

УДК 631.31

**Общеметодологические принципы повышения надежности резьбовых соединений сельскохозяйственных машин и орудий****General methodological principles for improving the reliability of threaded connections of agricultural machines and implements****А. М. ЕГОЖЕВ, д-р техн. наук  
А. К. АПАЖЕВ, канд. техн. наук****Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, Нальчик, Россия, artyr-egozhev@yandex.ru****A. M. EGOZHEV, DSc in Engineering  
A. K. APAZHEV, PhD in Engineering****V. M. Kokov Kabardino-Balkarian State Agrarian University, Nalchik, Russia, artyr-egozhev@yandex.ru**

От 50 до 70 % отказов рабочих органов и несущих конструкций сельхозмашин приходится на соединения с резьбовыми крепежными деталями. В статье приведены основные общеметодологические принципы обеспечения надежности резьбовых соединений сельскохозяйственных машин и орудий. Предложены структурная схема общей проблемы повышения надежности резьбовых соединений и основные пути повышения их надежности: разработка новых конструктивных решений резьбовых соединений, отвечающих указанным принципам; совершенствование метода расчета групповых резьбовых соединений, работающих в условиях частичного раскрытия стыка и контактных виброперемещений; совершенствование метода расчета групповых резьбовых соединений, работающих в условиях сложного нагружения с учетом контактных радиальных и угловых податливостей; использование численных методов расчета групповых резьбовых соединений; совершенствование методов стопорения от самоотвинчивания; совершенствование методов защиты соединений от коррозии. Предложена классификация основных факторов износоусталостного разрушения резьбового соединения, работающего в условиях сложного нагружения. Проведено уточнение коэффициента запаса усталостной прочности соединений сельскохозяйственных машин в зависимости от условий работы с использованием дополнительного коэффициента, зависящего от интенсивности износа и коррозии. В выражение для определения запаса усталостной прочности по касательным напряжениям введен коэффициент равномерности распределения поперечной нагрузки между крепежными деталями, зависящий от типа соединения, конструктивного зазора в соединении и количества крепежных деталей. Уточненная методика расчета усталостной прочности и предложенные основные принципы повышения надежности могут быть использованы в практике проектирования и ремонта сельхозмашин.

**Ключевые слова:** надежность; резьбовое соединение; раскрытия стыка.

From 50 to 70 % of failures of working organs and support frames of agricultural machines and implements are accounted for the connections with threaded fasteners. The paper deals with the basic general methodological principles for ensuring the reliability of threaded connections of agricultural machines and implements. The structural scheme of general problem of improving the reliability of threaded connections is proposed. The main ways of improving their reliability are: the development of new designs of threaded connections that meet the above-noticed basic principles; the improvement of the method of calculation of group threaded connections that operate under partial joint opening and contact vibration displacement; the improvement of the method of calculation of group threaded connections that operate under complex loading taking into account the radial and angular contact compliances; the use of numerical methods for calculating of group threaded connections; the improvement of methods of screw retention; the improvement of methods of corrosion protection. The classification of the main factors of fatigue wear failure of threaded connections that operate under complex loading is proposed. The elaboration of fatigue safety factor of connections of agricultural machines is given, depending on the operating conditions, with the use of additional factor which depends on the rate of wear and corrosion. For the expression to determine the degree of fatigue strength on the shear stresses, the uniformity factor of distribution of lateral load between the fasteners is introduced; it depends on the type of connections, constructive gap in the connection and quantity of fasteners. The specified method of calculating the fatigue strength and the proposed basic principles of improving the reliability may be used in the practice of design and repair of agricultural machines.

**Keywords:** reliability; threaded connection; joint opening.

**Введение**

Современный этап производства с.-х. продукции неразрывно связан с повышением рабочих скоростей машин и снижением их металлоемкости. Это, в свою очередь, поднимает проблему повышения надежности соединений деталей рабочих органов и несущих конструкций, обеспечивающих безотказность сельхозмашин.

В процессе работы эти соединения подвергаются статическим, динамическим и ударным нагрузкам, кор-

розии и абразивному износу. Разрушение соединений деталей рабочих органов сельхозмашин, помимо затрат на изготовление, приобретение запасных частей и ремонт, вызывает простой машин и нарушение оптимальных сроков полевых работ.

