

ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДВУХВЕНЦОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СПИРОИДНОЙ ПЕРЕДАЧИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОРТА СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ

Анферов В.Н., Игнатьюгин В.Ю.

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск

Ключевые слова: двухвенцовая цилиндрическая спироидная передача, редуктор, смазочное масло, испытательный стенд, натурные испытания, интенсивность изнашивания, ресурс.

Аннотация. В статье приведены сведения о цилиндрических спироидных передачах: одно- и двухвенцово-цилиндрической. Отмечено преимущество двухвенцово-цилиндрической спироидной передачи в сравнении с одновенцово-цилиндрической по нагрузочной способности благодаря наличию второй зоны зацепления. Показано, что выбор смазочных масел для спироидных редукторов является актуальной задачей. В работе приведена оценка антрифрикционных свойств двух сортов смазочных масел: авиационное МС-20 с 3% добавкой дисульфида молибдена MoS_2 и «Цилиндровое 52». Приведены характеристики исследованных сортов масел. Испытания выполнены на специальном стенде, имитирующем режим работы спироидного редуктора в условиях эксплуатации на погрузо-разгрузочном оборудовании. Износ элементов зацепления спироидной пары редуктора контролировался при помощи слепков. Проведённые натурные испытания двухвенцово-цилиндрического спироидного редуктора сделали возможным установить износостойкость спироидного колеса и оценить ожидаемый ресурс относительно допустимой величины износа его зубьев. Установлено преимущество масла «Цилиндровое Ц-52» по обеспечению износостойкости спироидной передачи.

EVALUATION OF THE WEAR RESISTANCE OF A TWO-SHAFT CYLINDRICAL SPIROID TRANSMISSION DEPENDING ON THE GRADE OF LUBRICATING OILS

Anferov V.N., Ignatyugin V.Yu.

Siberian transport university, Novosibirsk

Keywords: two-shaft cylindrical gear, gearbox, lubricating oil, test bench, field tests, wear rate, resource.

Abstract. The article provides information about cylindrical spiroid gears: single- and double-shaft. The advantage of a two-stage cylindrical spiral transmission in comparison with a single-stage one in terms of load capacity is noted due to the presence of a second engagement zone. It is shown that the choice of lubricating oils for spiral gearboxes is an urgent task. The paper presents an assessment of the antifriction properties of two grades of lubricating oils: aviation MS-20 with a 3% addition of molybdenum disulfide MoS_2 and Cylinder 52. The characteristics of the studied grades of oils are given. The tests were performed on a special stand simulating the operating mode of a spiroid gearbox under operating conditions on loading and unloading equipment. The wear of the gear elements of the gear pair was controlled using casts. The field tests of the two-shaft spiroid gearbox made it possible to establish the wear resistance of the spiroid wheel and estimate the expected service life relative to the allowable wear of its teeth. The advantage of Cylindrical C-52 oil in ensuring the wear resistance of a spiroid transmission has been established.

Введение

В ходе исследования российского рынка редукторов в 2020 году, выполненного маркетинговым агентством Discovery Research Group, установлена доля каждого типа редукторов: цилиндрические редукторы – 36,2%; червячные редукторы – 32,9%; коническо-цилиндрические редукторы – 15,6% [1].

Червячные редукторы предоставляют инженеру-конструктору значительные предпосылки для их применения, однако этот вид передач несёт с собой сложную задачу по обеспечению надёжности и долговечности, поскольку червячные передачи работают в близком к критичному режиму смазки.

Альтернативой червячным редукторам являются редукторы со спироидной передачей [2]. По сравнению с червячными цилиндрическими передачами спироидные отличаются:

а) существенно большим коэффициентом перекрытия (практически все витки спироидного червяка находятся в одновременном зацеплении с зубьями колеса);

- б) меньшим скольжением зацепляющихся поверхностей;
- в) более благоприятным для возникновения масляного клина расположением линии контакта зацепляющихся поверхностей;
- г) существенно меньшей чувствительностью к погрешностям монтажных размеров, определяющих осевое положение колеса и межосевое расстояние передачи;
- д) повышенными простотой и удобством в отношении регулировки зазоров в зацеплении, а, следовательно, уменьшенными или даже полностью исключёнными кинематическими мёртвыми ходами;
- е) способностью надёжно работать благодаря суммарному положительному влиянию факторов, отмеченных в подпунктах а, б, в – при использовании в качестве материала колеса не только бронзы (являющихся материалом дорогим и дефицитным), но и чугуна, а также стали;
- ж) повышенной технологичностью, обусловленной более рациональной формой заготовок, отмеченной выше пониженной восприимчивостью к погрешностям монтажа, возможностью применения при изготовлении как методов резьбо- и зубофрезерования, резьбошлифования, хонингования, так и штамповки, горячей и холодной накатки, а также притирки вместо резьбошлифования и шевингования, когда червяки и колеса выполнены из стали [2].

