



## Обеспечение безотказной работы деталей машин с использованием новой системы переменных допусков

В. А. Денисов, А. А. Соломашкин\*

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»  
(г. Москва, Россия)

\*[littor2013@gmail.com](mailto:littor2013@gmail.com)

*Введение.* Статья посвящена описанию алгоритма определения системы допусков, основанного на использовании переменного допуска, обеспечивающего безотказную работу деталей на участке. Приведена блок-схема программы по определению переменного допуска. Установлены блоки исходной информации: ломанные и гладкие кривые контролируемого параметра; гистограмма и график распределения ресурса и определения активного участка контроля; блоки построения графиков «предельных веерных кривых изнашивания» и системы допусков для объектов исследования двух типов, в данном случае для универсального топливного насоса (УТН-5) и четырехсекционного малогабаритного топливного насоса с механическим регулятором. Предложены два способа определения системы допусков. В первом варианте графически – путем построения «предельных веерных кривых изнашивания» и определения допусков по значению ординат в контрольных точках. Во втором варианте – аналитически. Разработана формула, заменяющая графический вариант определения системы допусков.

*Материалы и методы.* В качестве объекта исследования были выбраны два типовых насоса высокого давления. Для этих насосов были известны нормативные значения, то есть номинальные и предельные значения параметров, определены графики проведения проверок и уравнения кривых изнашивания. Устанавливались зависимости, описывающие кривые изнашивания плунжерных пар насосов, строились гистограмма и график определения ресурса насосов, определялся активный участок контроля при заданном коэффициенте вероятности безотказной работы, а также вычислялись и объединялись в систему допуска значения, вычисленные для различной наработки насоса.

*Результаты исследования.* В результате исследования получены системы допусков для топливного насоса высокого давления двух типов, определены показатели надежности для одного из них. Разработан алгоритм определения системы допусков как графически, так и аналитически по специально разработанной формуле.

*Обсуждение и заключение.* Исследование позволяет утверждать возможность использования переменного допуска, как основы для определения системы допусков и показателей надежности объекта диагностирования.

**Ключевые слова:** система допусков, постоянный допуск, переменный допуск, показатели надежности, вероятность отказа, средний срок службы

**Для цитирования:** Денисов, В. А. Обеспечение безотказной работы деталей машин с использованием новой системы переменных допусков / В. А. Денисов, А. А. Соломашкин – DOI 10.15507/2658-4123.030.202001.076-091 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 76–91.

© Денисов В. А., Соломашкин А. А., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

## Ensuring Reliable Operation of Machine Parts with a New System of Variable Tolerances

V. A. Denisov, A. A. Solomashkin\*

*Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)*

*\*littor2013@gmail.com*

**Introduction.** The article describes an algorithm for determining the system of tolerances for ensuring reliable operation of parts on the section. The block diagram of the program for determining the variable tolerances is demonstrated. There determined blocks of initial information – broken and smooth curves of the controlled parameter, histogram and graph of resource distribution and definition of active area of control, and blocks of building graphs of “marginal fan curves of wear” and systems of admissions for objects of study of two types: for universal fuel pump (UTN-5) and four-section small-sized fuel pump with mechanical regulator. Two ways of determining the system of tolerances are suggested. Variant 1 is a graphical way through constructing “limit fan curves of wear” and determining tolerances by the value of ordinates in the control points. Variant 2 is an analytical way. There is created a formula to replace the graphical method for determining system tolerances.

**Materials and Methods.** Two models of high-pressure pump were selected as objects of the study. Nominal and limit values of parameters were known for the pumps. Schedules for checking and equation of wear curves are determined. Dependencies describing the pump plunger pair wear curves are determined. A histogram and graph for determining pump life cycles are drawn. The active area of control is determined with a given failure probability coefficient.

**Results.** As a result of the study the values for the tolerances system of two types of high pressure fuel pumps are obtained. Reliability values for one pump type are determined. Graphic and analytical algorithms for determining the system of tolerances by the formula are developed.

**Discussion and Conclusion.** The study approves the possibility of using the variable tolerance as a basis for determining the system of tolerances and reliability indicators of the diagnostic object.

**Keywords:** system of tolerances, constant tolerance, variable tolerance, reliability indicators, probability of failure, average lifetime

**For citation:** Denisov V.A., Solomashkin A.A. Ensuring Reliable Operation of Machine Parts with a New System of Variable Tolerances. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):76-91. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.076-091>

### Введение

Допуски (в отличие от допусков и посадок по ГОСТу 25347-82<sup>1</sup>) при техническом обслуживании и ремонте (ТОР) являются составной частью диагностической системы, ее конечной

частью, завершающим этапом в определении исправности деталей машин. Основные положения, классификация, номенклатура диагностических параметров, встроенные системы диагностирования и многое другое отражены

<sup>1</sup> ГОСТ 25347-82. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки (с Изменением N 1)

в существующих ГОСТах по данной тематике<sup>2</sup>.

Система допусков – это ограничения, накладываемые на параметры технического состояния (ПТС) деталей машин, находящихся в эксплуатации<sup>3</sup> [1].

Если в результате диагностирования, значение контролируемого параметра превысило установленное заранее допусковое значение (допуск), то считается, что такая деталь «вышла за допуск» и она признается неисправной. Если же диагностируемая деталь не превысила эту отметку, то она считается исправной и работоспособной [2–5]. Актуальность работы состоит в том, что правильно подобранный допуск позволяет оценить исправность детали, ее потребность в замене и срок ее службы.

Рассмотрим это на примере диагностирования топливного насоса высокого давления (ТНВД). В качестве диагностического параметра, характеризующего исправность и работоспособность ТНВД, выбрана его цикловая подача  $q$ , полученная на его пусковых оборотах, то есть пусковая цикловая подача, измеряемая в мм<sup>3</sup>/цикл. Для этого параметра известна величина номинального значения  $U_{ном}$ , величина предельного значения  $U_{пр}$  (устанавливается в соответствии с ОСТ<sup>4</sup> и РТМ<sup>5</sup>), а также периодичность проверки при техническом обслуживании № 3 – через 1000 мото-часов. Вместе с этим

существуют устройства для контроля цикловой подачи насосов, стенды для диагностики и ремонта ТНВД.

Поскольку диагностирование проводится по графику  $Tk = \{tk_i\}$ , например, периодически через определенную межконтрольную наработку  $tm$ , то значение допуска  $U_{доп} - D$  устанавливается таким, чтобы деталь после  $i$ -й проверки ( $tk_i$ ) при наработке  $tk_i$  могла без отказа доработать до следующей проверки ( $i+1$ ), при наработке  $tk_{i+1}$ , то есть через межконтрольную наработку  $tm$  (рис. 1).