От 50 до 70 % отказов рабочих органов и несущих конструкций сельхозмашин приходится на соединения с резьбовыми крепежными деталями, хотя заложенные проектные запасы их прочности находятся в пределах от 1,5 до 3 [1].

Периодический осмотр и подтяжка резьбовых соединений составляют существенную долю времени технического обслуживания. При этом на поддержание машинно-тракторного парка в рабочем состоянии с.-х. производители в среднем тратят до 75 % средств, расходуемых на его эксплуатацию, а механизаторы — до 40 % рабочего времени.

В связи с этим повышение надежности резьбовых соединений деталей рабочих органов и несущих конструкций сельхозмашин в реальных условиях эксплуатации представляет актуальную народно-хозяйственную задачу.

### Цель исследования

Цель исследования состоит в разработке общеметодологических принципов и методов, обеспечивающих повышение надежности резьбовых соединений с.-х. машин и орудий.

### Материалы и методы

Сельхозмашины эксплуатируются в коррозионной и абразивной среде, поэтому грузонесущие резьбовые соединения деталей рабочих органов подвержены коррозии и абразивному износу. Коррозионное разрушение резьбовой поверхности ведет к снижению напряжения начальной затяжки соединения, увеличению коэффициента основной нагрузки крепежной детали, срезу витков, обрыву стержня крепежной детали при затяжке, а также отвинчиванию гайки или винта.

Коррозионно-механический износ резьбового соединения приводит к нарушению условий эксплуатации детали, вследствие чего нарушается или становится полностью невозможной дальнейшая работа соединения рабочего органа или машины в целом и требуется замена крепежных деталей, а в отдельных случаях и самой детали.

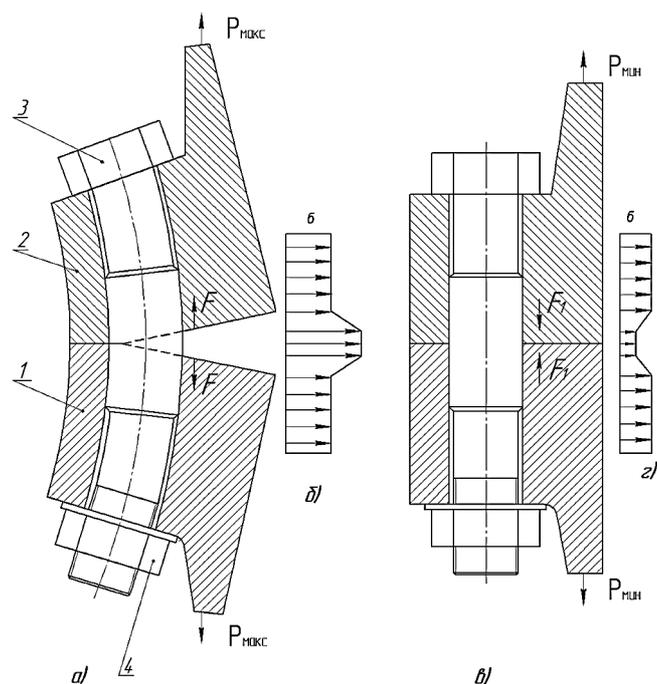


Рис. 1, а—г. Схема деформации резьбового соединения при частичном раскрытии стыка

Когда расчетные напряжения начальной затяжки крепежных деталей в соединениях рабочих органов сельхозмашин велики и не могут быть допущены при проектировании, в резьбовом соединении в реальных условиях эксплуатации не может быть обеспечено плотное прилегание соединяемых деталей. При этом под действием динамических, пиковых и ударных нагрузок будет иметь место частичное раскрытие соединения, что при небольших зазорах сопровождается изгибом тела крепежных деталей и деформационным скольжением соединяемых и крепежных деталей [2].

Деформационное скольжение соединяемых деталей по крепежным вызывает в наиболее напряженной области крепежной детали, например в раскрываемой при максимальном осевом усилии  $P_{\max}$  и нераскрываемой при меньших его значениях  $P_{\min}$ , знакопеременные осевые и касательные напряжения в материале крепежа и на поверхностях скольжения деталей (рис. 1). Условная эпюра напряжений  $\sigma$  на наиболее растянутом волокне болта, соответствующая максимальной и минимальной растягивающим силам с учетом сил трения  $F$  и  $F_1$  (см. рис. 1, а, б) соединяемых деталей о болты, изображена на рис. 1, б, г.