В последние годы спироидные передачи стали всё шире применяться в США и России, а также в Англии, Германии, Канаде, Японии, Австрии и других странах [3].

В качестве объектов, в которых целесообразно первоочередное внедрение спироидных передач, следует назвать:

- а) приводы подъёмно-транспортных машин, в том числе редукторы механизмов подъёма, передвижения и поворота кранов;
- б) приводы транспортных машин;
- в) приводы станков с программным управлением и других машин, важным условием высокоэффективной работы которых являются минимальные мёртвые ходы или возможность удобного выполнения полной выборки зазоров в зацеплении;
- г) приводы трубопроводной арматуры;
- д) редукторы общего назначения (при использовании в них передач со спироидными колёсами), выполненными как из бронзы, так и из стали и чугуна) [2-4].

Материалы и методы исследования

ГОСТ 22850-77 классифицирует спироидные передачи с постоянным передаточным отношением и углом скрещивания осей червяка и колеса, равный 90° [5]. Основными видами спироидных передач являются: цилиндрическая, коническая, обратноконическая.

У цилиндрической спироидной передачи делительная поверхность червяка цилиндрическая, а делительная поверхность колеса – плоская. Коническая спироидная передача с коническими делительными поверхностями у червяка и колеса, причём червяк располагается ближе к межосевой линии передачи торцом меньшего диаметра. Обратноконическая спироидная передача отличается от конической спироидной тем, что червяк располагается ближе к межосевой линии передачи торцом большего диаметра.

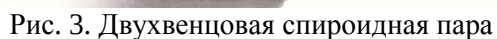
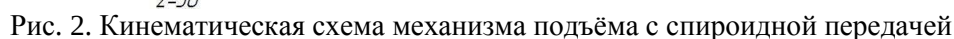
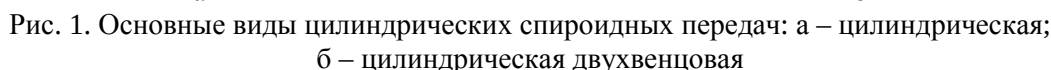
Каждая из трёх видов спироидных передач может быть выполнена в двухвенцовом варианте.

За рубежом наибольшее применение нашли спироидные передачи с коническим червяком, в нашей стране – цилиндрическим, как более технологичным в изготовлении (рис. 1).

Отличительным признаком цилиндрических спироидных передач является форма делительных поверхностей звеньев передачи – у червяка делительная поверхность цилиндрическая, а делительная поверхность колеса – плоская [6].

Двухвенцовая цилиндрическая спироидная передача – передача со спироидным колесом, имеющим два соосных зубчатых венца по обе стороны от оси червяка (рис. 1, б). Нагрузочная способность двухвенцовых [7] спироидных передач в 1,5-1,7 раза выше в сравнении с одновенцовыми [8].

Кинематическая схема механизма подъёма с цилиндрической двухвенцово́й передаче́й приведена на рисунке 2, двухвенцовая спироидная пара – на рисунке 3, общий вид редуктора – на рисунке 4.



Выбор указанных масел обусловлен высокими антифрикционными свойствами и стабильностью этих свойств при повышенных температурах, а также необходимостью их применения в механизмах подъема, эксплуатирующийся в радиоактивной среде. Характеристики исследуемых масел приведены в таблице 2. Дополнительным аргументом к их применению является производство масел в России [9-11].

