

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-1-14-21

УДК 621.833.3

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА СПИРОИДНЫХ ПЕРЕДАЧ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ

TO THE QUESTION OF CALCULATION OF SPIROID TRANSMISSIONS WITH VARIABLE LOADING MODE

Зайцев Александр Васильевич,
старший преподаватель, e-mail: zaitsev.zaw@yandex.ru
Alexander V. Zaitsev¹, Senior Lecturer

Сибирский государственный университет путей сообщения,
630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191
Siberian transport university, 191 street D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russian Federation

Аннотация: Выполнен анализ причин возникновения выхода из строя механизмов и приводов грузоподъемных, строительных, дорожных машин на основе передач зацеплением, а также передач червячного класса, которыми являются контактные разрушения активных поверхностей зубьев зубчатых колес, приводящих к неисправностям, поломкам, отказам в виде износа и задиров. Приведена циклограмма, характеризующая режим работы зубчатой пары, учитывающая действие максимальной нагрузки на контактную выносливость и на выносливость зубьев при изгибе и которая используется при расчетах на прочность прямозубых и косозубых цилиндрических передач.

Обоснована необходимость создания метода расчета по износу спироидных передач с учетом переменного режима нагружения и времени действия нагрузки на основе анализа графиков нагружения механизмов и приводов подъемно-транспортных машин и оборудования, где применяется данный вид передач, в частности в приводе механизмов запорной арматуры, в приводе винтового горизонтального конвейера, в кабелесборочном механизме электропогрузчика, в приводе тяговой лебедки укладочного крана УК-25/9-18 для перетягивания пакетов звеньев рельсоопальной решетки.

Разработанный метод позволяет с учетом реальных режимов эксплуатации подъемно-транспортных машин, оборудования и механизмов по экспериментально полученной зависимости интенсивности изнашивания зубьев спироидного колеса от значений вращающего момента на выходном валу спироидного редуктора определить значения интенсивности изнашивания и рассчитать ресурс спироидного редуктора с учетом длительности действия значений вращающего момента в соответствии с установленным графиком переменного нагружения механизмов грузоподъемных, строительных и дорожных машин.

Ключевые слова: износ; интенсивность изнашивания; передачи зацеплением; ресурс; спироидная передача, график переменного нагружения.

Abstract: A brief analysis of the causes of failure of the mechanisms and drives of lifting, construction, road machines based on gear transmissions, as well as on worm class gearing, i.e. contact destruction of the active surfaces of gear teeth, resulting in malfunctions, failures in the form of wear and scuffing. The study presents a cyclogram that describes the mode of operation of the gear pair taking into account the effect of the maximum load on the contact endurance and on the endurance of the teeth at bending and that is used in strength calculations of spur and helical gears.

The necessity of creating a method for calculating the wear of spiroid gears, taking into account the variable loading mode and loading time, is substantiated based on the analysis of loading schedules of mechanisms and drives of hoisting-and-transport machines and equipment where this type of gear is used, in particular, in the drive of stop valves mechanisms, the drive of screw horizontal conveyor, in the cable assembly mechanism of the electric loader, in the drive of the traction winch of the packing crane UK-25 / 9-18 for dragging the packs of the rail and sleepers grid.

The developed method allows, taking into account the actual operating modes of hoisting-and-transport

machines, equipment and mechanisms for experimentally obtained dependence of the wear rate of the teeth of the spiroid wheel on the torque values on the output shaft of the spiroid gearbox, to determine the values of wear intensity and to calculate the service life of the spiroid gearbox taking into consideration the duration of the torque values in accordance with the established schedule of variable loading mechanisms for lifting, construction, and road cars.

Key words: wear; wear rate; gearing; service life; spiroid gear, variable loading graph.

