

УДК 621.833.3

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-31-37

Оценка ресурса спироидных передач по износу с учетом эквивалентного вращающего момента

В. Н. Анферов, доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

А. В. Зайцев, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

Обоснована целесообразность применения спироидных передач в приводах и механизмах подъемно-транспортных и строительных машин. Отмечены характерные достоинства указанных передач, позволяющие проектировать приводы машин с улучшенными технико-экономическими показателями.

Приведены сведения об основных производителях спироидных передач в России и за рубежом.

Представлено краткое описание и анализ основных причин выхода из строя механизмов и приводов машин на основе передач зацеплением, а также передач червячного класса в результате их эксплуатации и действия контактных нагрузок на активных поверхностях зубьев зубчатых колес, что приводит к неисправностям, поломкам, отказам в виде износа, задиров, истирания. Описан существующий метод расчета на выносливость с учетом графика изменения значений нагрузок и количества циклов их действия на контактную выносливость и на выносливость зубьев при изгибе, используемый при расчетах на прочность прямозубых и косозубых цилиндрических передач.

Обоснована необходимость создания метода оценки по износу спироидных передач с учетом ступенчатого режима действия нагрузок на основе анализа режимов эксплуатации приводов подъемно-транспортных машин и оборудования, где применяется данный вид передач.

Предложенный метод проиллюстрирован примером расчета ресурса спироидного редуктора тяговой лебедки укладочного крана.

Ключевые слова: износ, интенсивность изнашивания, передачи зацеплением, ресурс, спироидная передача, эквивалентный вращающий момент.

Введение

В России и за рубежом всё большую известность и применение в технике находят спироидные передачи [1]. Они являются одной из прогрессивных и перспективных разновидностей передач зацеплением. По технологии изготовления эти передачи относятся к передачам червячного типа, по внешним геометрическим признакам – к гипоидным.

Первые патенты на спироидные передачи и способ изготовления, принадлежащие фирме Illinois Tool Work Inc, появились в 50-х годах прошлого столетия. В последующие годы интерес к спироидным передачам со стороны ученых, производителей и потребителей увеличился благодаря таким их достоинствам, как повышенная нагрузочная способность и долговечность, обусловленные лучшими показателями геометрии и кинематики зацепления; способность надежно работать при использовании для материалов колеса стали и чугуна вместо бронзы; высокая стойкость к ударным, вибрационным нагрузкам и кратковременным нагрузкам; технологичность изготовления и сборки;

компактность, бесшумность работы, пониженная виброактивность.

Основными производителями спироидных передач, редукторов и мотор-редукторов в мире являются: ITW (США), Sew Eurodrive (Германия), SPIROPLAN (Англия), Neptun S.A. (Румыния), УНПЦ «Механик» (г. Ижевск); ОАО «ЭЗТМ» (г. Электросталь, Московская обл.).

Научным координатором исследований спироидных передач является Институт механики ИжГТУ имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск).

В России спироидные передачи нашли применение в редукторах и мотор-редукторах общемашиностроительного и специального назначения, в том числе в редукторах приводов запорно-регулирующей арматуры водо-, нефте- и газопроводов, прокатного оборудования, механизмах ПТМ и разнообразных технологических установках [2–13].

За рубежом спироидные передачи применяются в станкостроении, военной технике, судовых механизмах, узлах сельскохозяйственных машин, приводах бытовой техники, в редукторах и мотор-редукторах и в подъемно-транспортных

устройствах (Spiroidgearing Copyright Illinois Tool works Inc.-Chicago (USA), 1963).

Исходные положения

Анализ различных случаев применения спироидных передач в различных устройствах, механизмах и машинах показал, что явное преимущество по области применения в России принадлежит спироидной передаче с цилиндрическим червяком (рис. 1).



Рис. 1. Спиroidная передача

Fig. 1. Spiroid (helicon) gear

Несмотря на значительные результаты, достигнутые в области теории и практики спироидных передач, актуальной и требующей решения является задача прогнозирования работоспо-

собности и долговечности передачи с учетом действующих нагрузок.