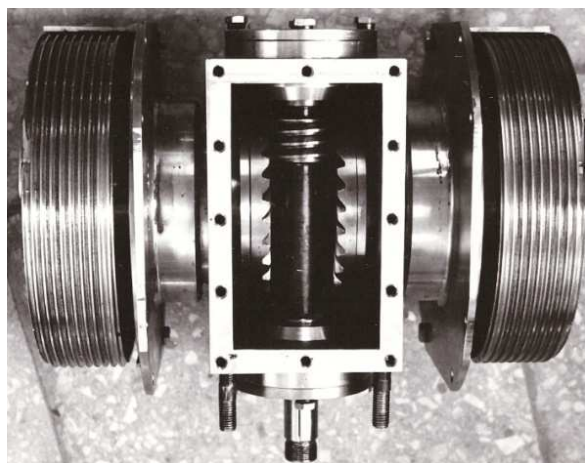


Рис. 4. Общий вид редуктора с цилиндрической двухвенцовой передачей

Табл. 1. Основные параметры двухвенцовой цилиндрической спироидной передачи

Параметр		Значение
Межосевое расстояние a_w , мм		40
Передаточное число u		30
Параметры червяка:		
Делительный диаметр d_1 , мм		49,5
Диаметр вершин витков d_{a1} , мм		55
Осевой модуль m_x , мм		2,75
Число заходов z_1		1
Делительный угол подъема линии витков γ		$3^\circ 10' 05''$
Вид червяка		SZK1
Направление линии витков		Правое
Делительный осевой угол профиля витков	Правой поверхности, α_R	10°
	Левой поверхности, α_L	35°
Материал, твердость		Сталь 40Х ГОСТ 4543-73, HRC 49-54
Шероховатость боковых поверхностей витков		Шлифовка и полировка до шероховатости не более $Ra\ 0,63$
Параметры колеса:		
Внешний диаметр венцов d_{e2} , мм		150
Внутренний диаметр венцов d_{i2} , мм		115
Материал венца		Бронза БрА9Ж4 ГОСТ 1628-78

Табл. 2. Характеристики исследуемых смазочных масел

Показатели	МС-20 ГОСТ 21743-76	Цилиндровое Ц-52 ГОСТ 6411-76
Вязкость кинематическая при 100°C , $\text{мм}^2/\text{с}$	Не менее 20,5	50-70
Индекс вязкости	Не менее 80	90
Коксуемость, %	Не более 0,29	1,5
Кислотное число, мг КОН на 1г масла	Не более 0,03	0,2
Зольность, %	Не более 0,003	0,010
Температура вспышки в открытом тигле, $^\circ\text{C}$	Не ниже 265	210
Температура застывания, $^\circ\text{C}$	Не выше -18	-10
Плотность при 20°C , $\text{г}/\text{см}^3$	Не более 0,897	0,88
Производитель масла	«Лукойл – Волгоград Нефтепереработка»	ООО «Энергонефтересурс», г. Пермь

Существуют различные методы оценки смазывающей способности масел и присадок к ним [12]. Каждый из них отличается степенью приближения условий проведения экспериментов к реальным условиям эксплуатации. Для ответственных механизмов такие испытания максимально приближают к реальным.

Для максимального приближения экспериментальных исследований к эксплуатационным условиям механизма подъёма испытывался на специальном стенде (рис. 5), имитирующем работу механизма в составе магнитного транспортёра.