В результате действия постоянных или переменных в течение времени полезных сопротивлений, в процессе эксплуатации, возникающих на рабочем оборудовании, в зубчатых зацеплениях механических передач образуются контактные разрушения активных поверхностей звеньев, износ, задиры по боковым поверхностям зубьев и изломы, что является причиной выхода из строя механизмов привода грузоподъемных, строительных и дорожных машин [1-5]. Данный вид разрушения характерен для закаленных поверхностей зубьев зубчатых колес и выявляется прогрессирующим выкрашиванием материала, которое может достигать значительных размеров, а также на упрочненных поверхностях зубьев отслаиванием крупных участков слоя металла [6-11].

Для зубчатых колес как открытых, так и закрытых передач и передач червячного класса, работающих в среде засоренной абразивными частицами характерной причиной отказа, является износ и задание зубьев (рис. 1) [12].

Отличительной особенностью передач червячного класса является относительное скольжение в любой точке контакта активных поверхностей звеньев пары, величина скорости которого возрастает с увеличением передаточного отношения.

При расчетах на прочность прямозубых и косозубых цилиндрических зубчатых передач со стальными колесами, согласно ГОСТ 21354-87 используют циклограмму (рис. 2) учитывающую действие максимальной нагрузки $F_{H(1)}$ на контактную выносливость и на выносливость зубьев при изгибе [13].

Для механизмов приводов грузоподъемных, строительных и дорожных машин характерны повторно-кратковременные режимы нагружения с изменением вращающих моментов на выходном валу редуктора в течение рабочего времени цикла эксплуатации. Для данных режимов характерны малая окружная скорость и сопутствующие повышенные нагрузки, а также частые пуски и высокие контактные напряжения, приводящие к разрушению поверхности зубьев контактирующих звеньев и, как следствие износу.

Параллельно с червячными передачами последние полвека в различных областях техники применяются спироидные передачи, которые относятся к червячному типу (рис. 3 [12, 15-16]). Они получили широкое распространение в приводах механизмах подъемно-транспортных машин и оборудования, работающих как при постоянном так и при переменном режимах нагружения.

В таблице 1 представлены графики нагружения

механизмов подъемно-транспортных машин и оборудования, где применяется спироидные редуктора.

Таблица. 1. Графики нагружения механизмов подъемно-транспортных машин и оборудования, где применяется спироидный редуктор.

В связи с тем, что значительное число приводов механизмов грузоподъемных, строительных и дорожных машин эксплуатируется при режимах с переменной нагрузкой на рабочем оборудовании в течение цикла, создание метода расчета ресурса спироидной передачи по износу, учитывающего переменность нагрузки, становится актуальной задачей.

Сложность создания универсального метода расчета зубчатых передач по износу заключается в определении значений вращающих моментов на выходном валу редуктора в течение циклов нагружения и продолжительности их действия с учетом условий эксплуатации грузоподъемных, строительных и дорожных машин.

Также большую трудоемкость и сложность представляет экспериментальное определение интенсивности изнашивания материалов зубчатого колеса, что требует создания лабораторного универсального оборудования для испытания натуральных и модельных образцов, которое обеспечивало бы широкий диапазон изменения условий испытаний, имитирующих реальные режимы эксплуатации машин и механизмов.

На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости интенсивности J_h изнашивания и ресурса L зубьев спироидного колеса от значений вращающего момента на выходном валу редуктора T_i . Данная зависимость $J_h = F(T_i)$ позволяет найти интенсивности изнашивания зуба спироидного колеса для соответствующих значений вращающего момента T_i установленного графика переменного нагружения.

Порядок расчета ресурса спироидной цилиндрической передачи при переменном режиме нагружения

1. Устанавливается график нагружения механизма в соответствии с количеством ранжированных относительных значений вращающих моментов на выходном валу спироидного редуктора в порядке уменьшения и относительной продолжительностью их действия (рис. 5).

2. Рассчитываются основные параметры спироидного редуктора, необходимые для расчета ресурса (таблица 2).

