

---

---

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.  
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ

---

---

УДК 621.83:629.114

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ  
ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ СРЕДНЕГО МОСТА  
АВТОМОБИЛЯ КАМАЗ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ИХ КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ

© 2024 г. Е. П. Тимашов<sup>1</sup>, А. Г. Пастухов<sup>1, \*</sup>

<sup>1</sup>Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина,  
Белгород, Россия

\* e-mail: pastukhov\_ag@mail.ru

Поступила в редакцию 21.10.2024 г.

После доработки 08.12.2024 г.

Принята к публикации 20.12.2024 г.

На основе изучения номинальных режимов работы подшипниковых узлов среднего моста грузового автомобиля с колесной формулой 6 × 4 получена характеристика их температурного состояния. Доказана применимость технологии цифровой термодиагностики на основе установленных диагностических критериев.

*Ключевые слова:* надежность, техническая диагностика, контролепригодность, автоматическая диагностика, термодиагностика, подшипниковый узел

**DOI:** 10.31857/S0235711925020139, **EDN:** DFIPWH

Современный уровень развития цифровых технологий открывает большие перспективы для организации непрерывного мониторинга технического состояния узлов и агрегатов механических трансмиссий транспортных и технологических машин.

Исследованы и разработаны интеллектуальные и телеметрические системы дистанционного мониторинга технического состояния включающие алгоритмы реализации и специальные технические средства (микроконтроллеры, датчики и др.) для бесконтактного и автоматического контроля рабочих и сопутствующих параметров в процессе работы узлов трансмиссии тракторов и автомобилей [1–8].

Наиболее подходящим для автоматизации методом диагностирования является тепловой метод. Измерение текущей температуры и скорости ее изменения позволяет выявить потери механической энергии на трение в узлах, что обеспечивает своевременное выявление предельного состояния узла или агрегата механической трансмиссии на основе цифровой термодиагностики [9–13].

Регламенты технического обслуживания предполагают значительный расход трудоемкости разборочно-сборочных работ только лишь для диагностирования (дефектации) отдельного узла трансмиссии. Автоматическая диагностика узлов механических трансмиссий с учетом их нагруженности обеспечит существенное снижение затрат на операции технического обслуживания и ремонта [14–18].

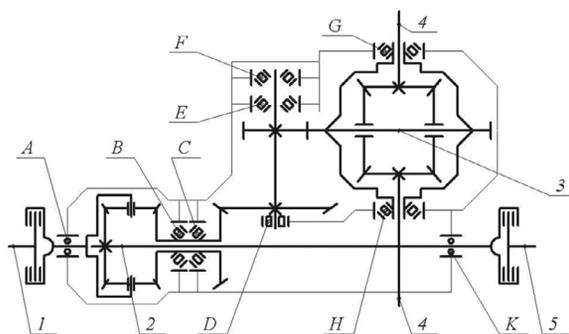
Разработанная технология цифровой термодиагностики узлов механических трансмиссий предполагает косвенную оценку температуры в зоне трения путем установления взаимосвязи между температурой в зоне измерения и температурой в зоне трения [12, 13]. При этом актуальным является обоснование величин темпе-

ратур, характеризующих нормальное и предельное состояние диагностируемого узла трансмиссии.

В качестве рабочей гипотезы исследования примем, что температура, характеризующая нормальное состояние узла, соответствует номинальным режимам его нагружения в условиях нормальной эксплуатации машины.

Рассмотрим подшипниковые узлы среднего моста автомобиля КАМАЗ с колесной формулой  $6 \times 4$ , в связи с его высокой нагруженностью при одновременной реализации тягового усилия и передаче мощности на задний мост. В качестве номинальных режимов при определении нагрузок на подшипниковые узлы примем режим работы двигателя, обеспечивающий крутящий момент 638 Нм при частоте вращения 2600 об/мин. Коробка перемены передач обеспечивает ряд передаточных чисел: 7.82; 4.03; 2.5; 1.53; 1.0, при величине КПД 0.922.

Исследуемый средний мост применяется в автомобилях моделей КАМАЗ-45143, 55102 и других, передаточное число редуктора моста — 6.53. Кинематическая схема среднего моста представлена на рис. 1.



