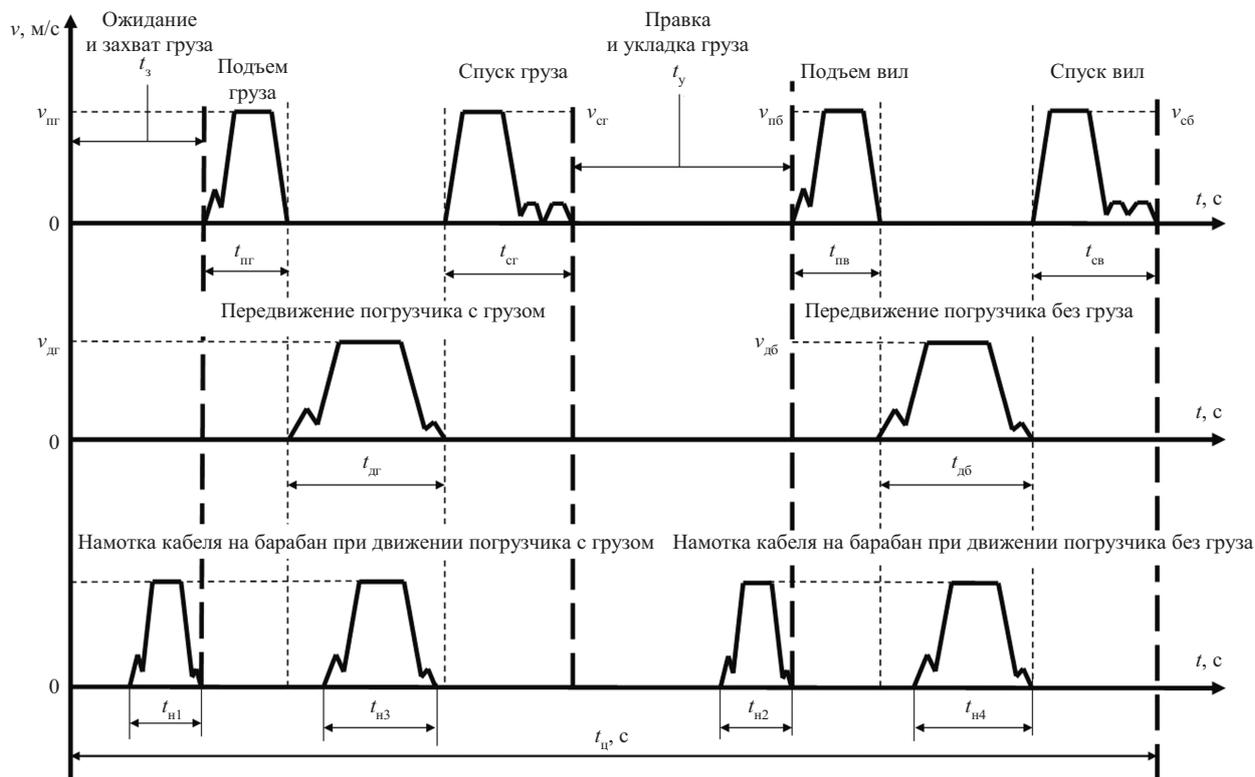


Рис. 3. Усредненная расчетно-экспериментальная тахограмма рабочего цикла электропозрузчика: $v_{пг}$, $v_{сг}$ – скорость подъема и спуска груза; $v_{пб}$, $v_{сб}$ – скорость подъема и спуска вил; $v_{др}$, $v_{дб}$ – скорость передвижения электропозрузчика с грузом и без груза

Результаты анализа параметров усредненной расчетно-экспериментальной тахограммы рабочего цикла электропозрузчика

Название параметра рабочего цикла	Обозначение	Размерность	Значение
Время подъема вил с грузом	$t_{пг}$	с	9
Время спуска вил с грузом	$t_{сг}$	с	6
Время движения погрузчика с грузом	$t_{др}$	с	63
Время подъема вил без груза	$t_{пб}$	с	7
Время спуска вил без груза	$t_{сб}$	с	5
Время движения погрузчика без груза	$t_{дб}$	с	63
Вспомогательное время	$t_{всп}$	с	130
Время ожидания и захват груза	t_3	с	50
Время правки и укладки груза	t_y	с	80
Время рабочего цикла погрузчика	$t_{ц}$	с	283
Время намотки кабеля на барабан и работы кабелесборочного механизма с минимальным рабочим вращающим моментом T_{min} в процессе движения погрузчика с грузом на длине участка 50 м	$t_{н3}$	с	45