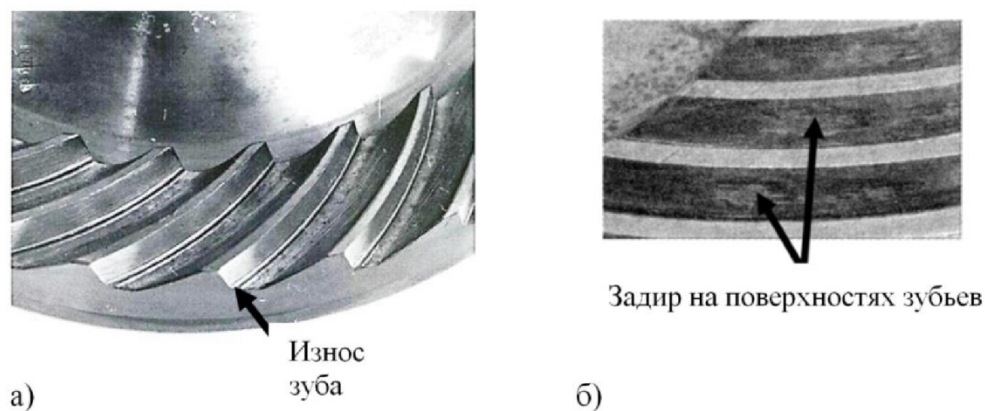


Рис. 1. Спироидные колеса [12]
 а-износ зуба; б-задир на поверхностях зубьев
 Fig.1. Spiroids
 а-tooth wear; б- scoring on teeth surfaces

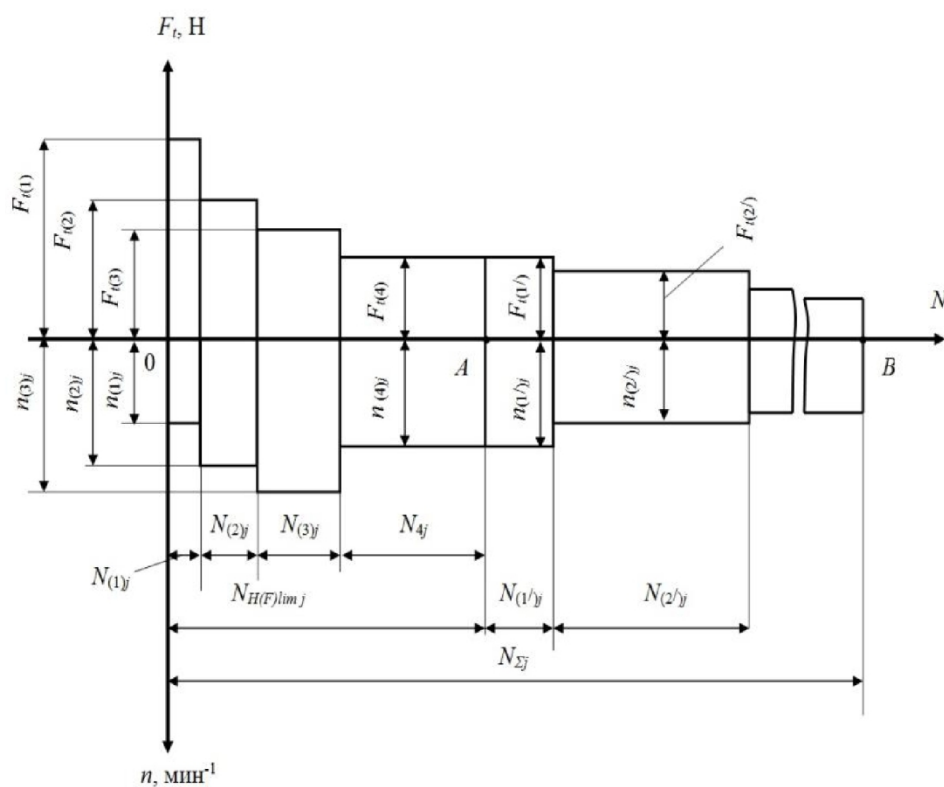


Рис. 2. Циклограмма, характеризующая режим работы зубчатой пары [13-14]
 Fig.2. The cyclogram characterizing the mode of operation of the gear pair



Рис. 3. Спироидная передача
 Fig.3. Spiroid gear

Таблица. 1. Графики нагружения механизмов подъемно-транспортных машин и оборудования, где применяется спироидный редуктор.
 Table. 1. Charts of loading the mechanisms of hoisting-and-transport machines and equipment, which use a spiroid gearbox.