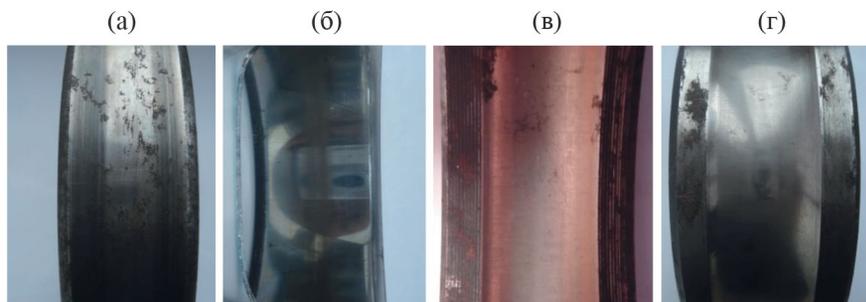
**Рис. 1.** Кинематическая схема среднего моста: 1 — карданный вал от КПП; 2 — межосевой дифференциал; 3 — межколесный дифференциал; 4 — полуоси; 5 — карданный вал к заднему мосту; A, B, C, D, E, F, G, H, K — подшипниковые опоры.

Средний мост устроен следующим образом. Входной вал установлен в опоре A и совмещен с чашкой межосевого дифференциала, служащего для распределения потока мощности между средним и задним мостом. Вращение передается к заднему мосту на выходной вал, установленный в опоре K, и на коническую передачу с круговыми зубьями. Вал шестерни конической передачи установлен в подшипниковых опорах B и C, зубчатое колесо конической передачи расположено на валу с опорами D, E и F. На этом валу установлена шестерня цилиндрической косоугольной передачи, приводящая в движение зубчатое колесо, установленное на опорах G и H. Кроме этого, средний мост снабжен муфтой отключения привода среднего моста (на кинематической схеме не показана).

При расчете нагрузок на подшипниковые узлы будем исходить из условия, что поток мощности равномерно распределяется между средним и задним мостом, а также между двумя полуосями среднего моста. С учетом геометрических параметров зубчатых передач и конструктивных размеров валов и подшипниковых опор определим нагрузки при работе моста для всех передач коробки перемены передач.

Входной вал среднего моста у многих грузовых автомобилей установлен на двух подшипниковых опорах, в рассматриваемой конструкции применено нестандартное решение — вал установлен в опоре A, состоящей из одного шарикового радиального однорядного подшипника 311 ГОСТ 8338-75, с размерами  $55 \times 120 \times 29$  мм и динамической грузоподъемностью 71.5 кН. Статическая радиальная нагрузка на подшип-

ник формируется за счет веса вала, чашки межосевого дифференциала и половины веса карданного вала и составляет 173.2 Н. К статической нагрузке добавляется динамическая нагрузка от вращения карданного вала с допустимой величиной дисбаланса 110 г·см. Так как вал установлен в одной опоре, то опору необходимо рассматривать, как защемление, при этом изгибающий момент в опоре составит 18.5 Нм. Для вычисления радиальной нагрузки на подшипник от действия изгибающего момента необходимо знать ширину дорожки качения подшипника. На рис. 2 представлены фотографии поверхностей колец разобранного подшипника опоры *A*.



**Рис. 2.** Фотографии поверхностей колец подшипника опоры *A*: (а) — посадочная поверхность наружного кольца; (б) — посадочная поверхность внутреннего кольца; (в) — дорожка качения наружного кольца; (г) — дорожка качения внутреннего кольца.

Посадочная поверхность наружного кольца (рис. 2а) имеет практически симметричные следы износа по краям, возникающая вследствие одноопорного закрепления вала измеренная величина средней, неизношенной части составляет в среднем 10.8 мм. Аналогичная картина изнашивания наблюдается и у посадочной поверхности внутреннего кольца (рис. 2б), при этом ширина неизношенной части составляет в среднем 4.4 мм. Дорожки качения имеют следы износа шириной в среднем 11.5 и 11.3 мм для наружного (рис. 2в) и внутреннего (рис. 2г) кольца, соответственно. Примем среднюю ширину дорожки качения 11.4 мм, как величину плеча для вычисления радиальной нагрузки от изгибающего момента 18.5 Нм.