Работоспособность передачи может быть обеспечена, если на стадии проектирования и изготовления будут исключены причины выхода их из строя.

Для червячных и спироидных передач различают следующие характерные виды отказов [14].

1. Поломка зубьев колес или, в редких случаях, витков червяка.

2. Пластическое разрушение рабочих поверхностей зубьев колеса от действия пиковых нагрузок.

3. Усталостное разрушение рабочих поверхностей зубьев колеса от действия циклических нагрузок.

4. Износ рабочих поверхностей зубьев колес и витков червяков (витки изнашиваются значительно меньше для сочетания материалов сталь – бронза).

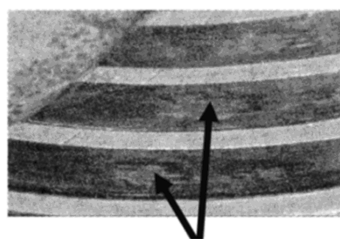
5. Заедание – наиболее опасный вид отказа червячных и спироидных передач.

Первые три вида отказов не являются характерными для спироидных передач.

Для сочетания материалов звеньев передачи сталь – бронза характерным является постепенный износ зубьев колеса, для сочетания материалов пары сталь – сталь необходимо исключить возможность возникновения прогрессирующего заедания контактирующих поверхностей (рис. 2).



a



b

Рис. 2. Зубья спироидных колес: *a* – износ зуба; *b* – задир на поверхностях зубьев

Fig. 2. Teeth of spiroid wheels: *a* - tooth wear; *b* - scuffing on tooth surfaces

В статье рассмотрен подход к прогнозированию ресурса спироидной передачи с учетом ступенчатого режима нагружения.

Для расчетов на усталостную прочность прямозубых и косозубых цилиндрических зубчатых передач со стальными колесами согласно ГОСТ 21354–87 (СТ СЭВ 5744–86) используется график (рис. 3), учитывающий действие

максимальной нагрузки $F_{(1)}$ на контактную выносливость и на выносливость зубьев при изгибе.

Ступенчатый (переменный) режим нагружения рабочих органов в течение времени цикла является особенностью работы приводов подъемно-транспортных машин. Следует отметить, что расчет ресурса спироидных передач

по износу по максимальной нагрузке приводит, во-первых, к уменьшению ожидаемого ресурса,

во-вторых, к увеличению массогабаритных характеристик редуктора [15].