№	Название механизма	График
1	Привод механизма закрытия и открытия запорной арматуры. Применяется четвертьоборотный спироидный редуктор [12].	
2	Привод механизма закрытия и открытия запорной арматуры. Применяется многооборотный спироидный редуктор [12].	
3	Привод винтового горизонтального конвейера. Применяется редуктор РС [16].	
4	Кабелесборочный механизм электрогрузчика. Применяется редуктор РС [17-19].	
5	Тяговая лебедка для перетягивания пактов звеньев рельсошпальной решетки укладочного крана УК-25/9-18. Применяется редуктор РС	

Таблица. 2. Основные параметры спироидного редуктора необходимые для расчета ресурса в соответствии с ГОСТ 22850-77

Table. 2. The main parameters of the spiroid gearbox necessary for calculation of the service life in accordance with GOST 22850-77

№пп	Название основных геометрических параметров редуктора	Обозначение (Формула расчета)	Размерность
1	Межосевое расстояние	a_w	мм
2	Номинальный (максимальный) вращающий момент на выходном валу	$T_2=T_{max}$	Н·мм
3	Номинальная частота вращения входного вала	n_1	мин ⁻¹
4	Номинальная частота вращения выходного вала	$n_2=n_1/u$	мин ⁻¹
5	Направление вращения вала		
6	Коэффициент полезного действия КПД при непрерывном режиме работы (расчётный)	η	
7	Передаточное число (от червяка к червячному колесу)	u_{12}	
8	Материал червяка	Сталь 40Х	
8.1	Модуль упругости	E_1	МПа
8.2	Коэффициент Пуассона	μ_1	
9	Материал спироидного колеса	Бронза Бра9Ж4	
9.1	Модуль упругости	E_2	МПа
9.2	Коэффициент Пуассона	μ_2	
10	Шероховатость поверхностей витков червяка	Ra	мкм
11	Параметры червяка:		
11.1	коэффициент диаметра червяка	q	
11.2	винтовой параметр	$P_y=mz_1/2$	мм
	угол наклона образующей прямой	$\alpha=\gamma$	град
11.3	расчётный модуль витка спироидного червяка вдоль образующей	m	мм
11.4	расчётный осевой модуль витка спироидного червяка	$m_x=m$	мм
11.5	число заходов	z_1	
11.6	делительный угол подъема линии витков червяка	γ	град
11.7	вид червяка		
11.8	направление линии витков		
11.9	делительный диаметр червяка	$d_1=qm$	мм
11.10	диаметр вершин витков	d_{a1}	мм
11.11	длина нарезанной части	b_1	мм
11.12	диаметр впадин	d_{f1}	мм
11.13	делительный осевой угол профиля витков:	α_{xR} α_{xL}	град град
12	Параметры червячного колеса:		
12.1	внутренний диаметр	d_{i2}	мм
12.2	внешний диаметр	d_{e2}	мм
12.3	число зубьев колеса	z_2	
13	Приведенный радиус кривизны в расчетной точке контакта зубьев колеса		
13.1	Для правого делительного осевого угла профиля витков	$(\rho_{red12})_R$	мм
13.2	Для левого делительного осевого угла профиля витков	$(\rho_{red12})_L$	мм
14	Упругая постоянная соприкасающихся звеньев	η	мм ² /Н
15	Окружная скорость в расчетных точках профиля зубьев колеса	V_{Fy2}	мм/с
16	Скорость скольжения в расчетных точках профиля зубьев колеса	V_{Sy2}	мм/с
17	Смазывающий материал: трансмиссионное масло CAT TDTO SAE 30 API GL-3 – аналог ТМ-3-9 по ГОСТ 17479.2 – 85		