В подшипниковой опоре *B* установлен роликовый конический однорядный подшипник 6-7214НАУ ГОСТ 27365-87 с размерами 70 × 125 × 26.25 мм, динамической грузоподъемностью 119 кН и углом контакта 14°. В подшипниковой опоре *C* установлен роликовый конический однорядный подшипник 6-751А ГОСТ 27365-87 с размерами 80 × 140 × 28.25 мм, динамической грузоподъемностью 119 кН и углом контакта 16°. На основе расчета сил в зацеплении зубчатой конической передачи с круговыми зубьями определены величины радиальных и осевых нагрузок на опоры. Эквивалентные нагрузки на подшипники вычислены в соответствии с ГОСТ 18555-94 «Подшипники качения. Динамическая расчетная грузоподъемность и расчетный ресурс (долговечность)».

Вал конического колеса установлен на опорах *D*, *E* и *F*, причем опора *D* — плавающая. В опоре *D* установлен роликовый радиальный подшипник 102409М ГОСТ 8328-75 с размерами 45 × 120 × 29 мм и динамической грузоподъемностью 106 кН. В опоре *E* установлен нестандартный роликовый конический подшипник 27911А с размерами 53.975 × 123.825 × 39.5 мм, динамической грузоподъемностью 140 кН и углом контакта 30°. В опоре *F* установлен роликовый конический подшипник 27310НУ1 ГОСТ 7260-81 с размерами 50 × 110 × 29.25 мм, динамической грузоподъемностью 80 кН и углом контакта 28°.

В опорах  $G$  и  $H$  межколесного дифференциала установлены роликовые конические однорядные подшипники 7216У ГОСТ 27365-87 с размерами  $80 \times 140 \times 28.25$  мм, динамической грузоподъемностью 112 кН и углом контакта  $16^\circ$ .

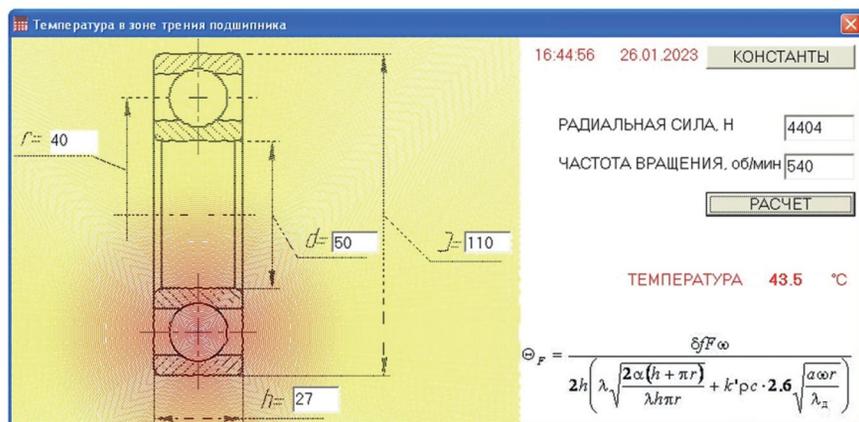
В подшипниковой опоре  $K$  установлен шариковый радиальный однорядный подшипник 6-310К ГОСТ 8338-75 с размерами  $50 \times 110 \times 27$  мм и динамической грузоподъемностью 61.8 кН. Расчет радиальной нагрузки на этот подшипник проведен аналогично расчету нагрузки на подшипник в опоре  $A$ . Результаты расчета эквивалентных нагрузок на подшипниковые узлы от реакций в опорах и от действия сил в зацеплении конической и цилиндрической передач представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Результаты расчета эквивалентных нагрузок в подшипниковых узлах