При частичном раскрытии (см. рис. 1, а) и последующем закрытии (см. рис. 1, б) резьбового соединения под действием переменных сил уплотняется поверхностный слой пояска, изменяется его микроструктура, снижается пластичность материала, что способствует появлению микротрещин и существенно снижает износоусталостную прочность материала болта и детали.

Частичное раскрытие соединения при его внецентренном нагружении сопровождается изгибом стержня болта и резким повышением растягивающих напряжений на наиболее напряженном волокне, способствующих появлению микротрещин усталости и снижению долговечности. Поскольку соединения рабочих органов и несущих конструкций сельхозмашин эксплуатируются в агрессивной среде, процесс износоусталостного разрушения ускоряется. В почве содержится около 20 % частиц пыли размером 25—50 мкм, 42,5 % — размером 50—100 мкм, 30 % — размером 100—250 мкм, 7,5 % — размером более 250 мкм [3]. Обладая твердостью до 14 ГПа, частицы пыли выступают в роли абразива. При попадании в частично раскрытое соединение эти микрочастицы вызывают абразивный износ соединяемых и крепежных деталей, существенно снижая усталостную прочность.

Следовательно, грузонесущие соединения деталей рабочих органов сельхозмашин в рядовых условиях эксплуатации подвержены явлениям коррозионно-механической и фрикционно-механической усталости и испытывают максимальные пиковые и ударные нагрузки, существенно снижающие их долговечность, что в настоящее время не учитывается при расчете и проектировании ответственных соединений.

Для существенного повышения надежности резьбовых соединений деталей рабочих органов и несущих конструкций сельхозмашин целесообразно использовать следующие основные принципы: уменьшение напряжения изгиба под резьбовой частью и головкой болта; повышение равномерности распределения поперечной нагрузки в крепежных деталях резьбового соединения; беззазорная установка крепежных деталей в отверстиях

или установка с минимальными зазорами; сочетание конических и цилиндрических форм деталей сопряженных резьбовых соединений; формирование пространств и полостей для заполнения полимерным или композитным материалом; повышение сопротивления резьбового соединения на сдвиг; снижение трудоемкости изготовления, разборки и сборки, а также ремонта резьбовых соединений.

В совокупности перечисленные основные принципы составляют концепцию решения общей проблемы повышения надежности резьбовых соединений на данном этапе их развития (рис. 2).

Основные виды нагружений деталей рабочих органов и несущих конструкций сельхозмашин: однократные, малоцикловые (до  $5 \cdot 10^4$  циклов) и многоцикловые (от  $1 \cdot 10^6$  циклов). В зависимости от скорости нагру-

