

УДК 629.017:621.03+УДК 631.3.004.67

К.В. ЩУРИН, д-р техн. наук, проф.
профессор кафедры механики материалов и деталей машин¹
E-mail: tteng@mail.ru

В.Е. ТАРАСЕНКО, канд. техн. наук, доц.
заведующий кафедрой технологий и организации технического сервиса¹
E-mail: trs9@yandex.ru

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 31.03.2023.

КОРРЕКТИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ ОПЕРАЦИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА МОБИЛЬНЫХ МАШИН С УЧЕТОМ ЖЕСТКОСТИ КЛИМАТА

На основе анализа эксплуатационных факторов, среди которых для конкретных зон поставок техники одним из главных является климатический фактор, а также основных повреждающих деградационных процессов при эксплуатации машин предлагается эффективный механизм планирования периодичности операций технического сервиса, что способствует обеспечению высокого уровня технической готовности машин. Выполнен анализ потенциала работоспособности, рассмотрены его активная, резервная и пассивная части, что позволило представить модель изменения и восстановления потенциала работоспособности мобильной машины. Приведены математические зависимости для определенных моделей машин одинакового функционального назначения и характеризующие процессы снижения потенциала их работоспособности в определенной внешней среде, отмечена их трансформация при изменении природно-климатических условий эксплуатации. Построение априорной диаграммы рангов климатических факторов позволило отметить, что наиболее значимое неблагоприятное воздействие оказывают температура, влажность и солнечная радиация в зоне эксплуатации. С учетом распределения зон технической жесткости климата, его балла и коэффициента континентальности предложена методика корректирования периодичности операций технического сервиса транспортно-технологических машин для зоны их реальной эксплуатации.

Ключевые слова: модель, работоспособность, машина, сервис, фактор, жесткость, климат

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-14-24>

Введение. Промышленность Республики Беларусь является экспортно-ориентированной, и для поддержания и повышения конкурентоспособности высокотехнологичной машиностроительной продукции, в первую очередь мобильных транспортно-технологических машин, поставляемых на экспорт, требуется обеспечение их показателей надежности на всех стадиях жизненного цикла с учетом высокой вариабельности условий эксплуатации.

Одним из основных потребителей белорусской автотракторной, строительной-дорожной, коммунальной и сельскохозяйственной техники являются Россия, среднеазиатские республики бывшего СССР, экваториальные страны африканского и американского континентов. В совокупности эти территории имеют наибольшую вариабельность природно-климатических условий.

Поскольку климат Земли характеризуется большим разнообразием, вся ее территория по показателям климата для технических целей условно

разделена на шесть макроклиматических районов, характеристика которых приведена в таблице 1 [1–3].

Макроклиматические районы холодного климата дополнительно разделены на зоны арктического и субарктического климата, а между районами тропического и умеренного климата расположены зоны субтропического климата.

Основными повреждающими деградационными процессами при эксплуатации машин являются изнашивание, коррозия, усталость, эрозия и старение. Отметим, что в большинстве случаев повреждающие процессы действуют совместно.

Закономерности, характеризующие повреждающие процессы в материалах деталей изделия и приводящие к изменению их начальных свойств, являются основой для расчета и прогнозирования показателей надежности. Основное значение для количественной оценки потери изделия работоспособности имеет изучение законов накопления

Таблица 1 — Классификация и характеристика климатических районов для технических целей
 Table 1 — Classification and characterization of climatic areas for technical purposes

Район	Характеристика
Умеренный	Территория, на которой средняя из ежегодных абсолютных максимумов температуры воздуха равна или ниже 40 °С, средняя из ежегодных абсолютных минимумов температуры воздуха равна или выше –45 °С.
Холодный	Территория, на которой средняя из ежегодных абсолютных минимумов температуры воздуха ниже –45 °С.
Тропический влажный	Территория, на которой сочетание температуры воздуха 20 °С или выше и относительной влажности не менее 80 % наблюдается в сутки 12 ч и более за непрерывный период свыше двух месяцев в году.
Тропический сухой	Территория, на которой средняя из ежегодных абсолютных максимумов температуры воздуха выше 40 °С и которая не относится к макроклиматическому району с влажным тропическим климатом.
Умеренно-холодный морской	Акватория морей и океанов, расположенная выше 30° северной и ниже 30° южной широты.
Тропический морской	Акватория морей и океанов, расположенная между 30° северной и 30° южной широты.