Нагрузка в опорах, кН	Передачи				
	I	II	III	IV	V
$R_{\text{ЭКВ}}^A$	1.80	1.80	1.81	1.83	1.88
$R_{\text{ЭКВ}}^B$	8.96	4.61	2.86	1.75	1.15
$R_{\text{ЭКВ}}^C$	56.4	29.1	18.0	11.0	7.21
$R_{\text{ЭКВ}}^D$	65.5	33.8	20.9	12.8	8.38
$R_{\text{ЭКВ}}^E$	37.1	19.1	11.9	7.26	4.74
$R_{\text{ЭКВ}}^F$	37.1	19.1	11.9	7.26	4.74
$R_{\text{ЭКВ}}^G$	59.7	30.7	19.1	11.7	7.63
$R_{\text{ЭКВ}}^H$	45.7	23.6	14.6	8.95	5.85
$R_{\text{ЭКВ}}^K$	3.44	3.45	3.45	3.47	3.52

При расчете температуры в зоне трения подшипниковых узлов использована аналитическая модель [12, 13], расчет проводился с использованием программы ЭВМ «Калькулятор температуры в зоне трения радиального подшипника» [19]. Рабочее окно программы представлено на рис. 3.

В табл. 2 представлены результаты расчета температуры в зоне трения для всех подшипниковых узлов среднего моста. С учетом доли продолжительности работы трансмиссии на каждой передаче, определим усредненные величины температур в зоне трения [20].



**Рис. 3.** Рабочее окно программы ЭВМ «Калькулятор температуры в зоне трения радиального подшипника».

Таблица 2. Результаты расчета температуры в зоне трения подшипниковых узлов

Передачи	I	II	III	IV	V	Усредненная температура, °C	
Продолжительность работы трансмиссии, %	0.6	1.8	7.6	20	70		
Температура в подшипниковых опорах, °C	A	12.3	17.4	22.4	29.2	37.2	32.7
	B	64.2	46.7	37.1	29.3	23.7	25.7
	C	<b>355.7</b>	<b>258.5</b>	<b>205.1</b>	<b>161.5</b>	<b>131.1</b>	<b>142.1</b>
	D	<b>351.7</b>	<b>257.2</b>	<b>204.8</b>	<b>161.7</b>	<b>131.5</b>	<b>142.5</b>
	E	140.4	102.4	81.4	64.2	52.1	56.5
	F	200.1	146.4	116.6	92.1	74.9	81.2
	G	132.5	98.3	78.9	62.7	51.2	55.4
	H	101.6	75.3	60.5	48	39.2	42.4
	K	26.3	37.3	47.9	62.1	78.2	69.1

На рис. 4 представлена графическая интерпретация результатов расчета температуры в зоне трения.

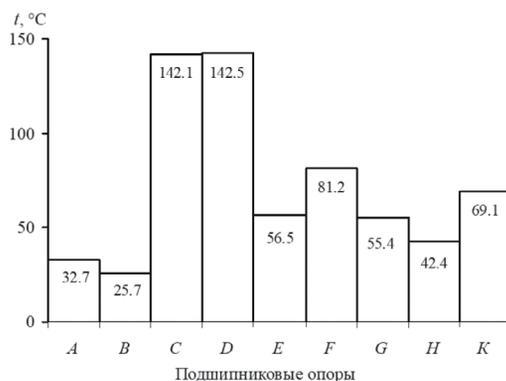


Рис. 4. Результаты расчета усредненной температуры в зоне трения.

Анализ табл. 2 и рис. 4 показывает, что у подшипниковых опор C и D при работе на I и II передачах температура в зоне трения превышает предельную величину 250 °C, но т.к. на этих передачах продолжительность работы трансмиссии незначительна, то усредненная температура подшипниковых опор не превышает предельную величину [21].

Значения усредненной температуры по рис. 4 можно использовать в качестве диагностического критерия при автоматической диагностике, как критерии нормальной работы и нормального технического состояния подшипниковых узлов.

На примере подшипниковой опоры A, с применением разработанной технологии цифровой термодиагностики [12, 13] определим номинальную и предельную диагностические температуры. Для этого используем конечно-элементную модель подшипникового узла, и установим связь между температурой в зоне трения и температурой на поверхности узла, доступной для автоматического измерения. На рис. 5 представлены результаты моделирования температурных полей для определения коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели.