Обычно такой процесс описывается кривой изнашивания диагностируемой детали. Если значение контролируемого параметра изменяется, например, по степенной зависимости  $U(t) = v_i \cdot t^a$ , то  $U_{пр}(t) = v_i \cdot tk_2^a$  и  $U_{доп}(t) = v_i \cdot tk_1^a$ . Тогда допуск  $D = U_{пр}(tk_2) \cdot (tk_2 / tk_1)^a$  или  $D = U_{пр}(tk_2) \cdot ((tk_1 + tm) / tk_1)^a$ , где  $a$  – показатель степени степенной функции изнашивания;  $v_i$  – скорость изнашивания, ед. скорости.

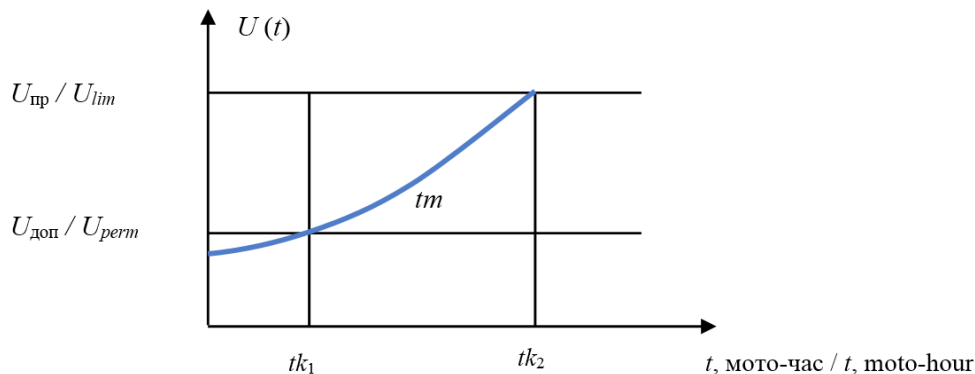
Кроме степенной можно использовать и другие элементарные функции и их комбинации. Пример приведен в работе А. А. Соломашкина [6]. Здесь находим анализ существующих и перспективных функций, которые могут использоваться в качестве кривых изнашивания. Для выбора наиболее информативных использовали два критерия: коэффициент достоверности аппроксимации и среднеквадрати-

<sup>2</sup> ГОСТ 25044-81. Техническая диагностика. Диагностирование автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных, строительных и дорожных машин. Основные положения; ГОСТ 25176-82. Техническая диагностика. Средства диагностирования автомобилей, тракторов, строительных и дорожных машин. Классификация. Общие технические требования; ГОСТ 26048-83. Техническая диагностика. Системы тормозные автомобилей, тракторов и монтируемых на их базе строительных и дорожных машин. Номенклатура диагностических параметров; ГОСТ Р 52122-2003. Техническая диагностика. Локомотивы магистральные. Встроенные системы диагностирования. Общие требования.

<sup>3</sup> Михлин В. М. Прогнозирование технического состояния машин. М.: Колос, 1976. 287 с.; Михлин В. М. Техническая диагностика тракторов и зерноуборочных комбайнов. М.: Колос, 1987. 287 с.; Михлин В. М. Теоретические основы прогнозирования технического состояния тракторов и сельскохозяйственных машин: дис. ... док. техн. наук. М., 1974. 378 с.

<sup>4</sup> ОСТ 23.1.364-81. Насосы топливные высокого давления тракторных и комбайновых дизелей. Метод ускоренных испытаний на надежность.

<sup>5</sup> РТМ 37.031.004-78. Надежность изделий автомобилестроения. Система сбора и обработки информации. Единый классификатор неисправностей изделий автомобилестроения (классификация и кодирование неисправностей).



Р и с. 1. Изменение контролируемого параметра на участке  $tk_1 \dots tk_2$ :

$U(t)$  – изменение параметра  $U(t)$  за время  $t$ , мото-час;  $U_{пр}$  и  $U_{доп}$  – предельное и допускаемое значение параметра, ед. изм.;  $t$  – наработка, мото-час;  $tm$  – межконтрольная наработка, мото-час;  $tk_1$  и  $tk_2$  – наработка, мото-час

F i g. 1. Change of a controlled parameter on the section  $tk_1 \dots tk_2$ :

$U(t)$  – parameter change  $U(t)$  in time  $t$ , moto-hour;  $U_{lim}$  and  $U_{perm}$  – limit and permissible value of the parameter, units of measurement;  $t$  – operating time, moto-hour;  $tm$  – mikontara life, moto-hour;  $tk_1$  и  $tk_2$  – operating time, moto-hour

ческое отклонение. Дополнительным условием была монотонность кривой, то есть отсутствие каких бы то ни было экстремумов, так как это не приемлемо для процесса изнашивания, износ идет только в одну сторону.

В итоге были получены следующие результаты. На первом месте – парабола, на втором – степенная функция и на третьем – экспонента. Исторически сложилось так, что чаще всего используется степенная функция, предложенная В. М. Михлиным<sup>6</sup>.

### Обзор литературы

Применение допусков при диагностировании подробно изложено в исследованиях разработчиков по данной теме [1–3].

Основным специалистом по допускам для сельскохозяйственных машин является ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ».

Здесь разрабатываются методы и средства диагностирования машин, а также стратегии технического обслуживания и ремонта машин, используя разработанные допуски.

В 2018 г. были разработаны два основных стандарта организаций (СТО) по системе допусков: СТО ВИМСТАНДАРТ 005-2018<sup>7</sup> и СТО ВИМСТАНДАРТ 004-2018<sup>8</sup>.

Первый СТО декларирует алгоритм получения допуска и формулу, его заменяющую. Здесь допуск переменный, учитывающий скорость изнашивания каждой конкретной детали в отдельности. Это позволяет выбраковывать те детали, у которых текущее значение контролируемого параметра превышает допускаемое значение (допуск). Такие детали находятся «за допуском». Они неисправны, и их следует заменить. Если же допуск не превышен, то деталь

<sup>6</sup> Михлин В. М. Теоретические основы прогнозирования технического состояния...

<sup>7</sup> СТО ВИМСТАНДАРТ 005-2018. Методика определения системы допусков для деталей сельскохозяйственных машин с учетом скорости их изнашивания.

<sup>8</sup> СТО ВИМСТАНДАРТ 004-2018. Методика определения основных показателей надежности деталей сельскохозяйственных машин с различной скоростью изнашивания.

«в допуске», она исправна, и ее оставляют в эксплуатации. При этом замене подлежат детали с большой скоростью изнашивания. Они первыми достигают предельного значения, отказывают и первыми подлежат выбраковке. Детали с малой скоростью изнашивания, то есть медленно изнашивающиеся, заменяются в последнюю очередь, дорабатывают до предела и имеют самый большой срок службы. Такой селективный отбор позволяет формировать потоки отказов деталей машин с различной скоростью изнашивания. Это позволяет оптимизировать процесс восстановления замененных деталей по степени их износа. Все процедуры селективного отбора объединены в один общий алгоритм выбраковки с переменным допуском, «реагирующий» на скорость изнашивания. Селективный подбор осуществляется по скорости изнашивания.