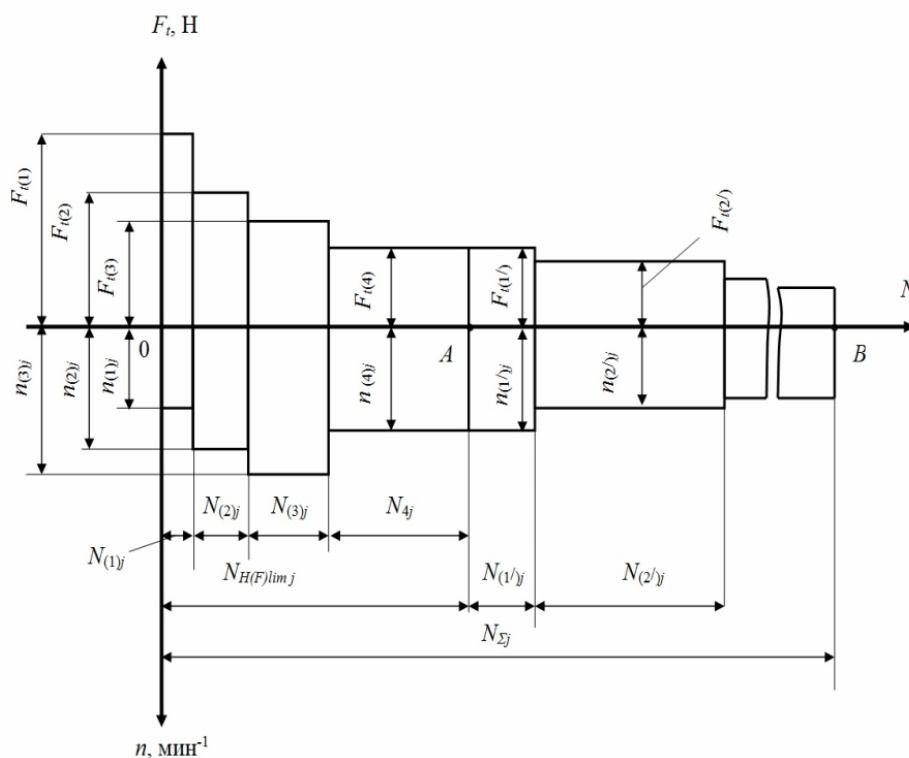


Рис. 3. График, характеризующий режим работы зубчатой пары

Fig. 3. Diagram characterizing the operation of the gear pair

Поскольку на интенсивность изнашивания зубьев колеса влияет большое число факторов, в работе используются экспериментальные данные интенсивности изнашивания от контактных напряжений, полученные методом роликовой аналогии [16].

Метод роликовой аналогии – метод физического моделирования, базирующийся на общности физико-механических процессов, происходящих в зоне контакта звеньев передачи и экспериментальных образцов (см., например, Анферов В. Н. Исследование износостойкости спироидных цилиндрических передач методом роликовой аналогии // Вестник машиностроения. 1981. № 6. С. 27–29).

На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости интенсивности изнашивания $J_{иср}$ и ресурса L зубьев спироидного колеса от значений вращающего момента на выходном валу редуктора T_i тяговой лебедки железнодорожного укладочного крана. Для тяговой лебедки характерны тяжелые режимы эксплуатации, при которых значительно изменяются полезные сопротивления на выходном валу спироидного редуктора и длительность их действия в течение цикла работы.

Данные зависимости $J_h = F(T_i)$ позволяют найти интенсивность изнашивания зуба спироидного колеса для соответствующего значения эквивалентного вращающего момента T_{HE} установленного графика переменного нагружения вала редуктора тяговой лебедки.

Цель исследования – разработка метода расчета ресурса спироидного редуктора по износу с учетом эквивалентного вращающего момента на выходном валу на основе полученных экспериментальных графиков зависимости интенсивности изнашивания и ресурса спироидного колеса от значений вращающего момента на выходном валу спироидного редуктора, а также с учетом графика ступенчатого нагружения выходного вала спироидного редуктора.

В представленном методе расчета ресурса используется термин «эквивалентный вращающий момент», действие которого равнозначно действию переменных по величине нагрузок на валу спироидного редуктора.

Предлагаемый в статье пример расчета базируется на основе разработанной автоматизированной программы «Расчет ресурса спироидной передачи при переменном режиме нагружения».