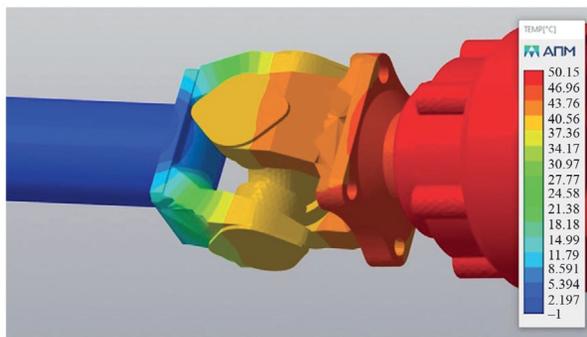


Рис. 5. Карта температурных полей для определения коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели.

При варьировании температуры в зоне трения от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $250^{\circ}\text{C}$  установлена прямая зависимость с коэффициентом пропорциональности конечно-элементной модели  $k = 0.89$ . С учетом полученного коэффициента, диагностическая температура, характерная для нормальной работы подшипникового узла составит  $32.7 \times 0.89 = 29.1^{\circ}\text{C}$ , а предельная температура —  $250 \times 0.89 = 222.5^{\circ}\text{C}$ . То есть при автоматическом диагностировании можно установить диапазон значений температуры для рассматриваемой подшипниковой опоры с нижней границей  $29.1^{\circ}\text{C}$  и с верхней границей  $222.5^{\circ}\text{C}$ , характерной для наступления предельного состояния.

При экспериментальной проверке температурного режима подшипниковой опоры *A* установлено, что при температуре окружающего воздуха  $15.5^{\circ}\text{C}$  измеренная температура на поверхности опоры составила  $47.6^{\circ}\text{C}$ . Приращение температуры составляет  $47.6 - 15.5 = 32.1^{\circ}\text{C}$  (рис. 6).

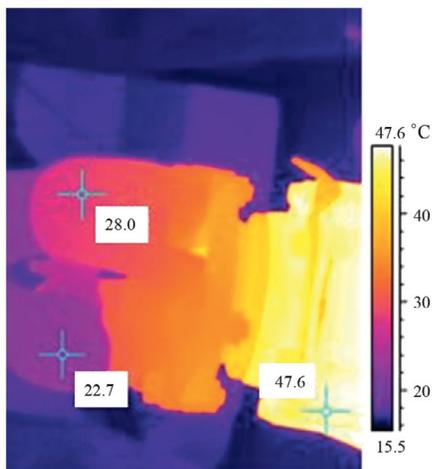


Рис. 6. Термограмма в зоне подшипниковой опоры *A*.

Полученная экспериментальным путем величина диагностической температуры  $32.1^{\circ}\text{C}$  сопоставима с температурой, определенной теоретически  $29.1^{\circ}\text{C}$ , и соответствует нормальной работе подшипникового узла. Таким образом, принята гипотеза о соответствии температуры, характеризующей нормальное состояние узла, его номинальным режимам нагружения при эксплуатации машины является верной.

**Выводы. 1.** Получены расчетные величины температур девяти подшипниковых узлов, характерных для нормального режима работы среднего моста автомобиля КАМАЗ с колесной формулой  $6 \times 4$ . **2.** Установлена прямая зависимость между температурой в зоне трения и температурой на поверхности узла, доступной для автоматического измерения, опоры *A* входного вала среднего моста с коэффициентом  $k = 0.89$ . **3.** Установлен температурный диапазон для опоры *A* входного вала среднего моста  $29.1\text{--}222.5\text{ }^\circ\text{C}$ , что повышает контролепригодность узла для автоматического диагностирования. **4.** Установлена сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований, доказана возможность практического применения автоматической диагностики на основе изучения тепловых режимов среднего моста автомобиля.