Здесь используется переменный допуск взамен постоянного, который не различает скорость изнашивания деталей. Постоянный допуск плохо контролирует отказы деталей с большой скоростью изнашивания и незаслуженно выбраковывает детали с малой скоростью изнашивания, лишая их возможности полностью использовать свой ресурс, то есть доработать до отказа.

Алгоритм выбраковки деталей позволяет заменить одной формулой все процедуры выбраковки деталей и получить значение допуска для деталей с различной скоростью изнашивания.

Второй СТО предназначен для получения основных показателей надежности, то есть вычисления вероятности отказа и среднего срока службы, использует допускаемые значения параметра, полученные в первом СТО. Это хорошее приложение к первому СТО. Вместе они составляют единое целое

для решения задачи надежности сельскохозяйственных машин.

Примеры стратегий, существующих и перспективных систем допусков, приведены в некоторых публикациях [7; 8].

Вместе с ФГБНУ «ГОСНИТИ» похожие работы проводят специалисты ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва». В анализе методов оптимизации допускаемых отклонений параметров они ссылаются на методику определения допусков, разработанную В. М. Михлиным, Ю. Н. Артемьевым<sup>9</sup> [9], В. Н. Дорогим [2; 3], а также работы таких специалистов, как Л. К. Челпан<sup>10</sup>, А. А. Соломашкин [10;11] и других.

### Материалы и методы

Для вычисления допуска  $D$  разработана компьютерная программа, позволяющая по исходным данным определить этот допуск. Блок-схема программы приведена ниже на рисунке 2. Для примера в качестве объекта были выбраны два ТНВД. Один универсальный топливный насос типа УТН-5, а второй – четырехсекционный малогабаритный топливный насос с механическим регулятором (4МТНМ). ТНВД является объектом, неисправность которого приводит к потере мощности дизеля, перерасходу топлива и плохой экологии в том месте, где работает насос.

Блок 1 – блок начальной, исходной информации. В качестве исходной информации была выбрана пусковая цикловая подача насоса.

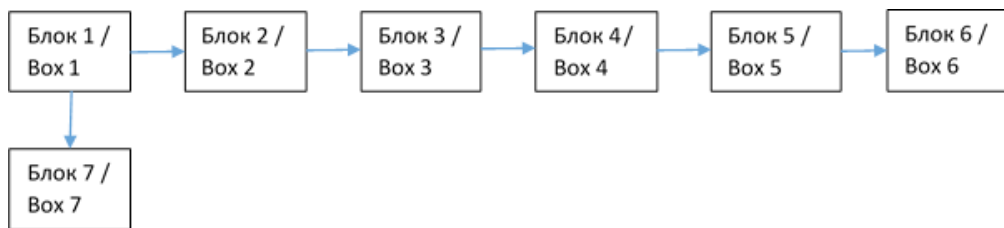
Значение пусковой цикловой подачи плунжерных пар насоса  $q$  можно получить, например, путем проведения стендовых, ускоренных износных испытаний на специальных стендах.

### Нормативные параметры насоса

Номинальное значение пусковой цикловой подачи насоса  $U_{ном} = 140 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ . Предельное значение пусковой цикловой подачи насоса

<sup>9</sup> Артемьев Ю. Н. Качество ремонта и надежность машин в сельском хозяйстве. М.: Колос, 1981. 239 с.

<sup>10</sup> Челпан Л. К. Предельные и допускаемые параметры дизелей, размеры деталей и соединений при ремонте: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1990. 44 с.



Р и с. 2. Блок-схема исследований

F i g. 2. Block diagram of research

$U_{np} = 110 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ . Время испытаний  $t_i = (0, 4, 8, 12, 16, 20, 24)$ , стендо-час. Коэффициент ускорения испытаний  $Ku = 100$ . Результаты таких испытаний для насоса УТН-5 приведены в виде массива  $q$  ( $8 \times 7$ ) на рисунке 3.

В блоке 2 точечные значения контролируемого параметра преобразуются в график на рисунке 4.

Далее в блоке 3 ломаные кривые аппроксимируются гладкой степенной функцией, строится соответствующий график (рис. 5) и определяется среднее значение коэффициента  $a$  – показателя степени, степенной функции каждой плунжерной пары насоса. Здесь же устанавливается предельное значение параметра  $U_{np} = 110 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ .

В блоке 4 определяются локальные ресурсы плунжерных пар и строится гистограмма и график закона распределения ресурса насоса.

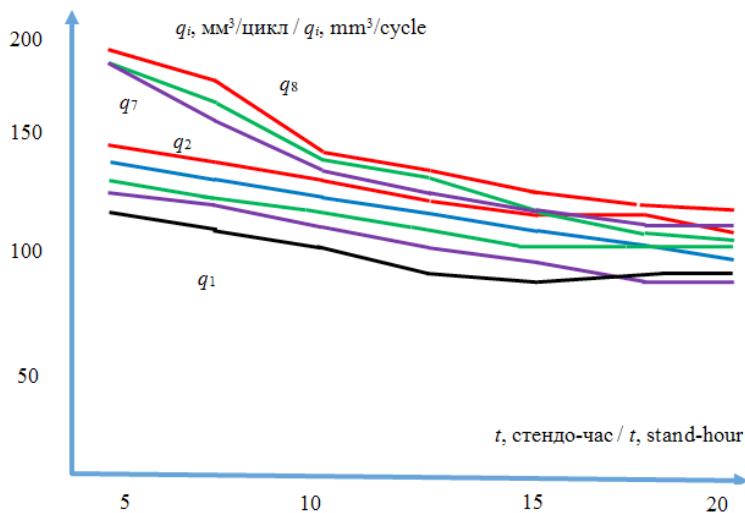
Значения локальных ресурсов каждой плунжерной пары составляют:  $Res_i = 1\,943, 2\,983, 2\,440, 2\,441, 1\,138, 1\,631, 2\,127, 3\,877$ . Вид графика закона распределения ресурса насоса приведен ниже в (1).

$$Res(t) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma}} \cdot \exp\left[\frac{-1}{2 \cdot \sigma^2} \cdot (t - \mu)^2\right]. \quad (1)$$

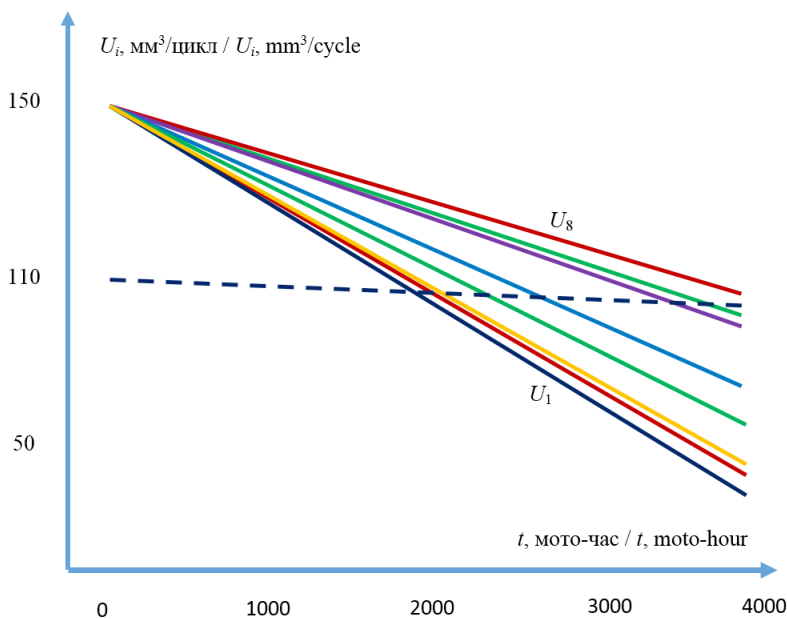
График гистограммы и закона распределения ресурса приведен ниже, на рисунке 6. Здесь  $T_{cp} = 2\,322$  мото-часов,