повреждений, которые раскрывают физико-химическую сущность необратимых изменений, происходящих в материалах изделия.

Это требует анализа и учета основных эксплуатационных факторов, среди которых для конкретных зон поставок одним из основных является климатический фактор, и на этапе проектирования планирования периодичности операций технического сервиса для обеспечения высокого уровня технической готовности машин.

Методика исследования. Оценка степени поврежденности материала в функции времени позволяет оценивать параметры и скорость развития повреждающего процесса, анализировать возможные его реализации и последствия, выявлять наиболее существенные факторы, влияющие на интенсивность процесса. На основе этих закономерностей назначается периодичность технических обслуживаний и ремонтов.

Под потенциалом работоспособности [4, 12] понимают состояние машины в фиксированный момент времени, характеризующее возможную ее работоспособность. Каждый эксплуатационный цикл состоит из периода технического использования (время, наработка) t_i и периода восстановления работоспособности τ_i . Общий потенциал работоспособности машины можно представить в виде следующих трех составных частей: активной, резервной и пассивной (рисунок 1).

Активная часть потенциала P_a изменяется в процессе эксплуатации машины, поддерживается и восстанавливается в результате проведения технического обслуживания и текущего ремонта.

Резервная часть потенциала P_p необходима для предупреждения наступления предельного состояния машины при эксплуатации. Формируется совокупностью различных коэффициентов запаса.

Пассивная часть потенциала P_n является незаменимой частью машины и изменяется только при замене базовых узлов и агрегатов.

В результате действия большого количества детерминированных и случайных факторов процесс изменения и восстановления потенциала работоспособности носит случайный характер. Поэтому для множества «одинаковых» машин этот процесс в общем виде можно рассматривать как случайный процесс с перемешиванием его реализаций, и на рисунке 1 представлен его частный случай.

В периоды технического использования активная часть P_a может снижаться с различной скоростью: при нормальной эксплуатации (отрезок 1) и при действии различных экстремальных, прежде всего, климатических факторов (отрезок 2). Очевидно, что в первом случае необходимо временно прекратить использование машины в момент, соответствующий точке A , а во втором — точке B . Несоблюдение этого условия для режима 2 приведет к полному исчерпанию резервной части P_p и большей доли пассивной части P_n , что соответствует преждевременному наступлению предельного состояния машины. Это относится и ко всем последующим эксплуатационным периодам.

Используя положения теории случайных процессов, можно рекомендовать выборочную функцию математического ожидания изменения ра-

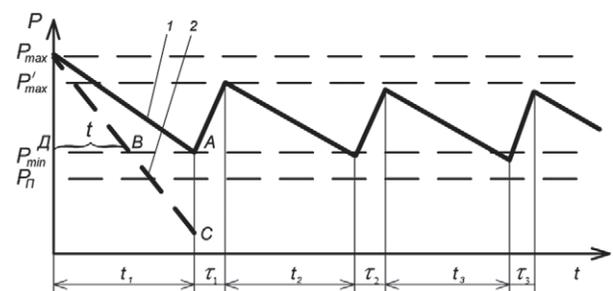


Рисунок 1 — Модель изменения и восстановления потенциала работоспособности мобильной машины
 Figure 1 — Model for changing and restoring the health potential of a mobile machine

ботоспособности машин для текущего момента времени, представленную в формуле [1, 6]:

$$\tilde{m}_p(t) = P_{\max} \cdot e^{-vt}, \quad (1)$$

и функцию выборочной дисперсии, представленную формулой:

$$\tilde{D}_p(t) = t(\alpha_1 + \alpha_2 t), \quad (2)$$

где v , α_1 , α_2 — показатель степени и коэффициенты, определяемые экспериментально.