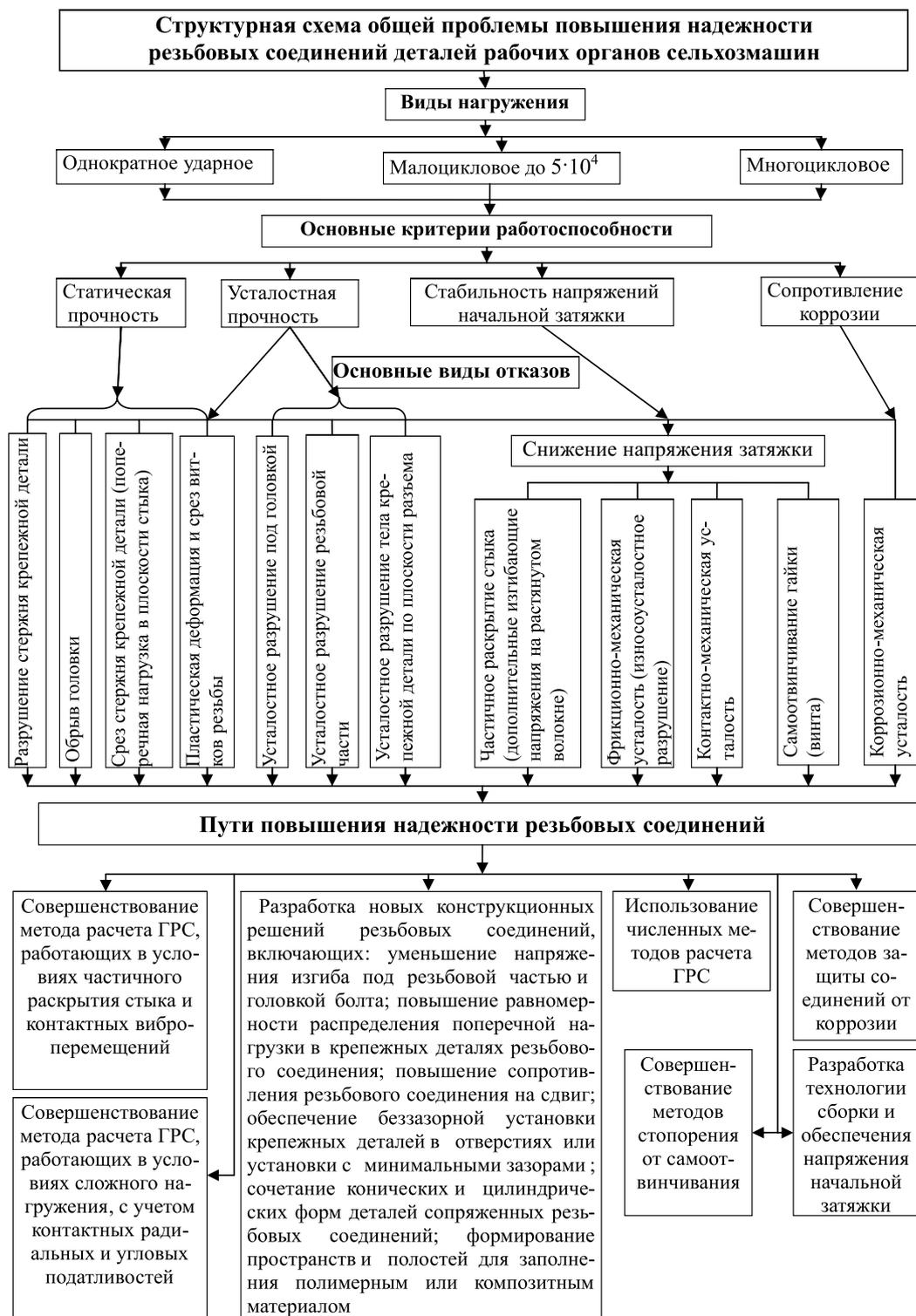


Рис. 2. Структурная схема общей проблемы повышения надежности резьбовых соединений рабочих органов сельхозмашин

жение может быть статическим, циклическим или ударным. При однократном статическом нагружении скорость нарастания напряжений обычно не превышает 500 МПа/с.

В условиях внецентренного растяжения соединения разрушение при однократном нагружении наступает, как правило, вследствие обрыва стержня крепежной детали или среза витков резьбы.

Усталостные разрушения крепежных деталей происходят на уровне наиболее нагруженного витка, под головкой крепежной детали или по сбегу резьбы, а в скрепляемых деталях чаще всего в местах концентрации напряжений (области фреттинг-изнашивания и фреттинг-коррозии, расположения отверстий, структурной неоднородности материала и т.п.). Проведенные экспериментальные исследования [4] показывают, что амплитуда разрушающей переменной нагрузки на соединения существенно меньше нагрузки, при которой происходит статическое разрушение. При этом предел выносливости стержня крепежной детали с резьбовой частью составляет примерно 5–32 % от предела выносливости гладкого образца и зависит от вида крепежной детали, ее геометрических параметров, механических характеристик материала крепежной детали и многих других факторов.

Пути повышения надежности резьбовых соединений деталей рабочих органов и несущих конструкций сельхозмашин: разработка новых конструктивных решений резьбовых соединений, отвечающих вышеизложенным основным принципам; совершенствование метода расчета групповых резьбовых соединений (ГРС), работающих в условиях частичного раскрытия стыка и контактных виброперемещений; совершенствование метода расчета ГРС, работающих в условиях сложного нагружения с учетом контактных радиальных и угловых податливостей; использование численных методов расчета ГРС; совершенствование методов стопорения от самоотвинчивания; совершенствование методов защиты соединений от коррозии.