	122,7	115,0	105,5	95,3	89,2	85,1	77,8
	132,3	126,8	122,5	117,1	111,7	105,2	102,0
	127,9	121,8	115,1	108,5	102,0	96,7	90,0
$q =$	125,1	118,4	117,4	106,2	100,1	96,1	86,2
	185,9	175,5	156,6	145,6	135,5	123,0	117,6
	192,3	177,3	173,2	164,2	152,6	144,1	136,7
	173,7	166,9	160,1	155,2	145,2	135,1	130,7
	128,7	120,2	115,4	113,3	108,0	103,6	101,1

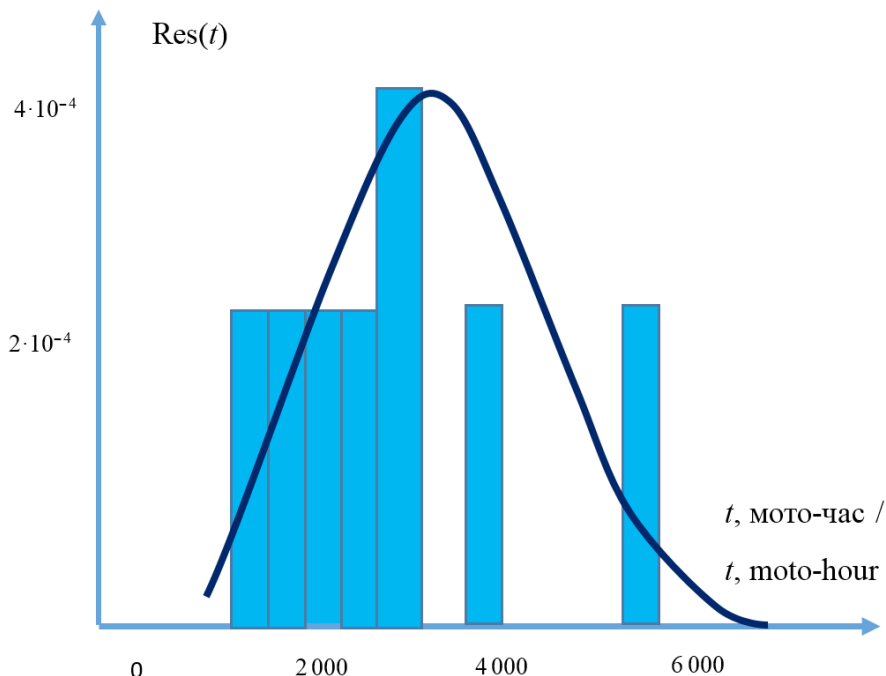
Р и с. 3. Исходные данные насоса УТН-5 – пусковая цикловая подача плунжерных пар:  $q$  – пусковая цикловая подача плунжерных пар насоса,  $\text{мм}^3/\text{цикл}$ F i g. 3. Input data of UTN-5 pump – starting injection plunger:  $q$  – starting injection quantity plunger pump,  $\text{mm}^3/\text{cycle}$



Р и с. 4. Значения контролируемого параметра пусковой цикловой подачи плунжерных пар насоса. Ломанные кривые:  $q_1 \dots q_8$  – пусковая цикловая подача насоса,  $\text{мм}^3/\text{цикл}$ ;  $t$  – наработка, стендо-час  
 F i g. 4. The values of the controlled parameter starting cycle flow of the pump plunger pairs. Broken curves:  $q_1 \dots q_8$  – starting cycle pump flow,  $\text{mm}^3/\text{cycle}$ ;  $t$  – time, stand-hour



Р и с. 5. Кривые изнашивания насоса и предельное значение пусковой цикловой подачи плунжерных пар насоса. Гладкие кривые:  $U_1 \dots U_8$  – пусковая цикловая подача насоса,  $\text{мм}^3/\text{цикл}$ ;  $t$  – наработка, мото-час; 110 – предельное значение подачи,  $\text{мм}^3/\text{цикл}$   
 F i g. 5. The wear curves of the pump and the limit value of the starting cycle flow of the pump plunger pairs. Smooth curves:  $U_1 \dots U_8$  – starting cycle pump flow,  $\text{mm}^3/\text{cycle}$ ;  $t$  – operating time, moto-hour; 110 – limit value of flow,  $\text{mm}^3/\text{cycle}$



Р и с. 6. Гистограмма и закон распределения ресурса насоса:  $Res(t)$  – ресурс насоса;  $t$  – наработка насоса, мото-час

F i g. 6. Histogram and distribution of the pump resource:  $Res(t)$  – pump resource;  $t$  – pump operating time, moto-hour

среднее квадратическое отклонение ресурса  $\sigma = 840$  мото-часов.

Далее идут блоки определения допусков. В Блоке 5 проводится определение активного участка контроля (АУК) и графика будущих проверок  $T_k$ .

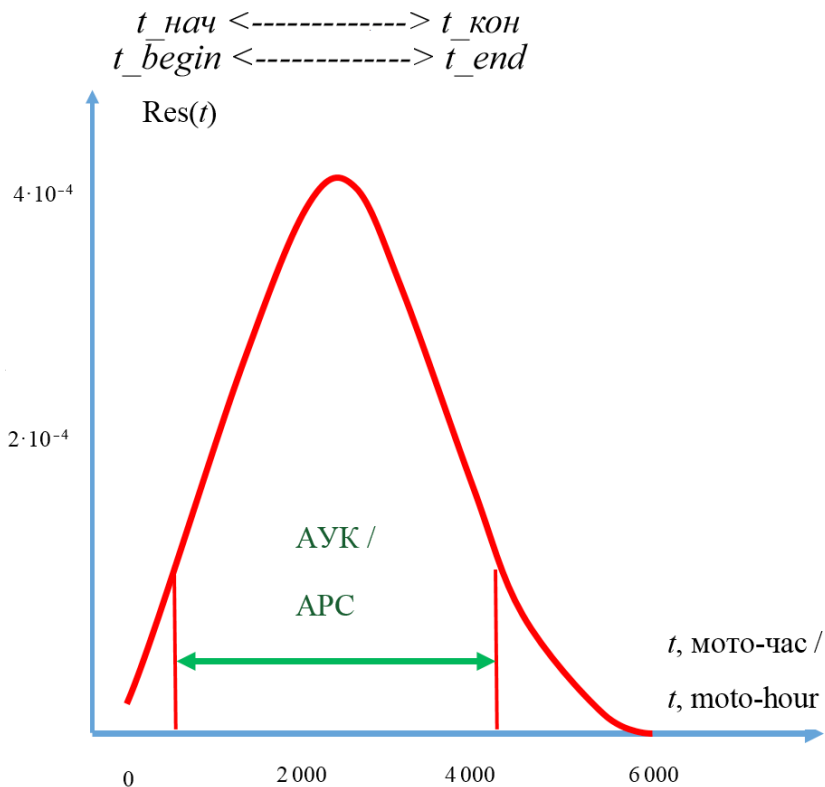
АУК устанавливается при условии определения активного участка контроля с известным значением  $B$ . Здесь  $B$  – это коэффициент доверительной безотказности работы объекта контроля – насоса. Для машиностроения  $B = 95\%$ , то есть на зону АУК приходится примерно 95 % всех отказов насоса из закона распределения его ресурса.