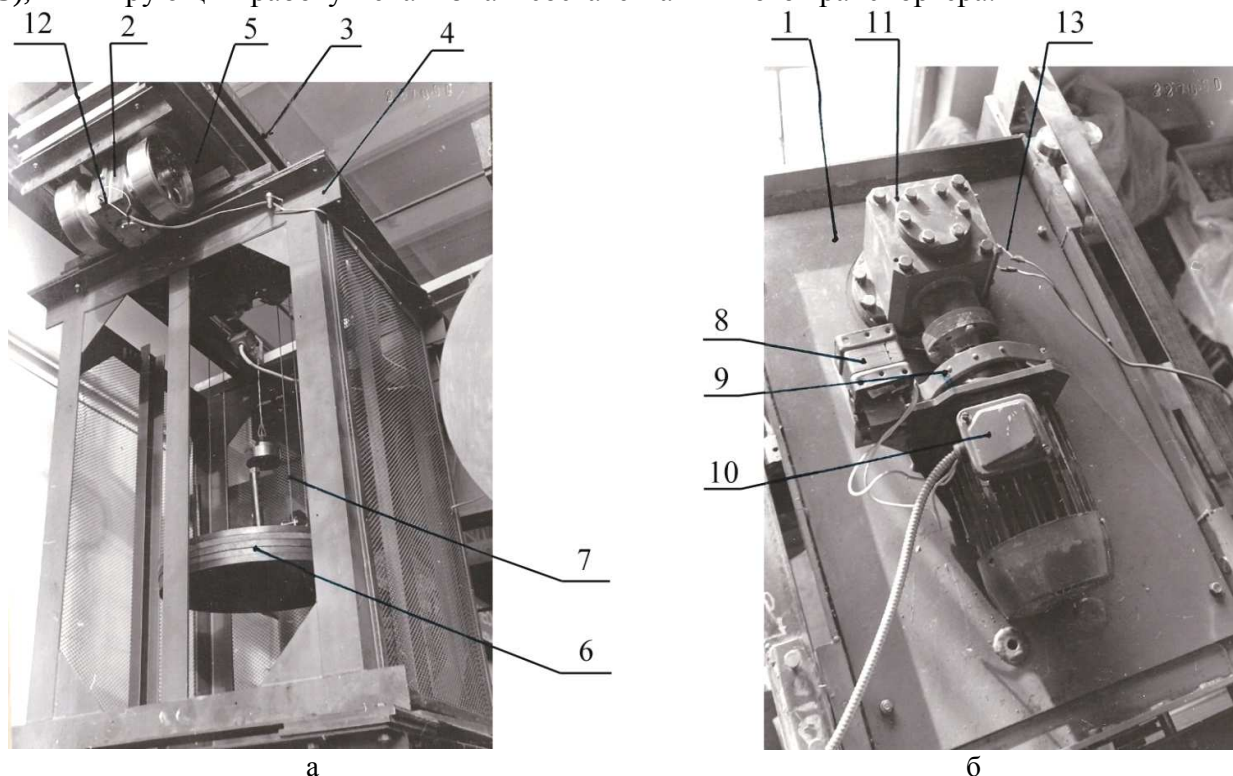


Рис. 5. Стенд механизма подъёма: а – вид спереди; б – вид сверху

Спироидный двухвенцовый редуктор 2 закреплён непосредственно на раме 3, установленной на основании 4. В зазоре между торцевыми магнитными полумуфтами крепится съёмная перегородка 5 из стали I2XI8HI0T толщиной 4 мм. Груз 6 выполнен в виде набора дисков, подвешенных на четырёх ветвях каната 7. Переключение направления хода груза в крайних положениях осуществляется с помощью конечных выключателей типа ВК. Требуемый режим работы устанавливается с помощью системы автоматизации, смонтированной в отдельном электрошкафу. Электромагнит 8 обеспечивает работу фрикционного колодочного тормоза 9 на двигателе 10. Контроль температуры масла в спироидном редукторе 2 и коническом редукторе 11 осуществляется с помощью термодатчиков 12 и 13.

Перед проведением экспериментов, механизм подъёма обкатали в течение часа с целью проверки качества сборки. Затем он ступенчато нагружается: 1 ступень – масса груза 60 кг; 2 ступень – масса груза 120 кг; 3 ступень – масса груза 180 кг; 4 ступень – масса груза 240 кг.

Вращающий момент на выходном валу спироидной передачи при подъёме груза массой 240 кг равен 147 Н·м.

Продолжительность работы на каждой ступени составляла 4-6 часов до стабилизации потребляемой мощности электродвигателем. Мощность электродвигателя контролировалась измерительным комплектом К-51 (погрешность измерения – 0,5%).

Общая продолжительность работы механизма подъёма составила 618 часов, из них: 426 часов с маслом МС-20 + 3% MoS₂ и 192 часа этой же спироидной передачи с маслом «Цилиндровое 52».

Износ зубьев пары конических колёс не превысил 0,05 мм, шероховатость рабочих поверхностей зубьев Ra 2,5, пятно контакта – 80%.

Износ элементов зацепления спироидной пары редуктора контролировался при помощи слепков [13]. В качестве материала слепков использовался бутакрил – быстротвердеющая пластмасса с низким процентом усадки (0,2-0,3%).

Износ зубьев спироидных колёс после 426 часов работы в масле МС-20 + 3% MoS₂ составил 0,55 мм. Через 192 часа последующей работы в масле «Цилиндровое 52» износ увеличился на 0,12 мм. Износ витков спироидного червяка составил 0,03-0,05 мм.