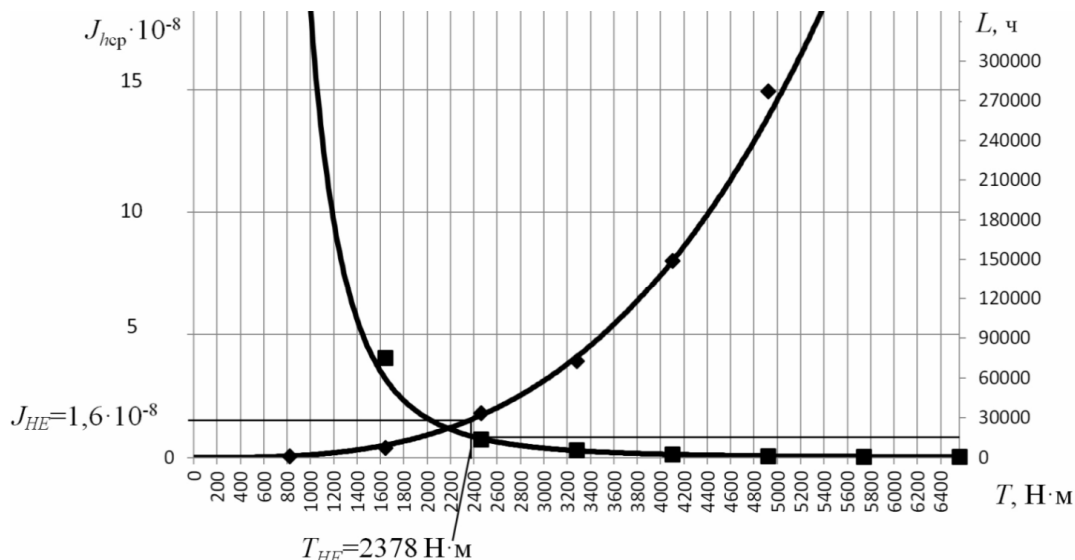


Рис. 4. Экспериментальные графики зависимости интенсивности изнашивания и ресурса спироидного колеса от значений вращающего момента на выходном валу редуктора тяговой лебедки

Fig. 4. Experimental diagram of the dependence of the wear rate and resource of the spiroid wheel on the torque values on the output shaft of the traction winch gearbox

Расчет ресурса спироидного редуктора в приводе лебедки для перетягивания пакетов звеньев рельсошпальной решетки

1. Эквивалентный вращающий момент на выходном валу спироидного редуктора [17]

$$T_{HE} = T_{max} \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n \left(\frac{T_i}{T_{max}}\right)^3 \frac{N_i}{N_{\Sigma}}}$$

где $T_{max} = 3280 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – максимальный рабочий вращающий момент; $\frac{T_i}{T_{max}}$ – относительное значение вращающего момента на i -й ступени нагружения выходного вала редуктора (рис. 5); $\frac{N_i}{N_{\Sigma}}$ – относительное количество циклов действия относительного значения вращающего момента на i -й ступени нагружения выходного вала редуктора (рис. 5); n – число ступеней нагружения выходного вала редуктора.

$$T_{HE} = 3280 \times \sqrt[3]{1^3 \cdot 0,226 + 0,667^3 \cdot 0,487 + 0,333^3 \cdot 0,287} = 2378 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Удельная расчетная сила в зацеплении, соответствующая эквивалентному вращающему моменту T_{HE} ,

$$w_{HE} = \frac{T_{HE}}{T_{max}} w_{HEmax},$$

где $w_{HEmax} = 389 \text{ Н} / \text{мм}$ – удельная расчетная сила в зацеплении, соответствующая максимальному рабочему вращающему моменту T_{max} .

$$w_{HE} = \frac{2378}{3280} \cdot 389 = 282,025 \text{ Н} / \text{мм}.$$

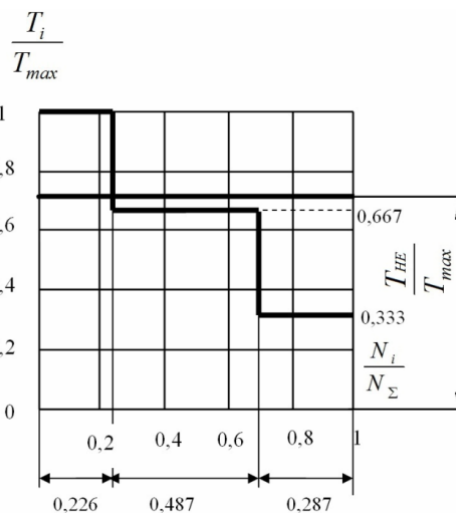


Рис. 5. График ступенчатого нагружения выходного вала спироидного редуктора тяговой лебедки

Fig. 5. Diagram of step loading of the output shaft of the spiroid gearbox of the traction winch

3. Предельно допустимый износ зубьев спироидного колеса для машин данного типа рассчитывается как

$$[h_2] = 0,125\pi m \cos \alpha_{xR},$$

где $m = 8$ мм – расчетный осевой модуль витка червяка; $\alpha_{xR} = 8$ – правый делительный осевой угол профиля витков червяка.