Так как 95 % составляет ширину наработки в  $2\sigma$  слева и справа от середины графика ресурса, то левая граница АУК будет  $-t_{нач} = T_{cp} - 2 \cdot \sigma$ , а правая  $-t_{кон} = T_{cp} + 2 \cdot \sigma$ . Следовательно, начало участка АУК будет  $-t_{нач} = T_{cp} - 2 \cdot \sigma = 2\ 333 - 2 \cdot 840 = 642$  мото-часа, а ко-

нец участка АУК – 4 002 мото-часа. Таким образом, весь активный участок контроля АУК, на который приходится 95 % отказов насоса, будет выглядеть так, как на рисунке 7.

Далее, в Блоке 6 задают график проведения проверок насоса  $T_k$  и определяют «предельные веерные кривые изнашивания» его плунжерных пар. Сначала определяют коэффициент скорости  $v_1$ , а затем уравнения этих «предельных веерных кривых изнашивания». Зная значения этих кривых, определяют систему допусков (несколько допусков) как значения кривых в соседних точках этих кривых, полученных для значений, соответствующих графику проведения проверок  $T_k$ . Для наглядности строят график «веерных кривых» и на этом графике определяют значения допусков (рис. 8). Пример таких вычислений приведен ниже.





Р и с. 7. Активный участок контроля АУК: Res(t) – ресурс насоса; t\_нач и t\_кон – начало и конец АУК, мото-час; t – наработка, мото-час

Fig. 7. Active phase of control APC: Res(t) – pump resource; t\_begin and t\_end – start and finish of the APC, moto-hour; t – operating time, moto-hour

Определение «пределных верных кривых изнашивания» и допусков (2...6). Из графика видно, что:

$$\begin{aligned} \text{veer0}(t_0) &= v1_0 \cdot t_0^a + U_{\text{НОМ}} \\ \text{veer0}(Tk_{1_0}) &= 110, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{veer1}(t_1) &= v1_1 \cdot t_1^a + U_{\text{НОМ}} \\ \text{veer1}(Tk_{1_0}) &= 124,406, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{veer2}(t_2) &= v1_2 \cdot t_2^a + U_{\text{НОМ}} \\ \text{veer2}(Tk_{1_1}) &= 119,541, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{veer3}(t_3) &= v1_3 \cdot t_3^a + U_{\text{НОМ}} \\ \text{veer3}(Tk_{1_3}) &= 117,135, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{veer4}(t_4) &= v1_4 \cdot t_4^a + U_{\text{НОМ}} \\ \text{veer4}(Tk_{1_4}) &= 115,698. \end{aligned} \quad (6)$$

**Результаты исследования**

Допуски, полученные графически, приведены на рисунке 8 (7...10).

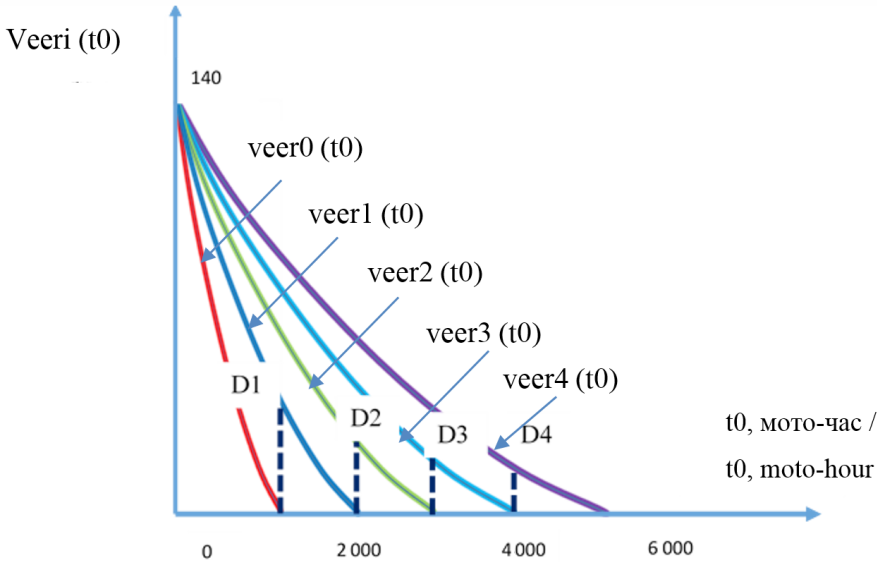
$$D1 = \text{veer1}(Tk_{1_0}) \quad D1 = 124,406, \quad (7)$$

$$D2 = \text{veer2}(Tk_{1_1}) \quad D2 = 119,541, \quad (8)$$

$$D3 = \text{veer3}(Tk_{1_2}) \quad D3 = 117,135, \quad (9)$$

$$D4 = \text{veer4}(Tk_{1_3}) \quad D4 = 115,698. \quad (10)$$

Указанный алгоритм содержит 6 связанных между собой блоков. Это следующие блоки: начальный блок и блок с исходной информацией. Здесь точечную информацию преобразуют в графическую. Далее, по этим данным строятся гистограмма и график закона распределения ресурса диагностируе-



Р и с. 8. График «предельных веерных кривых изнашивания» плунжерных пар насоса и системы допусков, полученные графически D1, D2, D3 и D4: veer0 (t0) ... veer4 (t0) – «предельные веерные кривые изнашивания» плунжерных пар насоса, мм<sup>3</sup>/цикл; система допусков D1...D4, мм<sup>3</sup>/цикл; t0 – наработка, мото-час

F i g. 8. Graph of limit fan wear curves of pump plunger pairs and tolerance systems obtained graphically D1, D2, D3 and D4: veer0 (t0) ... veer4 (t0) – limit fan curves of the pump’s plunger vapors, mm<sup>3</sup>/cycle; D1...D4 – tolerance system, mm<sup>3</sup>/cycle; t0 – work, moto-hour

мого объекта. Затем формируется активный участок контроля, на который приходится заданный процент отказов. Далее, на этом участке задается график проведения проверок, строятся нужные (предельные веерные) кривые, и с их помощью графически определяются кривые изнашивания и допуска. В итоге с помощью 6 блоков, содержащих различную информацию, графически определяются допуски.