3. Рассчитывается предельно допустимый износ зубьев спироидного колеса $[h_2]$ [17-20]:

$$[h_2] = [1,57 - (\operatorname{tg} \alpha_{xR} + \operatorname{tg} \alpha_{xL})] m_x. \quad (1)$$

4. Удельная расчетная сила в зацеплении соответствующая вращающему моменту на выходном валу редуктора T_i [17-20]:

$$w_{HEi} = \frac{T_i}{T_{max}} w_{HEmax}, \quad (2)$$

где T_i / T_{max} — относительные значения вращающего момента, определяемые из установленного графика переменного нагружения; w_{HEmax} — удельная расчетная сила в зацеплении соответствующая вращающему моменту на выходном валу редуктора T_{max} .

5. Определяется значение износа зуба спироидного колеса редуктора за цикл работы механизма, соответствующее значению рабочего вращающего момента на выходном валу редуктора T_i и продолжительности его действия t_i , мм [17-20]:

$$h_i = 2,25 J_{hi} \sqrt{w_{HEi} \eta (\rho_{red1,2})_R \frac{v_{SY2}}{v_{FY2}} n_2 i \left(\frac{t_i}{60} \right)}, \quad (3)$$

где J_{hi} — экспериментально определенное значение интенсивности изнашивания материала спироидного колеса соответствующая рабочему вращающему моменту T_i (определяется по графику рис. 4); t_i — время действия рабочего вращающего момента T_i на выходном валу спироидного редуктора механизма за цикл его работы в соответствии с установленным графиком переменного нагружения (рис. 5), с; i — число пар зацепления с рассматриваемым зубчатым колесом.

6. Устанавливается значение циклов работы механизма до предельно допустимого износа зубьев спироидного колеса $[h_2]$ [17-20]:

$$N_{\Sigma} = \frac{[h_2]}{\sum_{i=1}^n h_i}, \quad (4)$$

где n — номер ступени нагружения согласно, установленного графика переменного нагружения.

7. Рассчитывается ресурс спироидного редуктора механизма с установленным графиком переменного нагружения [17-20]:

$$L = \frac{N_{\Sigma} t_{\Sigma}}{3600} \quad (5)$$

Выводы

1. Получена экспериментальная зависимость интенсивности изнашивания J_h зубьев спироидного колеса (материал бронза БрА9Ж4) от значений вращающего момента на выходном валу спироидного редуктора T_i , позволяющая определять значения интенсивности изнашивания и рассчитать ресурс спироидного редуктора с установленным графиком переменного нагружения.

2. Приведен алгоритм расчета ресурса спироидного редуктора по износу спироидного колеса на основе экспериментальной зависимости интенсивности изнашивания от нагрузочного момента $J_h = F(T_i)$.