$$[h_2] = 0,125 \cdot 3,14 \cdot 8 \cdot \cos 8^\circ = 3,11 \text{ мм.}$$

4. Прогнозируемый ресурс спироидного редуктора [18]:

$$L = \frac{[h_2]}{60 \cdot 2,25 \cdot J_{HE} \sqrt{w_{HE} \eta (\rho_{red1,2})_R} \frac{V_{SY2}}{V_{FY2}} n_2 i},$$

где $[h_2] = 3,11$ мм – предельно допустимый износ зубьев спироидного колеса; $J_{HE} = 1,6 \cdot 10^{-8}$ – экспериментально определенное значение интенсивности изнашивания материала спироидного колеса, соответствующее эквивалентному вращающему моменту T_{HE} (определяется по графику, см. рис. 4); $\eta = 1,4 \cdot 10^{-5}$ мм²/Н – упругая постоянная соприкасающихся звеньев; $(\rho_{red1,2})_R = 91,2$ мм – приведенный радиус кривизны в расчетной точке контакта зубьев колеса для правого делительного осевого угла профиля витков; $n_2 = 37$ об/мин – номинальная частота вращения выходного вала; $V_{SY2} = 4037$ мм/с – скорость скольжения в расчетных точках профиля зубьев колеса; $V_{FY2} = 962$ мм/с – окружная скорость в расчетных точках профиля зубьев колеса; $i = 1$ – число пар зацепления с рассматриваемым зубчатым колесом.

$$L = \frac{3,11}{60 \cdot 2,25 \cdot 1,6 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{282,025 \cdot 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 91,2} \cdot \frac{4037}{962} \cdot 37} = 15453 \text{ ч.}$$

Выводы

1. Предложен метод расчета ресурса спироидного редуктора тяговой лебедки по износу зубьев спироидного колеса на основе экспериментальной зависимости $J_h = F(T_i)$ с учетом эквивалентного вращающего момента.

2. Экспериментальная зависимость интенсивности изнашивания J_h зубьев спироидного колеса (материал – бронза БрА9Ж4) от значений вращающего момента на выходном валу спироидного редуктора T_i позволяет определить значение интенсивности изнашивания J_{HE} , соответствующее эквивалентному вращающему моменту T_{HE} , и оценить ресурс спироидного редуктора в условиях ступенчатого режима нагружения. Данная экспериментальная зависимость получена с использованием метода роликовой аналогии.

Библиографические ссылки

1. Гольдфарб В. И. Некоторые аспекты современного состояния теории и практики зубчатых передач // Сборник докладов научно-практической конференции с международным участием «Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения» (Ижевск, 3–5 декабря 2008 г.). Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2008. С. 8–15.
2. Спироидные редукторы трубопроводной арматуры / В. И. Гольдфарб, Д. В. Главатских, Е. С. Трубачев, А. С. Кузнецов, Е. В. Лукин, Д. Е. Иванов, В. Ю. Пузанов. М. : Вече, 2011. 222 с.
3. Спироидные редукторы для работы в экстремальных условиях : монография / В. И. Гольдфарб, В. Н. Анферов, Д. В. Главатских, Е. С. Трубачев ; под ред. В. И. Гольдфарба. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. 156 с.
4. Гольдфарб В. И., Трубачев Е. С., Кузнецов А. С. Сопоставительный анализ поколений спироидных редукторов приводов трубопроводной арматуры // Арматуростроение. 2015. № 1. С. 80.
5. Saari O.E. Skew-axis gearing. Patent 2954704 USA. Publ. on 04-Oct-1960.
6. Saari O.E. Speed-Reduction Gearing. Patent USA № 2696125, 1954.
7. Kazkaz G., Puppala M., Richard D. Illinois. Hybrid enveloping spiroid and worm gear. Patent 20120000305 USA. Publ. on 05-Jan-2012.
8. Экспериментальные исследования низкоскоростных тяжело нагруженных спироидных редукторов / В. И. Гольдфарб, Е. С. Трубачев, А. С. Кузнецов, А. А. Корнилов // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 1 (23). С. 31–36.
9. Гольдфарб В. И., Трубачев Е. С., Кузнецов А. С. Перспективы и практика применения спироидных передач в приводах трубопроводной арматуры // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. № 5. Ч. 2. С. 61–74.
10. Трубачев Е. С., Пушкарев А. Э., Пушкарева Т. А. Структурная модель приводов трубопроводной арматуры // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2017. Т. 20, № 1. С. 6–8. DOI: 10.22213/2413-1172-2017-1-6-8.
11. Gol'dfarb V.I., Trubachev E.S., Kuznetsov A.S., Kornilov A.A., Reshetnikov S.M., Kharanzhevskii E.V. [Slip bearings and lubricants in low-speed heavy-duty spiroid gears]. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, no. 8, pp. 584-588.
12. Trubachev E. [Several issues of tooth generating process by two-parametric families of generating lines]. *Mechanisms and Machine Science*, 2016, vol. 34, pp. 97-116.
13. Trubachev E. [New concept of the process of designing gearboxes and gear systems]. *Mechanisms and Machine Science*, 2016, vol. 34, pp. 405-423.
14. Дроздов Ю. Н., Анферов В. Н. К расчету ресурса спироидных передач по износу // Расчетно-экспериментальные методы оценки трения и износа : монография. М. : Наука, 1980. С. 19–22.