Блок 7. Для получения этих допусков другим аналитическим способом разработана формула, определяющая эти же допуски аналитически, то есть по формуле, приведенной ниже.

Допуски, полученные по прилагаемой формуле, представляют группу допусков (систему допусков, полученных по формуле 11), заменяя целый алгоритм, состоящий из нескольких (в дан-

ном случае шести), связанных между собой различных блоков<sup>11</sup>.

$$D(i) = U_{\text{ном}} + (U_{\text{пр}} - U_{\text{ном}}) \cdot \left[ \frac{tm0 + (i-1) \cdot tm}{tm0 + i \cdot tm} \right]^{alfa} \cdot (11)$$

Результаты, полученные аналитически (12):

$$D(1) = 127,637 \quad D(2) = 120,852 \\ D(3) = 117,843 \quad D(4) = 116,141. (12)$$

Результаты, полученные графически (13):

$$D(1) = 127,637 \quad D(2) = 119,541 \\ D(3) = 117,135 \quad D(4) = 115,698. (13)$$

<sup>11</sup> Формула разработана А. А. Соломашкиным.

Результаты, полученные аналитически, отличаются от результатов, полученных графически, незначительно, на несколько процентов.

Получив систему допусков для этого насоса, можно определить его основные показатели надежности, такие

как вероятность отказа  $Q$  и средний срок службы  $T_{cp}$ . Результаты расчета приведены в таблице 1.

Локальные и интегральные показатели надежности насоса  $q$ ,  $t$  и  $Q_1$ ,  $T_{cp1}$ , полученные по методике, изложенной в СТО ВИМСТАНДАРТ 004-2018<sup>12</sup>.

Т а б л и ц а 1

Table 1

**Расчеты показателей надежности для переменного допуска**  
**Calculations of reliability metrics for variable tolerance**

Показатели надежности / Reliability indicators	Формула для вычисления / Formula for calculating	Результат / Result
Вероятность отказа / Probability of failure	$q_{отк1} = \int_0^{tm0} Res(t)dt$	0,020
Вероятность замены / Probability of replacement	$q_{зам1} = \int_0^{Tk-14} Res(t)dt$	0,977
Фактическая вероятность отказа / Actual probability of failure	$Q_{ф1} = q_{отк1}$	0,020
Общая вероятность отказа / Total probability of failure	$Q_1 = q_{отк1} + q_{зам1}$	0,996
Срок службы отказавших деталей, мото-час / Service life of failed parts, moto-hour	$t_{отк1} = \int_0^{tm0} t Res(t)dt$	8,194
Срок службы предварительно замененных деталей, мото-час / Service life of pre-replaced parts, moto-hour	$t_{зам1} = Tk_{-10} \cdot \int_{Tk_{-10}}^{Tk_{-11}} Res(t)dt +$ $+ Tk_{-11} \int_{Tk_{-11}}^{Tk_{-12}} Res(t)dt +$ $+ Tk_{-12} \int_{Tk_{-12}}^{Tk_{-13}} Res(t)dt +$ $+ Tk_{-13} \int_{Tk_{-13}}^{Tk_{-14}} Res(t)dt$	1 821
Фактический срок службы, мото-час / Actual service life, moto-hour	$T_{ф1} = t_{отк1} + t_{зам1}$	1 829
Средний срок службы, мото-час / Average service life, moto-hour	$T_{cp}$	2 322
Коэффициент вероятности отказа / Failure probability factor	$kQ_1 = \frac{Q_{ф1}}{Q_1}$	0,020
Коэффициент срока службы / Service life factor	$kT_1 = \frac{T_{ф1}}{T_{cp}}$	0,788

<sup>12</sup> СТО ВИМСТАНДАРТ 004-2018. Методика определения основных показателей надежности деталей...

Здесь расчеты приведены для переменного допуска.

Расчеты в таблице показывают, что для этого насоса при среднем сроке службы 2 322 мото-часов фактический срок службы равен 1 829 мото-часов, или 78,8 % от среднего, а вероятность отказа составляет 0,02, что является весьма незначительным для данного экземпляра.

Для сравнения результатов расчета дополнительно приведены исследования по определению системы допусков для другого типа ТНВД – 4МТНМ. Результаты приведены ниже.

Исходные данные насоса 4МТНМ:

$$T_{\text{cp}} = 9450 \quad \sigma = 500. \quad (14)$$

$$U_{\text{ном}} = 173 \quad U_{\text{пр}} = 135 \quad m_0 = 7\,800 \\ tm = 500 \quad a = 1,822. \quad (15)$$

Определение допустимых значений параметра  $D_i$  для данного графика проверок (16; 17). Допустимые значе-

ния параметра  $D_i$  (18; 19), полученные графически (рис. 9):

$$D1 = 139,043 \quad D2 = 138,819 \\ D3 = 138,618 \quad D4 = 138,438. \quad (16)$$

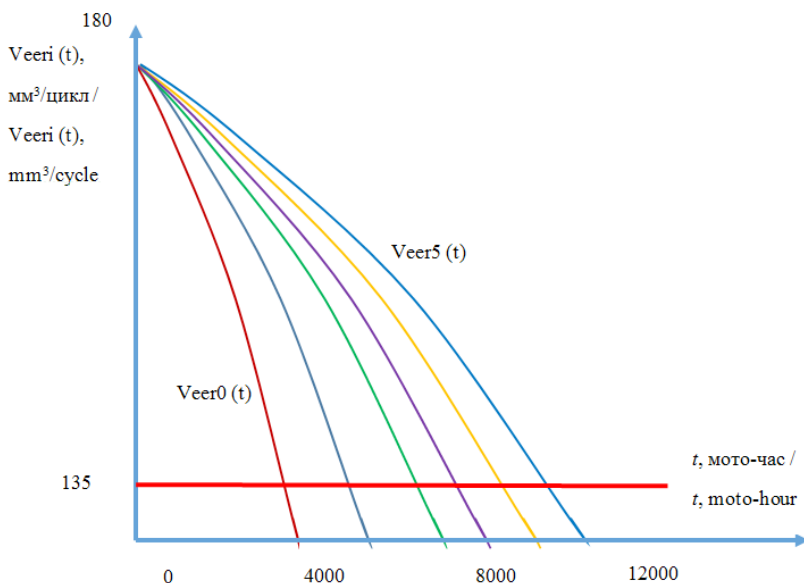
$$D5 = 138,274 \quad D6 = 138,126 \\ D7 = 137,990 \quad D8 = 137,833. \quad (17)$$

Допускаемые значения параметра  $D_i$ , полученные по приведенной формуле (11), указаны ниже в (18; 19):

$$D(1) = 139,043 \quad D(2) = 138,819 \\ D(3) = 138,618 \quad D(4) = 138,438. \quad (18)$$

$$D(5) = 138,274 \quad D(6) = 138,126 \\ D(7) = 137,990 \quad D(8) = 137,866. \quad (19)$$

На рисунке 9 приведены «предельные веерные кривые изнашивания» плунжерных пар насоса ТНВД – 4МТНМ, мм<sup>3</sup>/цикл, (типа 2...6), а также



Р и с. 9. «Предельные веерные кривые изнашивания» плунжерных пар насоса ТНВД – 4МТНМ, мм<sup>3</sup>/цикл; 135 – предельное значение цикловой подачи, мм<sup>3</sup>/цикл

F i g. 9. “Limiting fan curves of wear” of TNVD pump plunger pairs – 4MTHM, mm<sup>3</sup>/cycle; 135 – cycle limit, mm<sup>3</sup>/cycle

предельное значение цикловой подачи – 135 мм<sup>3</sup>/цикл.