Распределения доремонтного и межремонтного ресурсов обычно аппроксимируются нормальным законом.

Рассмотрим случай, представленный на рисунке 2 [7], когда задано время непрерывной работы машины T_0 , в течение которого не производится ее техническое обслуживание. Это период, определяемый условиями эксплуатации.

Пусть X — один из параметров, характеризующих работоспособность машины (мощность, КПД, производительность), а δ — та часть, на которую параметр может быть изменен (ухудшен) без выхода его за допустимые пределы. Значение δ учитывает запас на накопление деградационных отказов и определяет те допустимые погрешности в работе машины, которые не приводят к нарушению ее работоспособности. Процесс изменения параметра X с течением времени t , т. е. процесс изменения состояния машины, представляет собой общую модель постепенной потери машиной

работоспособности, происходящей при ее эксплуатации. В основе рассматриваемой модели лежит классификация процессов повреждения по скорости их протекания.

Каждая машина имеет начальные погрешности, которые зависят от ее конструкции, степени совершенства изготовления и определяют начальную неточность функционирования a_0 . Эта неточность наблюдается и в том случае, если отсутствуют процессы, изменяющие параметры машины.

Как только машина начинает работать, быстропротекающие процессы приводят к дальнейшему увеличению погрешностей функционирования. Случайный характер этих процессов обуславливает изменение параметров машины и оценивается законом распределения и его полем рассеивания A_1 . Границы интервала A_1 , как и других областей рассеивания, определяются принятыми допустимыми значениями вероятности попадания параметра X в заданную область.

Если имеется несколько одновременно действующих факторов, то суммарный эффект может быть оценен вероятностным методом сложения дисперсий отдельных процессов. Так, при начале работы машины могут действовать две основные причины, поэтому происходит рассеивание параметра X относительно центра группирования a_0 в пределах поля A_H за счет погрешностей изготовления и настройки машины и рассеивания пара-