Окончание таблицы

Название параметра рабочего цикла	Обозначение	Размерность	Значение
Время намотки кабеля на барабан и работы кабелесборочного механизма с минимальным рабочим вращающим моментом T_{\min} в процессе движения погрузчика без груза на длине участка 50 м	$t_{н4}$	с	45
Время намотки кабеля на барабан и работы кабелесборочного механизма с максимальным рабочим вращающим моментом T_{\max} в процессе ожидания, захвата груза	$t_{н1}$	с	5
Время намотки кабеля на барабан и работы кабелесборочного механизма с максимальным рабочим вращающим моментом T_{\max} в процессе правки, укладки груза	$t_{н2}$	с	5
Время действия максимального рабочего вращающего момента T_{\max} на барабане кабелесборочного механизма за цикл его работы	t_1	с	10
Время действия минимального рабочего вращающего момента T_{\min} на барабане кабелесборочного механизма за цикл его работы	t_2	с	90
Суммарное время действия максимальных и минимальных рабочих вращающих моментов на барабане кабелесборочного механизма за цикл его работы	t_{Σ}	с	100
Относительное время действия максимального рабочего вращающего момента T_{\max} на барабане кабелесборочного механизма за цикл его работы	t_1/t_{Σ}		0,1
Относительное время действия минимального рабочего вращающего момента T_{\min} на барабане кабелесборочного механизма за цикл его работы	t_2/t_{Σ}		0,9
Максимальное значение рабочего вращающего момента на валу редуктора кабелесборочного механизма	T_{\max}	Н·мм	30000
Минимальное значение рабочего вращающего момента на валу редуктора кабелесборочного механизма	T_{\min}	Н·мм	16500

Модернизированные электропогрузчики нашли применение на предприятиях Новосибирска и Новосибирской области, таких как «Пассим», «Пассим-Фуд», «Аллегро», «Ланселот-Строй», «Колорлон», «Борисо», «Церера», «Кора», «Мускан», «Монитор», «Химлекснаб», «Амика», «Новосибирск ЦветМет», «Посуда Центр», «Новосибирская шоколадная фабрика», «Купинский Элеватор», «Карасукский хлебокомбинат» и др.

Последние полвека в различных областях техники используются спироидные передачи, которые относятся к червячному типу [12].

Важным достоинством спироидных передач является их большая износостойкость по сравнению с червячными передачами. Это объясняется большим коэффициентом перекрытия, большим значением приведенных радиусов кривизны контактирующих поверхностей в общем нормальном сечении, лучшим для образования жидкостного трения расположением контактных линий и меньшими значениями скорости скольжения. Этому, кроме того, способствуют и повышенные значения скоростей движения контактных точек по зацепляющимся поверхностям, что приводит к более быстрому выводу из зоны контакта участков рабочих поверхностей витков и зубьев колес, меньшему их нагреву и, следовательно, уменьшению опасности заедания [13].

Спироидные передачи и редукторы стали всё шире применять не только в США и России, но и в Англии, Канаде, Японии, Италии, Австрии и Германии [14].

За рубежом спироидные передачи применяют в станкостроении, военной технике, судовых механизмах, механизмах сельскохозяйственных машин, приводах электроинструментов, подъемно-транспортных устройствах и редукторах общего назначения. Компания Gilman Engineering (США), например, эффективно использовала спироидные передачи в приводах автоматической станочной линии. Фирма Vickers (США) применила спироидные передачи

в подъемниках серийно выпускаемых вертолетов. Применение спироидных передач позволило повысить надежность подъемников и увеличить их производительность в полтора раза. Компания The Duuf Norton (США), применив спироидные передачи в таялах, заменила одной спироидной парой многорядные цилиндрические передачи, резко снизив металлоемкость изделий и стоимость их изготовления.