На рисунке 10 показан способ определения допускаемых значений параметра  $D1$  (139,0 мм<sup>3</sup>/цикл) и  $D5$  (138,2 мм<sup>3</sup>/цикл).

Анализируя формулы (16; 17) и (18; 19), можно сделать вывод о том, что чем меньше коэффициент вариации ресурса, чем дальше график закона распределения ресурса находится от начала координат, тем меньше отличия между значениями допусков, полученных графически и аналитически. Дополнительно для указанного случая, когда скорость изнашивания деталей остается примерно постоянной, допуски можно определять, используя постоянную допуску  $D = 138$  (для описанного случая).

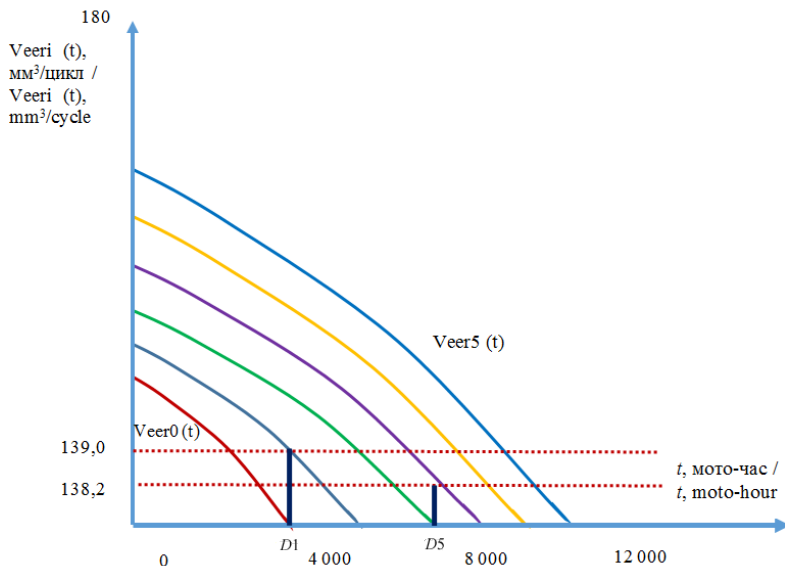
**Обсуждение и заключение**

Допуски в ТОР являются составной частью диагностической системы, ее заключительной частью, завершающим этапом в определении исправности деталей машин. Это ограничения,

накладываемые на изменения паспорта транспортного средства (ПТС) деталей машин, находящихся в эксплуатации. Если эти ограничения превышают нормативные допуски, то вероятность отказа детали машины очень высокая, то есть за допуском, но меньше предельной, такую деталь следует заменить, так как она не доработает до следующей межконтрольной проверки. Она считается неисправной.

В качестве допуска используются либо значения, полученные в алгоритме определения системы допусков, либо специально разработанная функция, заменяющая его и определяющая значения допуска при заданной наработке детали.

Итак, если в результате диагностирования значение контролируемого параметра превысило установленный заранее допуск, то считается, что такая деталь «вышла за допуск» и является неисправной. И наоборот, если значение контролируемого параметра



Р и с. 10. Система допусков для насоса 4МТНМ:  $V_{eeri}(t)$  – «предельные веерные кривые изнашивания» плунжерных пар насоса ТНВД – 4МТНМ, мм<sup>3</sup>/цикл;  $D1, D5$  – допускаемые значения

F i g. 10. The system of tolerances for 4МТНМ pump:  $V_{eeri}(t)$  – “limit fan curves of wear” of the TNVD pump plungers – 4МТНМ, mm<sup>3</sup>/cycle;  $D1; D5$  – value allowed

«в допуске», то есть оно не превысило допуск, то такая деталь считается исправной и работоспособной.

В состав этой системы допусков входят: номинальное  $U_{\text{ном}}$ , допускаемое  $D_{\text{доп}}$  и предельное значение  $U_{\text{пр}}$  контролируемого параметра, а также график проведения проверок ПТС –  $Tki = \{tki\}$  и уравнение кривой изнашивания, например,  $U(t) = \Delta U + v \cdot t^a$ , где  $U(t)$  – ресурсный параметр (износ);  $\Delta U$  – показатель приработки;  $t$  – наработка;  $v$  – скорость изнашивания;  $a$  – показатель степени степенной кривой изнашивания.

Такая система наиболее эффективна при ресурсном диагностировании. Она позволяет оценить исправность и срок

службы деталей машины за весь срок ее эксплуатации. Система считается ресурсосберегающей, так как при ее использовании резко сокращается число отказов в эксплуатации. Способ задания и использования такой ресурсосберегающей системы допусков представлен в существующих методиках.

Приведены примеры алгоритма и компьютерных программ применительно к двум ТНВД. Результаты вычисления системы допусков, полученные при помощи алгоритма и разработанной функции, отличаются незначительно, на 2...3 %, что свидетельствует о минимальной погрешности определения системы допусков.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Михлин, В. М.** Метод определения допускаемых износов деталей, обеспечивающий повышение их безотказности / В. М. Михлин, В. Н. Дорогой // Вестник машиностроения. – 2008. – № 7. – С. 11–14. URL: <https://www.mashin.ru/files/ve708.pdf> (дата обращения: 19.02.2020)
2. **Дорогой, В. Н.** Новая методика определения допускаемых износов деталей и соединений машин / В. Н. Дорогой // Машинно-технологическая станция – МТС. – 2008. – № 3. – С. 5–10.
3. **Дорогой, В. Н.** Алгоритм ресурсосберегающей методики определения и оценки допускаемых износов / В. Н. Дорогой, В. М. Михлин // Труды ГОСНИТИ. – 2008. – Т. 102. – С. 191–194.
4. **Зиченков, М. Ч.** Новый подход к созданию легких и надежных силовых композитных авиаконструкций / М. Ч. Зиченков, И. О. Кондаков, А. Н. Шаныгин // Научный вестник МГТУ ГА. – 2016. – Т. 19, № 6. – С. 127–136. URL: <https://avia.mstuca.ru/jour/article/view/994> (дата обращения: 19.02.2020) – Рез. англ.
5. **Мартышкин, А. П.** Анализ обоснования предельных параметров элементов машин и получение практической формулы определения предельных отклонений параметров с заданной безотказностью / А. П. Мартышкин, С. Е. Маскайкина, Н. И. Полуешина [и др.] // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – Т. 7, № 2. – С. 109. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/33TVN215.pdf> (дата обращения: 19.02.2020) – Рез. англ.
6. **Соломашкин, А. А.** Выбор аппроксимирующей функции для описания кривой изнашивания деталей машин / А. А. Соломашкин // Международный научный журнал. – 2011. – № 4. – С. 104–108. – Рез. англ.
7. **Казакова, В. А.** Стандарты организаций – стимулятор инновационного развития АПК / В. А. Казакова, В. А. Шинкевич // Стандарты и качество. – 2019. – № 6. – С. 52–54.
8. **Кокорева, Е. Б.** Повышение эффективности использования сельскохозяйственной техники / Е. Б. Кокорева // Бюллетень науки и практики. – 2018. – Т. 4, № 2. – С. 320–325. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-ispolzovaniya-selskohozyaystvennoy-tehniki> (дата обращения: 19.02.2020) – Рез. англ.
9. **Артемьев, Ю. Н.** Методика расчета допускаемых при ремонте размеров и натягов тракторных двигателей и сопряжений / Ю. Н. Артемьев // Труды ГОСНИТИ. – 1994. – Т. 4. – С. 3–20.