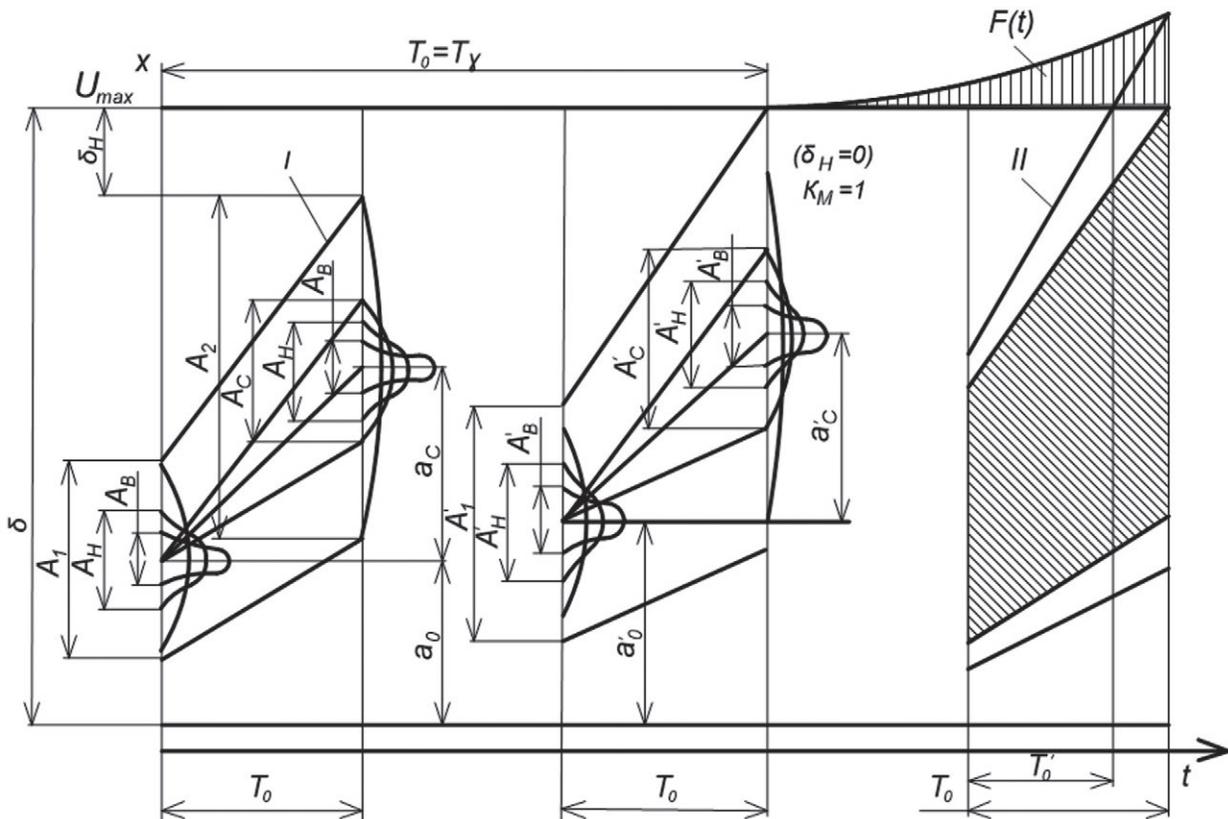


Рисунок 2 — Схема потери машиной работоспособности при заданной продолжительности непрерывной работы [1, 7]
 Figure 2 — Scheme of the machine's loss of operability for a given duration of continuous operation [1, 7]

метра X в пределах поля A_b в результате вибраций машины или деформаций ее элементов при работе в различных режимах. В этом случае поле рассеивания A_1 параметра X будет складываться из A_n и A_b . Применяя теорему о сложении дисперсий независимых случайных величин [6], получим

$$A_1 = \sqrt{A_n^2 + A_b^2}. \quad (3)$$

Здесь рассеивание происходит относительно центра группирования, определяемого координатой a_0 .

Влияние процессов средней скорости проявляется в том, что центр группирования смещается за период T_0 на величину a_c (на схеме условно изображено линейным) и имеет рассеивание. Поэтому $a_c(t)$ следует рассматривать как случайную функцию времени с зоной рассеивания A_c . Из процессов средней скорости часто ведущую роль играют тепловые деформации.

Зона рассеивания A_2 относительно смещенного центра группирования вычисляется по формуле:

$$A_2 = \sqrt{A_n^2 + A_b^2 + A_c^2}. \quad (4)$$

Таким образом, к концу периода T_0 остается неизрасходованный резерв δ_n и по параметру X , определяемый по формуле:

$$\delta_n = \delta \left[\alpha_0 + \alpha_c + 0,5 \cdot \sqrt{A_n^2 + A_b^2 + A_c^2} \right]. \quad (5)$$

Поле рассеивания параметра X за этот период определяется областью состояния I , показанной на рисунке 2.

Запас долговечности K_n можно определить по формуле (6) как отношение максимально допустимого значения параметра $X = X_{\max} = \delta$ к экстремальному его значению для данных условий $X_{\text{эк}} = \delta - \delta_n$:

$$K_n = \frac{X_{\max}}{X_{\text{эк}}} = \frac{\delta}{\delta - \delta_n}. \quad (6)$$

Следует отметить, что в данном случае экстремальное значение параметра X определяется допустимой вероятностью значения, которое может принимать данный параметр.

При наличии запаса $K_n > 1$ (резерва δ_n), долговечность машины весьма высока, так как вероятность выхода параметра X за пределы δ мала (меньше ее регламентированного значения). Опасность представляют лишь внезапные отказы от внешних воздействий, не связанных с состоянием самой машины.