15. Дроздов Ю. Н. Метод расчета на износ зубчатых передач // Передачи и трансмиссии. 2002. № 2. С. 37–43.

16. Коваленко Р. К. Результаты исследования коэффициента трения в спироидном зацеплении с сочетанием материалов звеньев пары сталь – сталь // Вестник СамГУПС. 2017. № 1. С. 21–28.

17. Анферов В. Н., Ткачук А. П., Зайцев А. В. Расчет ресурса спироидного редуктора в приводе кабелесборочного механизма электропрогрузчика // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2017. Т. 20, № 2. С. 24–28. DOI: 10.22213/2413-1172-2017-2-24-28.

18. Zaitsev A. Calculation of the resource of spiroid transmissions from wear in the step of loading mode. 2019. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 403 012221.

References

1. Gol'dfarb V.I. *Nekotorye aspekty sovremennoy sostoyaniya teorii i praktiki zubchatykh peredach* [Some aspects of the current state of the theory and practice of gears]. *Sbornik dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem "Teoriya i praktika zubchatykh peredach i reduktorostroyeniya"* (Izhevsk, 3-5 dekabrya 2008 g.) [Proc. of a scientific-practical conference with international participation "Theory and practice of gears and gear construction" (Izhevsk, December 3-5, 2008)]. Izhevsk, IzhGTU Publ., 2008, pp. 8-15 (in Russ.).

2. Gol'dfarb V. I., Glavatskikh D.V., Trubachev Ye.S., Kuznetsov A.S., Lukin Ye.V., Ivanov D.Ye., Puzanov V.Yu. *Spiroidnye reduktory truboprovodnoy armatury* [Spiroid gearboxes of pipeline valves]. Moscow, Veche Publ., 2011. 222 p. (in Russ.).

3. Gol'dfarb V.I., Anferov V.N., Glavatskikh D.V., Trubachev Ye.S. *Spiroidnye reduktory dlya raboty v ekstremal'nykh usloviyakh* [Spiroid gearboxes for operation in extreme conditions: monograph]. Izhevsk, IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova Publ., 2014, 156 p. (in Russ.).

4. Gol'dfarb V.I., Trubachev Ye.S., Kuznetsov A.S. [Comparative analysis of generations of spiroid gearboxes for pipeline valves]. *Armaturostroyeniye*, 2015, no. 1, pp. 80 (in Russ.).

5. Saari O.E. Skew-axis gearing. Patent 2954704 USA. Publ. on 04-Oct-1960.

6. Saari O.E. Speed-Reduction Gearing. Patent USA № 2696125, 1954.

7. Kazkaz G., Puppala M., Richard D. Illinois. Hybrid enveloping spiroid and worm gear. Patent 20120000305 USA. Publ. on 05-Jan-2012.