10. Соломашкин, А. А. Стратегии технического обслуживания и ремонта машин / А. А. Соломашкин // Труды ГОСНИТИ. – 2017. – Т. 128. – С. 145–151. URL: [http://vimtsm.ru/wp-content/uploads/2019/03/128\\_2017.pdf](http://vimtsm.ru/wp-content/uploads/2019/03/128_2017.pdf) (дата обращения: 19.02.2020) – Рез. англ.

11. Черноиванов, В. И. Алгоритм сравнения двух систем допусков / В. И. Черноиванов, В. А. Денисов, А. А. Соломашкин // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2019. – № 2. – С. 49–54. URL: <https://panor.ru/articles/algorithm-sravneniya-dvukh-sistem-dopuskov/2956.html> (дата обращения: 19.02.2020) – Рез. англ.

*Поступила 10.07.2019; принята к публикации 15.10.2019; опубликована онлайн 31.03.2020*

*Об авторах:*

**Денисов Вячеслав Александрович**, руководитель научного направления «Обеспечение надежности сельскохозяйственной техники» ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: T-4062-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3245-394X>, [va.denisov@mail.ru](mailto:va.denisov@mail.ru)

**Соломашкин Алексей Алексеевич**, ведущий специалист ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), Researcher ID: Y-8907-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0781-4715>, [littor2013@gmail.com](mailto:littor2013@gmail.com)

*Заявленный вклад соавторов:*

В. А. Денисов – формулирование основной концепции исследования и структуры статьи; А. А. Соломашкин – участие в теоретических и практических исследованиях, обработка экспериментальных данных, литературный и патентный анализ, подготовка текста статьи, формирование выводов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Mikhlin V.M., Dorogoy V.N. Determination Method of Details Allowable Wear Ensuring the Improvement of Their Unfailing Performance. *Vestnik mashinostroeniya* = Russian Engineering Research. 2008; (7):11-14. Available at: <https://www.mashin.ru/files/ve708.pdf> (accessed 19.02.2020). (In Russ.)

2. Dorogoy V.N. New Method for Determining Permissible Wear on Machine Parts and Connections. *Mashinno-tekhnologicheskaya stantsiya – MTS* = Machine Technological Station – MTS. 2008; (3):5-10. (In Russ.)

3. Dorogoy V.N., Mikhlin V.M. Algorithm of the Resource-Saving Method for Determining and Assessing Permissible Wear and Tear. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2008; 102:191-194. (In Russ.)

4. Zichenkov M.Ch., Kondakov I.O., Shanygin A.N. Novel Approach to Design of Lightweight and Reliable Composite Primary Aircraft Structures. *Nauchnyy vestnik MGTU GA* = Civil Aviation High Technologies. 2016; 19(6):127-136. Available at: <https://avia.mstuca.ru/jour/article/view/994> (accessed 19.02.2020). (In Russ.)

5. Martyshkin A.P., Maskaykina S.E., Polueshina N.I., et al. Analysis of Machines' Elements Limit Value Parameter Justification with Derivation of Practical Formula to Find Limit Declination of the Parameter with Given Reliability. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"* = Sociology of Science Internet Journal. 2015; 7(2):109. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/33TVN215.pdf> (accessed 19.02.2020). (In Russ.)

6. Solomashkin A.A. Choosing Approximating Functions for Describing Machinery Parts Wear Curve. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal* = International Scientific Journal. 2011; (4):104-108. (In Russ.)

7. Kazakova V.A., Shinkevich V.A. Corporate Standards: a Driver for Innovative Agribusiness Development. *Standarty i kachestvo* = Standards and Quality. 2019; (6):52-54. (In Russ.)

8. Kokoreva E.B. The Improved Utilization of Agricultural Machinery. *Byulleten nauki i praktiki = Bulletin of Science and Practice*. 2018; 4(2):320-325. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-ispolzovaniya-selskokozyaystvennoy-tehniki> (accessed 19.02.2020). (In Russ.)
9. Artemev Yu.N. Methodology for Calculating the Permissible Repair Dimensions and Tensions of Tractor Engines and Couplings. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 1994; 4:3-20. (In Russ.)
10. Solomashkin A.A. Strategies for Maintenance and Repair of Machines. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2017; 128:145-151. Available at: [http://vimtsm.ru/wp-content/uploads/2019/03/128\\_2017.pdf](http://vimtsm.ru/wp-content/uploads/2019/03/128_2017.pdf) (accessed 19.02.2020). (In Russ.)
11. Chernovanov V.I., Denisov V.A., Solomashkin A.A. An Algorithm for Comparing the Two Systems of Tolerances. *Selskokozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont = Agricultural Machinery: Maintenance and Repair*. 2019; (2):49-54. Available at: <https://panor.ru/articles/algorithm-sravneniya-dvukh-sistem-dopuskov/2956.html> (accessed 19.02.2020). (In Russ.)

*Received 10.07.2019; revised 15.10.2019; published online 31.03.2020*

*About the authors:*

**Viatcheslav A. Denisov**, Head of Scientific Direction “Ensuring the Reliability of Agricultural Machinery”, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: T-4062-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3245-394X>, [va.denisov@mail.ru](mailto:va.denisov@mail.ru)

**Aleksey A. Solomashkin**, Leading Specialist of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Researcher ID: Y-8907-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0781-4715>, [littor2013@gmail.com](mailto:littor2013@gmail.com)

*Contribution of the authors:*

V. A. Denisov – formulation of the basic research concept, article structure development; A. A. Solomashkin – participation in theoretical and practical research, processing of experimental data, literary and patent analysis, article text development, drawing conclusions.

*All authors have read and approved the final manuscript.*