В России координирующим научным и техническим центром по спироидным передачам является Институт механики Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова и УНПЦ «Механик», в которых ведутся теоретические исследования, опытно-конструкторские работы и осуществляется производство спироидных редукторов и мотор-редукторов различного назначения [15].

Среди зарубежных компаний лидером по производству и исследованию спироидных передач является компания ITW Heartland ILLINOIS TOOL WORKS (США), продукция которой применяется в аэрокосмической, военной, промышленной областях и робототехнике [16].

Применение спироидного мотор-редуктора [17, 18] в приводе барабана позволило значительно уменьшить габаритные размеры, а также обеспечить плавность в работе кабелесборочного механизма. На рис. 4 представлена спироидная передача редуктора кабелесборочного механизма.

На рис. 5, а представлен график переменного режима нагружения кабелесборочного механизма в соответствии с конкретными условиями эксплуатации электропогрузчика, усредненной тахограммой и расчетами по формулам таблицы. На рис. 5, б представлен график постоянного режима нагружения кабелесборочного механизма, который учитывается при расчете ресурса зубчатых передач в настоящее время специалистами на этапе проектирования кабелесборочного механизма.



Рис. 4. Спироидная передача редуктора кабелесборочного механизма [19]

Суммарная величина износа зуба спироидного колеса редуктора кабелесборочного механизма за цикл его работы при переменном графике нагружения кабелесборочного механизма (рис. 5, а)

$$h_{\Sigma} = h_1 + h_2, \quad (1)$$

где h_1 – величина износа зуба спироидного колеса редуктора кабелесборочного механизма за цикл его работы, соответствующая максимальному рабочему вращающему моменту T_{\max} и продолжительностью его действия t_1 , мм;

$$h_1 = 2,25 J_{h1} \sqrt{w_{\max} \eta \rho_{12}} \frac{V_{SY2}}{V_{FY2}} n_2 z \left(\frac{t_1}{60} \right), \quad (2)$$

где $J_{h1} = 0,7 \cdot 10^{-8}$ – экспериментально определенное значение интенсивности изнашивания материала спироидного колеса редуктора кабелесборочного механизма за цикл его работы, соответствующая максимальному рабочему вращающему моменту T_{\max} ; $w_{\max} = 632$ Н/мм – удельная расчетная сила в зацеплении, соответствующая максимальному рабочему вращающему моменту T_{\max} на барабане кабелесборочного механизма и времени его действия t_1 за цикл его работы и работе правыми поверхностями витков червяка; $\eta = 1,4 \cdot 10^{-5}$ мм²/Н – упругая постоянная соприкасающихся звеньев; $\rho_{12} = 18$ мм – приведенный радиус кривизны в расчетной точке кон-

такта зубьев колеса для правого делительного осевого угла профиля витков; $V_{SY2} = 3148$ мм/с – скорость скольжения в расчетных точках профиля зубьев колеса; $V_{FY2} = 261$ мм/с – окружная скорость в расчетных точках профиля зубьев колеса; t_1 – время действия максимального рабочего вращающего момента T_{\max} на барабане кабелесборочного механизма за цикл его работы в соответствии с таблицей, с; $z = 1$ – число зон зацепления с рассматриваемым зубчатым колесом; $n_2 = 59$ мин⁻¹ – номинальная частота вращения выходного вала;

$$h_1 = 2,25 \cdot 0,7 \cdot 10^{-8} \sqrt{632 \cdot 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 18} \times \frac{3148}{261} \cdot 59 \cdot 1 \cdot \left(\frac{10}{60} \right) = 0,75 \cdot 10^{-6} \text{ мм};$$

h_2 – величина износа зуба спироидного колеса редуктора кабелесборочного механизма за цикл его работы, соответствующая минимальному рабочему вращающему моменту T_{\min} и продолжительностью его действия t_2 , мм;

$$h_2 = 2,25 J_{h2} \sqrt{w_{\min} \eta \rho_{12}} \frac{V_{SY2}}{V_{FY2}} n_2 z \left(\frac{t_2}{60} \right), \quad (3)$$