8. Gol'dfarb V.I., Trubachev Ye.S., Kuznetsov A.S., Kornilov A.A. [Experimental studies of low-speed heavily loaded spiroid gearboxes]. *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve*, 2014, no. 1, pp. 31-36 (in Russ.).

9. Gol'dfarb V.I., Trubachev Ye.S., Kuznetsov A.S. [Prospects and practice of using spiroid gears in actuators of pipe fittings]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki*, 2011, no. 5, part 2, pp. 61-74 (in Russ.).

10. Trubachev Ye.S., Pushkarev A.E., Pushkareva T.A. [Structural model of pipeline valves]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 6-8 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2017-1-6-8.

11. Gol'dfarb V.I., Trubachev E.S., Kuznetsov A.S., Kornilov A.A., Reshetnikov S.M., Kharanzhevskii E.V. [Slip bearings and lubricants in low-speed heavy-duty spiroid gears]. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, no. 8, pp. 584-588.

12. Trubachev E. [Several issues of tooth generating process by two-parametric families of generating lines]. *Mechanisms and Machine Science*, 2016, vol. 34, pp. 97-116.

13. Trubachev E. [New concept of the process of designing gearboxes and gear systems]. *Mechanisms and Machine Science*, 2016, vol. 34, pp. 405-423.

14. Drozdov U.N., Anferov V.N. *Raschetno-eksperimental'nyye metody otsenki treniya i iznosa* [Calculation and experimental methods for assessing friction and wear]. Moscow, Nauka Publ., 1980, pp. 19-22 (in Russ.).

15. Drozdov U.N. [Calculation method for wear gears]. *Peredachi i transmissii*, 2002, no. 2, pp. 37-43 (in Russ.).

16. Kovalenko R.K. [The results of the study of the friction coefficient in spiroid gearing with a combination of materials of links of a pair of steel - steel]. *Vestnik SamGUPS*, 2017, no. 1, pp. 21-28 (in Russ.).

17. 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 imeni M.T. Kalashnikova*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 24-28 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2017-2-24-28.

18. Zaitsev A. Calculation of the resource of spiroid transmissions from wear in the step of loading mode. 2019. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 403 012221.

Estimation of the Life of Spiroid Gears by Wear Taking into Account the Equivalent Torque

V.N. Anferov, DSc in Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia
A.V. Zaitsev, Siberian Transport university, Novosibirsk, Russia

The paper substantiates the feasibility of using spiroid gears in hoisting-and-transport and construction vehicles' drives and mechanisms. The unique advantages of these gears are noted, allowing to design machine drives with improved technical and economic indicators.

The information on the leading manufacturers of spiroid gears in Russia and abroad is given.

The paper provides a brief description and analysis of the main causes of failure of mechanisms and drives of machines based on gears and worm gears, as a result of their operation and the action of contact loads on the active sur-

faces of the gear teeth, which leads to malfunctions, breakdowns, failures in the form of wear, scuffing and tear. The existing method of calculating endurance is described taking into account the schedule for changing the values of loads and the number of cycles of their action on the contact endurance and on the endurance of teeth during bending, used in calculating the strength of spur and helical gears.

The necessity of creating a method for assessing the wear of spiroid gears is substantiated, taking into account the stepwise mode of action of loads based on an analysis of operating modes of drives of hoisting-and-transport machinery and equipment where this type of gear is used.

The proposed method is illustrated by an example of calculating the life of the spiroid gearbox for a traction winch of a stacking crane.

Keywords: wear, wear rate, gearing, life, spiroid gear, equivalent torque.

Получено 20.03.2020

Образец цитирования

Анферов В. Н., Зайцев А. В. Оценка ресурса спиroidных передач по износу с учетом эквивалентного вращающего момента // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 2. С. 31–37. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-31-37.

For Citation

Anferov V.N., Zaitsev A.V. [Estimation of the Life of Spiroid Gears by Wear Taking into Account the Equivalent Torque]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 31-37 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-31-37.