Однако при продолжительной эксплуатации машины начинают проявляться деградиционные процессы, такие как изнашивание, коррозия, усталость, старение и эрозия, которые приводят к уменьшению запаса долговечности.

Изменение параметров, определяющих работоспособность машины, будет происходить со временем в результате следующих причин:

- увеличение зоны A_b — в результате роста зазоров в сопряжениях, изменения жесткости и других характеристик, влияющих на быстропротекающие процессы;

- увеличение зоны A_n — в результате износа и старения настроечных узлов машин;

- увеличение a_0 — вследствие изнашивания и других изменений, которые имеют место в основных сопряжениях и узлах машин (обычно это главный параметр, влияющий на снижение частных характеристик и общей работоспособности машины);

- увеличение a_c и A_c — в результате повышения тепловыделения из-за интенсификации процессов трения, возрастания нагрузок и других явлений, происходящих при изнашивании механизмов.

Все указываемые здесь зависимости, определяемые, как правило, для конкретных моделей машин одинакового функционального назначения и характеризующие процессы снижения потенциала их работоспособности в определенной внешней среде, заметно трансформируются при изменении природно-климатических условий эксплуатации машин (см. рисунок 1, кривые 1 и 2). При этом, как следствие, изменяются в сторону снижения комплексные показатели надежности — безотказность и долговечность, и интегральные показатели — коэффициенты технической готовности и технического использования.

На свойства конструкционных материалов и, следовательно, на показатели надежности машин существенно влияют не все климатические факторы и атмосферные явления; влияние основных повреждающих факторов схематически показано на рисунке 3.

Эксплуатация машин на открытом воздухе в экстремальных условиях обуславливает повышенную интенсивность неблагоприятного воздействия климатических факторов, в первую очередь, низких и высоких температур воздуха, суточных и годовых амплитуд и размахов температур, солнечной радиации, влажности воздуха, интенсивности осадков, скорости и направления ветра. Неблагоприятные воздействия оказывают такие атмосферные явления, как метели, иней, туманы, гололед, пыльные и песчаные бури. В результате дополнительного повреждающего воздействия названных факторов физико-механические и химические свойства конструкционных и эксплуатационных материалов, как правило, ухудшаются. Изменение свойств используемых материалов приводит к снижению их сопротивления воздействию основных повреждающих процессов — изнашивания, коррозии, усталости, старения и эрозии, и, как следствие, снижению показателей надежности машин и эффективности их использования. Решение проблемы обеспечения оптимальной надежности технических и эргатических систем при их эксплуатации в различных