где $J_{h2} = 0,55 \cdot 10^{-8}$ – экспериментально определенное значение интенсивности изнашивания материала спироидного колеса редуктора кабелесборочного механизма за цикл его работы, соответствующая минимальному рабочему вращающему моменту T_{\min} ; $w_{\min} = 342$ Н/мм – удельная расчетная сила в зацеплении, соответствующая минимальному рабочему вращающему моменту T_{\min} на барабане кабелесборочного механизма и времени его действия t_2 за цикл его работы и работе правыми поверхностями витков червяка; t_2 – время действия минимального рабочего вращающего момента T_{\min} на барабане кабелесборочного механизма за цикл его работы в соответствии с таблицей, с;

$$h_2 = 2,25 \cdot 0,55 \cdot 10^{-8} \sqrt{342 \cdot 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 18} \times \frac{3148}{261} \cdot 59 \cdot 1 \cdot \left(\frac{90}{60} \right) = 3,88 \cdot 10^{-6} \text{ мм}.$$

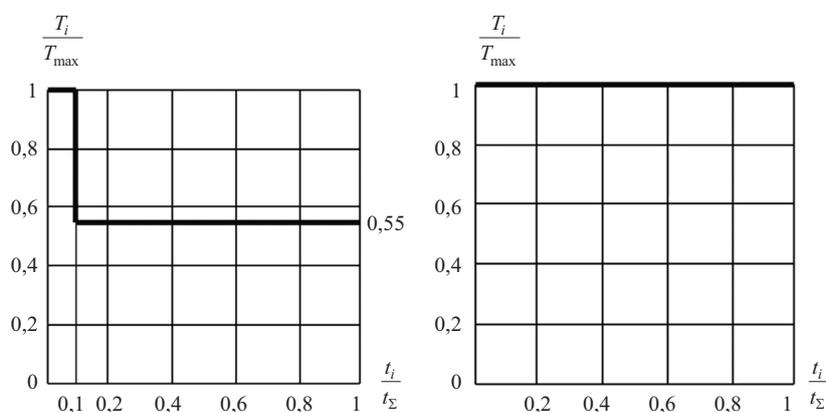


Рис. 5. Графики режимов нагружения кабелесборочного механизма: а – переменный режим нагружения; б – постоянный режим нагружения

Число циклов работы кабелесборочного механизма до предельно допустимого износа зубьев спироидного колеса $[h_2] = 1,11$ мм:

$$N_{\Sigma} = \frac{[h_2]}{h_1 + h_2} = \frac{1,11}{0,75 \cdot 10^{-6} + 3,88 \cdot 10^{-6}} = 239741 \text{ цикл.}$$

Прогнозируемый ресурс спироидной передачи кабелесборочного механизма с заданным графиком переменного нагружения:

$$L = \frac{N_{\Sigma} t_{\Sigma}}{3600} = \frac{239741 \cdot 100}{3600} = 6660 \text{ ч,}$$

где t_{Σ} – суммарное время действия максимальных и минимальных рабочих вращающих моментов на барабане кабелесборочного механизма за цикл его работы, с.

Величина износа зуба спироидного колеса редуктора кабелесборочного механизма за цикл его работы, соответствующая максимальному рабочему вращающему моменту T_{\max} и продолжительностью его действия $t_1 = t_2 = 100$ с, при непрерывном графике нагружения кабелесборочного механизма по формуле (2):

$$h_1 = 2,25 \cdot 0,7 \cdot 10^{-8} \sqrt{632 \cdot 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 18} \times \\ \times \frac{3148}{261} \cdot 59 \cdot 1 \cdot \left(\frac{100}{60} \right) = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ мм.}$$

Число циклов работы кабелесборочного механизма до предельно допустимого износа зубьев спироидного колеса $[h_2] = 1,11$ мм при непрерывном графике нагружения кабелесборочного механизма:

$$N_{\Sigma} = \frac{[h_2]}{h_1} = \frac{1,11}{7,5 \cdot 10^{-6}} = 148000 \text{ циклов.}$$

Прогнозируемый ресурс спироидной передачи кабелесборочного механизма с заданным непрерывным графиком нагружения:

$$L = \frac{N_{\Sigma} t_{\Sigma}}{3600} = \frac{148000 \cdot 100}{3600} = 4111 \text{ ч.}$$

Выводы

1. Предложена методика расчета ресурса спироидной передачи кабелесборочного механизма с учетом переменного режима нагружения и интенсивности изнашивания активных поверхностей звеньев.