Поскольку ресурс механизма подъёма лимитируется износом спироидных колёс, выполненных из бронзы БрА9Ж4, был рассчитан ресурс для каждого из испытанных сортов масел по ниже формуле [14]:

$$L_2 = \frac{[h_2]}{135 I_{h_2} \sqrt{\eta \rho^n} \frac{V_s}{V_2} n_2 z},$$

где h_2 – предельно допустимый износ зубьев спироидного колеса; I_{h_2} – экспериментально определённое значение интенсивности изнашивания материала венца спироидного колеса, в зависимости от сорта смазочного масла; η – упругая постоянная соприкасающихся звеньев передачи; ρ^n – приведённый радиус кривизны соприкасающихся звеньев, мм; n_2 – частота вращения колеса, об/мин; V_s – скорость скольжения в расчётной точке профиля зуба колеса, мм/с; V_2 – окружная скорость в расчётной точке профиля зуба колеса, мм/с; z – число пар зацепления червяка.

Результаты расчёта ожидаемого ресурса спироидного редуктора с двухвенцовый цилиндрической спироидной передачей в зависимости от сорта смазочного масла приведены в таблице 3. Установлено, что износ зубьев спироидных колёс из бронзы БрА9Ж4, работающих в паре со спироидным червяком из стали 40Х (HRC 49...54) при работе в масле «Цилиндровое 52» в 2 раза ниже, чем при работе в масле МС-20 + 3% MoS₂.

Табл. 3. Результаты расчёта

Сорт масла	Время испытаний, ч	Величина износа, мм	I_{h_2}	$[h_2]$, мм	Ожидаемый ресурс $[L_2]$, ч
МС-20 + 3% MoS ₂	426	0,55	$2,1 \cdot 10^{-7}$	0,64	503
Цилиндровое Ц-52	192	0,12	$2,0 \cdot 10^{-7}$	0,64	1040

Выводы

1. Натурные сравнительные испытания спироидного редуктора с двухвенцовый цилиндрической спироидной передачей позволили установить износостойкость и оценить ожидаемый ресурс по допустимой величине износа зубьев спироидного колеса.

2. Установлено преимущество масла «Цилиндровое 52» перед маслом МС20+ 3% MoS₂ по износостойкости, лимитирующий ресурс редуктора по допустимой величине износа в 2 раза.

Список литературы

1. Анализ рынка червячных редукторов в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.restko.ru/market/11487>.
2. Trubachev E.S., Bogdanov K.V., Pushkareva N.F. Practice of design and production of spiroid gears as alternatives to bevel and hypoid gears // The 6th International Conference on Advanced Design and Manufacture (ADM2023). – Proceedings, Harbin, China, 2023. – P. 231-240.
3. Трубачев Е.С., Кузнецов А.С., Санников А.М. Перспективы применения QN передач в приводах трубопроводной арматуры // Арматуростроение. – 2021. – №4 (133). – С. 56-61.
4. Trubachev E.S., Sannikov A.M., Shutkina A.I. Stell-stell QN worm gear and its implementation in gearboxes. // Forsch Ingenieurwes. 2021, vol. 86, pp. 757-768. doi.org/10.1007/s10010-021-00573-9.
5. ГОСТ 22850-77. Передачи спироидные. Термины, определения и обозначение. Введ. 01.01.1979. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 65 с.
6. Patent No. 2954704 US. Skew-axis gearing / Saari D.E. – Oct. 4, 1960.
7. Patent No. 2935885 US. Multiple skew-axis gearing / Saari D.E. – May 10, 1960.
8. Езерская С.В., Быстров М.М. Некоторые результаты исследования нагрузочной способности спироидных редукторов с двумя зонами зацепления // Механические передачи: Сборник трудов. – Ижевск: ИМИ, 1976. – С. 37-44.

9. Анферов В.Н., Игнатьюгин В.Ю. Влияние добавки дисульфида молибдена в авиационное масло МС-20 на эксплуатационные показатели цилиндрической спироидной передачи механизма подъёма мостового крана // Строительные и дорожные машины. – 2023. – №9. – С. 22-27.
10. Анферов В.Н., Трубачев Е.С., Игнатьюгин В.Ю. Оценка антифрикционных свойств масла CAT TD TP API CL-3 (ТМ-3-9 ГОСТ 174792-85) применительно к спироидному зацеплению // Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения-2024. Сборник докладов международной научно-практической конференции, посвящённой 30-летию основания научного подразделения «Институт механики имени профессора Гольдфарба В.И.» – Ижевск: ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2024. – С. 4-15.
11. Трубачев Е.С., Кунивер А.С. Испытание малогабаритных спироидных редукторов. // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2006. – №1. – С. 96-105.
12. Гритченко Н.Ю., Сидоров В.А. Влияние качества смазки на состояние механизмов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://prostoev.net/tag/zhurnal-prostoev-net-№130-2022>.
13. Анферов В.Н., Зайцев А.В. Оценка ресурса спироидных передач по износу с учётом эквивалентного вращающего момента // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2020. – Т.23, №2 – С. 31-37. – doi.org/10.22213/2413-1172-2020-2-31-37.
14. Анферов В.Н., Ткачук А.П., Игнатьюгин В.Ю. Результаты исследования эксплуатационных показателей спироидных редукторов РС-31,5 с передаточными числами 11, 23, 49 и 81 // Политранспортные системы: Материалы XI Международной научно-технической конференции. – Новосибирск: СГУПС, 2020. – С. 555-558.