### Результаты и их обсуждение

На основе анализа влияния различных негативных факторов на долговечность резьбовых соединений деталей рабочих органов сельхозмашин разработана классификация факторов износоусталостного разрушения резьбового соединения, работающего в условиях сложного нагружения (рис. 3) [5]. Из схемы на рис. 3 видно, что совместное воздействие на крепежную деталь поверхностных и объемных повреждающих факторов способствует износоусталостному разрушению соединения.

Частичное периодическое раскрытие соединения ухудшает условия работы крепежной детали и сопровождается следующими явлениями.

1) Сдвигом соединяемых деталей, выбором зазоров в соединении, при котором силы трения в стыке становятся равными нулю, в результате чего крепежная деталь начинает изгибаться под действием поперечных сил, вызывая существенные увеличения изгибающих напряжений под головкой болта и первым витком резьбовой части. Причем эти зазоры различны для одной посадки, и крепежные детали, поставленные с меньшими зазорами, вступают в работу раньше, чем крепежные детали,



Рис. 3. Классификация факторов износоусталостного разрушения соединений деталей рабочих органов с.-х. машин и орудий

поставленные с большими зазорами. Этот факт свидетельствует о неравномерном распределении нагрузки по крепежным деталям, что приводит к разрушению части крепежных деталей, поставленных с минимальными зазорами, когда в остальных сопряжениях имеет место зазор.

2) Изгибом стержня крепежной детали и резким увеличением растягивающих напряжений на наиболее растянутом волокне.

3) Появлением микроскольжения стержня крепежной детали и внутренней поверхности отверстий соединяемой детали, в результате чего изменяется микроструктура поверхности крепежной детали.

Эти факторы способствуют резкому снижению сопротивления усталости крепежных деталей основных грузонесущих соединений, что не учитывается классической методикой расчета соединений.

В настоящее время нет единого критерия износоусталостного разрушения соединений деталей с.-х. машин и орудий. Расчет коэффициентов запаса усталостной прочности проводят в основном по теории С. В. Серенсена и В. Н. Когаева [6], которая основана на гипотезе слабого звена. При этом запасы прочности определяются без учета таких дополнительных факторов, как износ крепежных и соединяемых деталей при частичном раскрытии стыка и коррозии.

Запас усталостной прочности соединений деталей рабочих органов сельхозмашин в зависимости от условий работы можно наиболее точно определить введением в выражение С. В. Серенсена и В. Н. Когаева дополнительного коэффициента  $K^*$ , зависящего от интенсивности износа и коррозии [5]. Тогда выражение для определения коэффициента запаса коррозионно-механической и фрикционно-механической усталостной прочности примет вид:

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma} K_d K_n K^* \sigma_a + \psi \sigma_m},$$

где  $K_G$  — эффективный коэффициент концентрации напряжений;  $K_d = 1/\varepsilon_G$ ,  $K_n = 1/\beta$  — коэффициенты, учитывающие размер детали и качество обработки ее поверхности;  $\psi$  — коэффициент асимметрии цикла;  $K^*$  — коэффициент, учитывающий эффекты износа и коррозии.

$$K^* = K_n K_K,$$

где  $K_n$ ,  $K_K$  — коэффициенты, учитывающие фреттинг-изнашивание и коррозию.

На основе результатов многочисленных экспериментальных исследований примем этот коэффициент в пределах  $1 \leq K^* \leq 3$ .

В выражение для определения запаса усталостной прочности по касательным напряжениям введем коэффициент равномерности распределения поперечной нагрузки между крепежными деталями  $K_p \geq 1$ . Он будет зависеть от типа соединения, конструкционного зазора в соединении, количества крепежных деталей и может находиться в диапазоне  $1 \leq K_p \leq 4$ .

Для посадки крепежных деталей с зазорами в групповом резьбовом соединении  $K_p = 4$  при  $z \geq 4$ ;  $K_p = 1$  при  $z = 1$ .