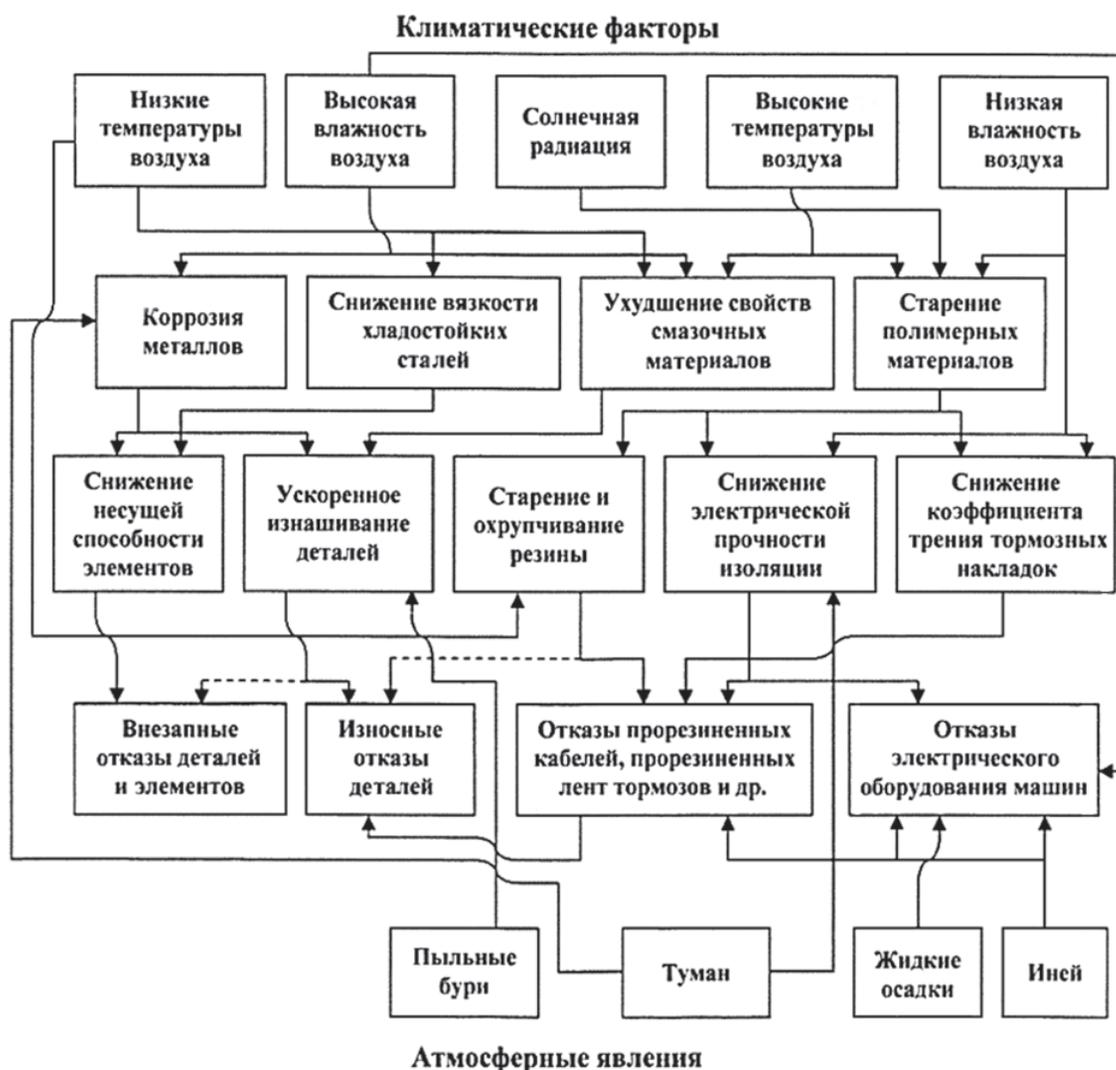


Рисунок 3 — Схема комплексного влияния климатических факторов и атмосферных явлений на свойства материалов и показатели надежности машин

Figure 3 — Scheme of the complex influence of climatic factors and atmospheric phenomena on the properties of materials and reliability indicators of machines

климатических условиях требует обобщения накопленного опыта создания машин, рассчитанных на работу в различных климатических условиях.

Наиболее существенно на технические устройства влияют низкие и высокие температуры воздуха, солнечная радиация, влажность воздуха, скорость ветра, туманы, метели, пыльные бури. Изменения свойств материалов зависят также от интенсивности и продолжительности воздействия перечисленных факторов и их наиболее неблагоприятного сочетания. В качестве обобщающего показателя климатических воздействий избрана *техническая жесткость климата*.

Для повышения точности моделирующих зависимостей необходимо учитывать в них влияние как можно большего числа факторов. Однако такие формулы были бы весьма громоздки, поэтому необходимо отбирать наиболее значимые факторы, существенно влияющие на прогноз технической жесткости климата и погоды.

В общем виде эти модели могут быть представлены как многофакторные функционалы, основные составляющие которых представлены и ранжированы на диаграмме рисунка 4, из которой видно, что наиболее значимое неблагоприятное воздействие оказывают такие факторы как температура, влажность и солнечная радиация в зоне эксплуатации.