**Финансирование.** Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ерохин М. Н., Дорохов А. С., Катаев Ю. В.* Интеллектуальная система диагностирования параметров технического состояния сельскохозяйственной техники // *Агроинженерия*. 2021. № 2 (102). С. 45.
2. *Костомахин М. Н., Катаев Ю. В., Петрищев Н. А. и др.* Система дистанционного мониторинга технического состояния с функцией контроля соблюдения режимов мобильных энергосредств // *Вестник машиностроения*. 2022. № 1. С. 67.
3. *Катаев Ю. В., Герасимов В. С., Тишанинов И. А.* Использование систем бесконтактной диагностики при техническом обслуживании энергонасыщенной сельскохозяйственной техники // *Технический сервис машин*. 2022. № 2 (147). С. 60.
4. *Костомахин М. Н., Пестряков Е. В.* Программный комплекс для дистанционного контроля узлов и агрегатов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. № 4. С. 19.
5. *Костомахин М. Н., Саяпин А. С., Пестряков Е. В., Петрищев Н. А.* Совершенствование средств диагностирования как фактор повышения ресурсосбережения при эксплуатации сельскохозяйственной техники // *Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения*. 2023. № 1 (22). С. 103.
6. *Костомахин М. Н., Пестряков Е. В., Петрищев Н. А., Саяпин А. С.* Повышение контролепригодности и совершенствование средств диагностирования сельскохозяйственной техники // *Огарёв-Online*. 2023. № 5 (190).
7. *Костомахин М. Н., Саяпин А. С., Пестряков Е. В., Петрищев Н. А.* Использование многофункциональных цифровых средств для диагностирования тракторов // *Технический сервис машин*. 2022. № 4 (149). С. 54.
8. *Шукина В. Н., Деянин С. Н., Казанцев С. П., Матвеев А. И.* Проектирование интеллектуальной системы контроля технического состояния парка мобильных машин // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24. № 5. С. 52.
9. *Zujic N., Dihovcni D.* Dimensional Measuring System with Temperature Compensation // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2024. 866 LNNS. P. 241.
10. *Lu Y., Lu X., Ye G., He Z., Chen T., Sheng L.* Thermal Failure Analysis of Gear Transmission System // *J. of Failure Analysis and Prevention*. 2024. V. 24 (1). 18 p. <https://doi.org/10.1007/s11668-024-01854-5>
11. *Габитов И. И., Неговора А. В., Разянов М. М.* Оперативный мониторинг и управление температурными режимами ресурснозначимых агрегатов автотракторной техники // *Технический сервис машин*. 2021. № 1 (142). С. 89.
12. *Пастухов А. Г., Тимахов Е. П.* Проектирование контролепригодных узлов механических трансмиссий // *Вестник машиностроения*. 2021. № 7. С. 22.

13. *Тимашов Е. П., Тимашов А. П., Миненко А. А.* Термометрическая диагностика карданного шарнира привода жатки CERIO 770 // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2020. № 2 (26). С. 94.
14. *Leonov O., Shkaruba N., Vergazova Y., Golinskiy P., Temasova G.* Modern Methods of Selecting the Process of Restoring the Operability of Parts During the Repair of Machines // AIP Conference Proceedings 2969, 2024. 050002.  
<https://doi.org/10.1063/5.0181942>
15. *Ли Р. И., Киба М. Р., Быконя А. Н.* Исследование трибологических параметров и контактных напряжений в подшипниках качения автомобилей // Наука в Центральной России. 2020. № 4 (46). С. 76.
16. *Гриценко А. Е., Серегин А. А.* Силовой анализ главной передачи ведущего моста трактора «Кировец» // Активная честолюбивая интеллектуальная молодёжь сельскому хозяйству. 2022. № 1 (12). С. 42.
17. *Барыкин А. Ю., Тахавиев Р. Х., Горбачев С. В.* Исследование нагруженности ведущих мостов грузового автомобиля КАМАЗ // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2020. № 3. С. 111.
18. *Девликамов Р. Р.* Основные неисправности и диагностика заднего моста автомобиля КАМАЗ // Сурский вестник. 2021. № 1 (13). С. 40.
19. *Тимашов Е. П., Пастухов А. Г., Тимашова О. В., Крючков А. М.* Программа для ЭВМ. РФ 2023661582. Калькулятор температуры в зоне трения радиального подшипника, 2023.
20. Проектирование трансмиссий автомобилей. Справочник / Под общ. ред. А. И. Гришкевича. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.
21. Методика ускоренных испытаний карданных передач сельскохозяйственных машин. Руководящий технический материал РТМ 23.2.74-79. М.: ВИСХОМ, 1980. 40 с.