Тогда выражение для определения коэффициента запаса усталостной прочности по касательным напряжениям примет вид [5]:

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{K_\tau K_d K_n K_p \tau_a + \psi \tau_m}.$$

Анализ несущей способности резьбовых соединений деталей рабочих органов сельхозмашин показал, что существующая методика расчета соединений не в полной мере учитывает основные факторы, способствующие разрушению крепежных деталей, и не отвечает требованиям прочности и экономичности агрегатов. Превалируют большие избыточные напряжения, возникающие при сдвиге соединяемых деталей в условиях виброперемещений, дополнительные растягивающие напряжения на наиболее растянутом волокне при частичном раскрытии соединений и явления фрикционно-механической и коррозионно-механической износоусталости.

Эффективный способ повышения прочностной надежности резьбовых соединений деталей рабочих органов сельхозмашин — исключение фактора деформационного скольжения между крепежными и соединяемыми деталями при одновременном выравнивании поперечных нагрузок в ГРС.

## Выводы

Известные конструкционные решения по резьбовым соединениям любых типоразмеров и методы их расчета на прочность требуют корректировки с учетом новых процессов и факторов, выявленных в последнее время в соединяемых деталях и самом резьбовом соединении. В частности, не учитывались частичное раскрытие стыка соединяемых деталей при ударных нагрузках и факторы фрикционно-механической и контактно-механической усталости материала. Для существенного повышения надежности резьбовых соединений сельхозмашин в экс-

плуатационных условиях целесообразно использовать основные общеметодологические принципы.

Предложена структурная схема решения общей проблемы повышения надежности грузонесущих резьбовых соединений деталей рабочих органов и несущих конструкций сельхозмашин, которая включает: классификацию основных видов нагружения резьбовых соединений; основные критерии работоспособности резьбовых соединений; основные виды отказов с учетом частичного раскрытия стыка; виды фрикционно-механической и контактно-механической износоусталости; основные пути повышения надежности резьбовых соединений.

## Литература и источники

1. Бугов А. У., Егожев А. М., Апажев А. К. Повышение несущей способности резьбовых соединений деталей машин // Мат-лы науч.-практ. конф. М.: ГОСНИТИ, 1999. С. 117—119.
2. Бугов А. У., Егожев А. М. Износоусталость фланцевых соединений валов // Тяжелое машиностроение. 1998, № 4. С. 37—39.
3. Лебедев А. Т. Влияние износа деталей шпоночных соединений на безотказность работы зерноуборочных комбайнов // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: Мат-лы междунар. науч.-практ. конф. Ставрополь: Ставропольский ГАУ, 2006. С. 211—215.
4. Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.
5. Егожев А. М. Конструктивно-технологические решения повышения эффективности функционирования соединений деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин. Нальчик: Полиграфсервис и Т, 2013. 268 с.
6. Серенсен С. В., Когаев В. П. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.

## References

1. Bugov A. U., Egozhev A. M., Apazhev A. K. Increasing the bearing capacity of threaded connections of machine parts. *Mat-ly nauch.-prakt. konf. GOSNITI* [Proc. of sci. and pract. conf. of All-Russian Research Institute of Technology for Repair and Maintenance of Machine and Tractor Fleet]. Moscow, 1999, pp. 117—119 (in Russ.).
2. Bugov A. U., Egozhev A. M. Wear fatigue of flange connections of shafts. *Tyazheloe mashinostroenie*, 1998, no. 4, pp. 37—39 (in Russ.).
3. Lebedev A. T. The impact of wear of keyed connections parts on the failure-free performance of combine harvesters. *Aktual'nye problemy nauchno-tekhnicheskogo progressa v APK: Mat-ly mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Current issues of scientific and technical progress in agroindustrial complex. Proc. of int. sci. and pract. conf.]. Stavropol, Stavropol State Agrarian University, 2006, pp. 211—215 (in Russ.).
4. Birger I. A., Iosilevich G. B. *Rez'bovyye i flantsevye soedineniya* [Threaded and flanged connections]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 368 p.
5. Egozhev A. M. *Konstruktivno-tehnologicheskie resheniya povysheniya effektivnosti funktsionirovaniya soedineniy detaley rabochikh organov sel'skokhozyaystvennykh mashin* [Design and technological solutions to improve the operational efficiency of parts' connections of the working organs of agricultural machines]. Nalchik, Poligraf-servis i T Publ., 2013, 268 p.
6. Serensen S. V., Kogaev V. P. *Nesushchaya sposobnost' i raschet detaley mashin na prochnost'* [Bearing capacity and strength calculation of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 488 p.