3. Значительное количество механизмов и приводов грузоподъемных, строительных и дорожных машин эксплуатируется при переменных режимах нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование механических передач: Учебно-справочное пособие для вузов/С.А. Чернавский, Г.А. Снесарев, Б.С. Козинцев и др. - 5-е изд. перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1984. - 560 с.
2. Иванов М.Н. Детали машин: Учеб. для студентов вузов/Под ред. В.А. Финогенова. - 6-е изд., перераб. - М.: Высш. шк., 1998. - 383 с.
3. Основы расчета и конструирования летательных аппаратов: Учеб. пособие для вузов/Н.А. Алексеева, Л.А. Бонч-Осмоловский, В.В. Волгин и др.; Под ред. В.Н. Кестельмана, Г.И. Рощина — М.: Машиностроение. 1989. - 456 с.
4. Часовников Л.Д. Передачи зацеплением (зубчатые и червячные). изд. 2-е, перераб. и дополн. М.: «Машиностроение», 1969. 486 с.
5. Решетов Д.Н. Детали машин: Учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов. 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение: 1989 - 496 с.
6. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г. Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях, М: Машиностроение, 1986. - 224 с.
7. Дроздов Ю.Н., Анферов В.Н. К расчету ресурса спироидных передач по износу // Расчетно – экспериментальные методы оценки трения и износа. М.: Наука, 1980. С.19-22.
8. Детали машин: Учебник для вузов/ Л.А. Андриенко, Б.А. Байков, И.К. Ганулич и др.; Под ред. О.А. Ряховского. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. - 520 с.; ил. - (Сер. Механика в техническом университете; Т. 8).
9. Дроздов Ю.Н. К расчету зубчатых передач на износ. М.: Машиноведение, 1969. - №2. - С.84-88.
10. Дроздов Ю.Н. Метод расчета на износ зубчатых передач/Передачи и трансмиссии, №2, 2002. С. - 37-43.
11. Генкин М.Д., Кузьмин Н.Ф., Мишарин Ю.А. Вопросы заедания зубчатых колес. М., АН СССР, 1959, 147 с.
12. ООО Механик. Каталог продукции. <http://mechanik.udmnet.ru/>

13. ГОСТ 21354-87 (СТ СЭВ 5744-86). Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчеты на прочность. Дата введения 01.01.89. Издательство стандартов, 1988. 127 с.
14. Машиностроение. Энциклопедия/Ред. совет К.В. Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. Т. IV-1//Д.Н. Решетов, А.П. Гусенков, Ю.Н. Дроздов и др.: Под общ. Ред. Д.Н. Решетова, 1995. 864 с.
15. Patent 2954704 USA. Skew-axis gearing / O.E. Saari. published on 04-Oct-1960
16. Saari O.E. Speed-Reduction Gearing, Patent USA №2696125, 1954
17. Зайцев, А.В. К вопросу расчета экономического обоснования применения спироидного редуктора в приводе винтового горизонтального конвейера. / Механизация строительства. 2015. №10. С. 42-45.
18. Зайцев, А.В. К расчету зубчатых и червячных передач при переменных режимах нагружения / Анферов В.Н., Зайцев А.В. // Вестник СГУПС. 2016. №4. С. 40-46.
19. Зайцев, А.В. Особенности расчета ресурса спироидных передач в приводах машин при переменных режимах нагружения / Анферов В.Н., Ткачук А.П., Зайцев А.В. // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. № 3. Т 2. Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН. 2016. С. 11-17.
20. Зайцев, А.В. Расчет ресурса спироидного редуктора в приводе кабелесборочного механизма электропогрузчика // В.Н.Анферов, А.П.Ткачук, А.В.Зайцев / Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. Том 20. №2. Апрель-июнь. Ижевск: Изд-во ИжГТУ. 2017. С. 24-28.