2. Приведен пример сравнительного расчета ресурса спироидной передачи при переменном и постоянном режимах нагружения. Учет переменного режима нагружения кабелесборочного механизма позволяет с большей точностью прогнозировать ресурс (долговечность) спироидной передачи.

3. Одним из важнейших результатов выполненной работы является то, что ресурс кабелесборочного механизма зависит от правильной оценки режима работы электропогрузчика. На основе анализа как результатов экспериментальных исследований, так

и результатов расчета (см. таблицу) было получено, что прогнозируемый ресурс спироидного мотор-редуктора кабелесборочного механизма с режимом работы переменного нагружения на 2549 ч выше, чем ресурс с режимом постоянного нагружения.

4. Полученные результаты позволят на этапе проектирования кабелесборочного механизма более точно прогнозировать ресурс спироидного мотор-редуктора с учетом режима нагружения, а также условий эксплуатации электропогрузчика.

Библиографические ссылки

1. *Мачульский И. И.* Погрузочно-разгрузочные машины : учебник для вузов железнодорожного транспорта. – М. : Желдориздат, 2000. – 476 с.
2. Погрузчики : справочник / Г. П. Ефимов, Е. А. Алевин, М. А. Зискин, Я. Г. Коковский, И. И. Мачульский ; под ред. Г. П. Ефимова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1989. – 240 с.
3. *Мачульский И. И., Алевин Е. А.* Машины напольного безрельсового транспорта. – М. : Машиностроение, 1982. – 232 с. : ил.
4. Электропогрузчик ЭП-103К. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М., 1982. – 84 с.
5. *Анферов В. Н.* Модернизация электропогрузчика ЭП-103К. Совершенствование средств механизации путей, строительных и погрузочно-разгрузочных работ / под ред. д-ра техн. наук, проф. Б. Н. Смоляницкого. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2001. – С. 89–91.
6. Экономическое обоснование применения на железнодорожном транспорте электропогрузчиков с кабельным питанием / В. Н. Анферов, А. П. Ткачук, И. В. Сергеева, А. В. Зайцев // Экономика железных дорог. – 2013. – № 4. – С. 85–94.
7. *Анферов В. Н.* Указ. соч.
8. Экономическое обоснование применения на железнодорожном транспорте электропогрузчиков с кабельным питанием.
9. Патент РФ № 33350. Кабелесборочное устройство для питания электропогрузчиков / В. Н. Анферов, С. В. Картавых, А. П. Ткачук, В. В. Хлопин, А. Э. Черных. – Оpubл. в БИ. – 2003. – № 29.
10. Патент РФ № 33350. Кабелесборочное устройство для питания электропогрузчиков.
11. Там же.
12. *Анферов В. Н.* Указ. соч.
13. 8. Спироидные редукторы трубопроводной арматуры / В. И. Гольдфарб, Д. В. Главатских, Е. С. Трубаев, А. С. Кузнецов, Е. В. Лукин, Д. Е. Иванов, В. Ю. Пузанов. – М. : Вече, 2011. – 222 с. : ил.
14. *Анферов В. Н.* Указ. соч.
15. Спироидные редукторы трубопроводной арматуры.
16. *Анферов В. Н.* Указ. соч.
17. Модернизированные электропогрузчики с кабельным питанием от промышленной сети напряжением 380 В / В. Н. Анферов, А. П. Ткачук, И. В. Сергеева, Ю. В. Корнеев, А. В. Кузьмин // Механизация строительства. – 2011. – № 12. – С. 2–4.
18. *Анферов В. Н., Ковальков А. А.* Результаты исследований КПД редукторов с цилиндрической спироидной передачей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2006. – № 6. – С. 106–110.
20. *Анферов В. Н.* Указ. соч.