References

1. Analysis of the worm gear market in Russia [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.restko.ru/market/11487>.
2. Trubachev E.S., Bogdanov K.V., Pushkareva N.F. Practice of design and production of spiroid gears as alternatives to bevel and hypoid gears // The 6th International Conference on Advanced Design and Manufacture (ADM2023). – Proceedings, Harbin, China, 2023. – P. 231-240.
3. Trubachev E.S., Kuznetsov A.S., Sannikov A.M. Prospects of using QN gears in pipeline valve actuators // Rebar construction. 2021, no. 4(133), pp. 56-61.
4. Trubachev E.S., Sannikov A.M., Shutkina A.I. Stell-stell QN worm gear and its implementation in gearboxes. // Forsch Ingenieurwes. 2021, vol. 86, pp. 757-768. doi.org/10.1007/s10010-021-00573-9.
5. GOST 22850-77. The transmission is spiroid. Terms, definitions, and notation. Introduced 01.01.1979. – M.: Publ. house of Standards, 1979. – 65 p.
6. Patent No. 2954704 US. Skew-axis gearing / Saari D.E. – Oct. 4, 1960.
7. Patent No. 2935885 US. Multiple skew-axis gearing / Saari D.E. – May 10, 1960.
8. Ezerskaya S.V., Bystrov M.M. Some results of a study of the load capacity of spiroid gearboxes with two engagement zones // Mechanical transmission: Proceedings. – Izhevsk: IMI, 1976. – P. 37-44.
9. Anferov V.N., Ignatyugin V.Yu. The effect of the addition of molybdenum disulfide in MS-20 aviation oil on the performance of the cylindrical spiroid transmission of the bridge crane lifting mechanism // Construction and road vehicles. 2023, no. 9, pp. 22-27.
10. Anferov V.N., Trubachev E.S., Ignatyugin V.Yu. Evaluation of the antifricition properties of CAT TD TP API CL-3 oil (ТМ-3-9 ГОСТ 174792-85) in relation to spiroid engagement // Theory and practice of gears and gear reduction engineering-2024. Collection of reports of the international scientific and practical conference dedicated to the 30th anniversary of the founding of the scientific department "Goldfarb Institute of Mechanics named after Professor V.I." – Izhevsk: IzhSTU n.a. M.T. Kalashnikov, 2024. – P. 4-15.
11. Trubachev E.S., Kuniver A.S. Testing of small-sized spiroid gearboxes // Bulletin of IzhSTU named after M.T. Kalashnikov. 2006, no. 1, pp. 96-105.
12. Gritchenko N.Yu., Sidorov V.A. The influence of lubricant quality on the condition of mechanisms. – [Electronic resource]. Access mode: <https://prostoev.net/tag/zhurnal-prostoev-net-№130-2022>.
13. Anferov V.N., Zaitsev A.V. Evaluation of the wear life of spiral gears, taking into account the equivalent torque // Bulletin of IzhSTU named after M.T. Kalashnikov. 2020, vol. 23, no. 2, pp. 31-37. oi.org/10.22213/2413-1172-2020-2-31-37.
14. Anferov V.N., Tkachuk A.P., Ignatyugin V.Yu. The results of a study of the performance of RS-31.5 gearboxes with gear ratios 11, 23, 49 and 81 // Polytransport systems: Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference. – Novosibirsk: STU, 2020. – P. 555-558.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Анферов Валерий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Подъёмно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины»	Anferov Valery Nikolaevich – doctor of technical sciences, professor of the Department of lifting, transport, track, construction and road machinery
Игнатьюгин Валерий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъёмно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины»	Ignatyugin Valery Yuryevich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of lifting, transport, track, construction and road machinery
forto-18@yandex.ru	

Получена 01.04.2025