REFERENCES

1. Proyektirovaniye mekhanicheskikh peredach: Uchebno-spravochnoye posobiye dlya vtuzov/S.A. Chernavskiy, G.A. Snegarev, B.S. Kozintsev i dr. -5-ye izd. pererab. i dop. [Mechanical Gear Design]. M.: Mashinostroyeniye, 1984.-560 p. (rus)
2. Ivanov M.N. Detali mashin: Ucheb. dlya studentov vtuzov. Pod red. V.A. Finogenova. -6-ye izd., pererab. [Machine parts]. M.: Vyssh. shk., 1998-383 p. (rus)
3. Osnovy rascheta i konstruirovaniya letatel'nykh apparatov: Ucheb. posobiye dlya vtuzov/N.A. Alekseyeva, L.A. Bonch-Osmolovskiy, V.V. Volgin i dr.; Pod red. V.N. Kestel'mana, G.I. Roshchina. [Fundamentals of calculation and design of aircraft]. M.: Mashinostroyeniye. 1989-456 p. (rus)
4. Chasovnikov L.D. Peredachi zatsepleniym (zubchatyye i chervyachnyye) izd. 2-ye, pererab. i dopoln. [Transmission gearing (gear and worm)]. M.: «Mashinostroyeniye», 1969. 486 p. (rus)
5. Reshetov D.N. Detali mashin: Uchebnik dlya studentov mashinostroitel'nykh i mekhanicheskikh spetsial'nostey vuzov. 4-ye izd., pererab. i dop. [Machine parts]. M.: Mashinostroyeniye: 1989 - 496 p. (rus)
6. Drozdov U.N., Pavlov V.G. Puchkov V.N. Treniye i iznos v ekstremal'nykh usloviyakh. [Friction and wear in extreme conditions]. M.: Mashinostroyeniye, 1986.-224 p. (rus)
7. Drozdov U.N., Anferov V.N. To the calculation of the resource of spiroid gear for wear. Raschetno – eksperimental'nyye metody otsenki treniya i iznosa. M.: Nauka, 1980. P.19-22. (rus)
8. Detali mashin: Uchebnik dlya vuzov/ L.A. Andriyenko, B.A. Baykov, I.K. Ganulich i dr.; Pod red. O.A. Ryakhovskogo. - 3-ye izd., pererab. i dop. [Machine parts]. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2007.-520 p.: il. -(Ser. Mekhanika v tekhnicheskoy universitete; T. 8). (rus)
9. Drozdov U.N. K raschetu zubchatykh peredach na iznos. [To the calculation of gears for wear]/ M.: Mashinovedeniye, 1969.-№2.-P.84-88. (rus)
10. Drozdov U.N. Metod rascheta na iznos zubchatykh peredach. [Calculation method for wear gears]. Peredachi i transmissii, №2, 2002. P.-37-43. (rus)
11. Genkin M.D., Kuz'min N.F., Misharin YU.A. Voprosy zayedaniya zubchatykh koles. [Questions jamming gears]. M., AN SSR, 1959, 147 p. (rus)
12. ООО Механик. Каталог продукции. (website: <http://mechanik.udmnet.ru/>)
13. ГОСТ 21354-87 (СТ СЭВ 5744-86). Передатки зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчеты на прочность. Дата введения 01.01.89. Издательство стандартов, 1988. 127 p. (rus)
14. Mashinostroyeniye. Entsiklopediya/Red. sovet K.V. Frolov (pred.) i dr. M.: Mashinostroyeniye. Detali mashin. Konstruktsionnaya prochnost'. Treniye, iznos, smazka. T. IV-1//D.N. Reshetov, A.P. Gusenkov, U.N. Drozdov i dr.: Pod obshch. Red. D.N. Reshetova, [Engineering. Encyclopedia]. 1995. 864 p. (rus)
15. Patent 2954704 USA. Skew-axis gearing / O.E. Saari. published on 04-Oct-1960 (eng)
16. Saari O.E. Speed-Reduction Gearing, Patent USA №2696125, 1954 (eng)
17. Zaytsev, A.V. To the question of calculating the economic rationale for the use of a spiroid gearbox in a drive of a screw horizontal conveyor. Mekhanizatsiya stroitel'stva. 2015. №10. P. 42-45. (rus)
18. Anferov V.N., Zaytsev A.V. To the calculation of gears and worm gears with variable loading modes. Vestnik SGUPS. 2016. №4. P. 40-46. (rus)
19. Anferov V.N., Tkachuk A.P., Zaytsev A.V. Features of calculating the resource of spiroid gears in

machine drives under variable loading conditions. Fundamental'nyye i prikladnyye voprosy gornykh nauk. № 3. T 2. Novosibirsk: Izd-vo IGD SO RAN. 2016. P. 11-17. (rus)

20. Anferov V.N., Tkachuk A.P., Zaytsev, A.V. Calculation of the life of a spiroid gearbox in the drive of the cable-assembly mechanism of an electric forklift. Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova. Tom 20. №2. Aprel'-iyun'. Izhevsk: Izd-vo IzhGTU. 2017. P. 24-28. (rus)

Поступило в редакцию 11.01.2019

Received 11 January 2019