Процессы изнашивания определяют показатели безотказности и долговечности двигателей, трансмиссий и других узлов и агрегатов. Толщина слоя смазки, разделяющего трущиеся поверхности узлов трения, зависит от вязкости масла, скорости относительного перемещения трущихся поверхностей, удельных нагрузок на эти поверхности. Так, для жидкостного гидродинамического трения в подшипнике скольжения толщина несущего масляного слоя определяется по формуле Гюмбеля–Фальца [8]:

$$h_{\min} = \mu d^2 n / 18,36 q s c, \quad (7)$$

где μ — вязкость масла; d — диаметр цапфы вала; n — частота вращения вала; q — удельная нагрузка

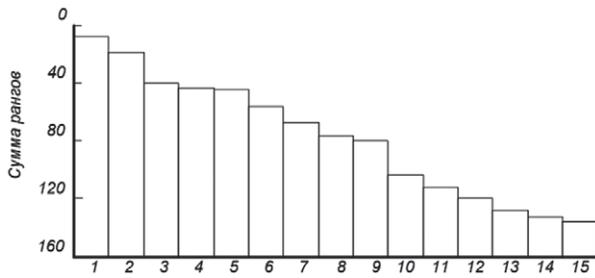


Рисунок 4 — Априорная диаграмма рангов климатических факторов: 1 — $t_{в, \min, \text{ср}}$; 2 — $t_{в, \max, \text{абс}}$; 3 — относительная влажность воздуха; 4 — прямая солнечная радиация; 5 — амплитуда температуры воздуха; 6 — средняя скорость воздуха; 7 — пыльные бури; 8 — рассеянная радиация; 9 — продолжительность жаркого периода; 10 — туман; 11 — максимальная скорость ветра; 12 — количество осадков; 13 — атмосферное давление; 14 — переход температуры через 0 °С; 15 — направление ветра

Figure 4 — Priori diagram of the ranks of climatic factors: 1 — $t_{в, \min, \text{ср}}$; 2 — $t_{в, \max, \text{абс}}$; 3 — relative humidity; 4 — direct solar radiation; 5 — amplitude of air temperature; 6 — average air velocity; 7 — dust storms; 8 — scattered radiation; 9 — duration of the hot period; 10 — fog; 11 — maximum wind speed; 12 — precipitation; 13 — atmospheric pressure; 14 — temperature transition through 0 °С; 15 — wind direction

ка на цапфу вала; s — начальный зазор между валом и подшипником; c — поправка на конечную длину подшипника.

Под влиянием высоких температур вязкость масла уменьшается на один-два порядка, соответственно уменьшается и толщина масляного слоя, обуславливая переход от жидкостного трения к граничному и сухому, что при наличии микронеровностей трущихся поверхностей вызывает их непосредственный контакт и резкое повышение интенсивности изнашивания. В условиях высоких контактных давлений в этой зоне может возникнуть молекулярное взаимодействие деталей трущейся пары, приводящее к схватыванию и заеданию поверхностей.

Скорость коррозии определяется в соответствии с уравнением [1]

$$V_k = k_p C \cdot \exp\left[-\frac{W}{RT}\right], \quad (8)$$

где $\exp\left[-\frac{W}{RT}\right]$ — член уравнения, характеризующий долю частиц, обладающих необходимой энергией активации, т. е. долю активных частиц; k_p — константа скорости реакции; C — концентрация частиц; W — энергия активации, представляющая собой тот избыток энергии по сравнению со средней, обладание которым делает частицу реакционно-активной; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Из уравнения (8) следует, что скорость реакции возрастает с увеличением температуры.

В условиях воздействия коррозионной среды усиливается влияние асимметрии цикла на сопротивление усталости: при этом растягивающие средние напряжения цикла резко снижают значение предела выносливости, а наложение статических сжимающих напряжений способ-

ствует стабилизации значения предела выносливости детали практически в любой коррозионной среде.

При повышении температуры величина предела выносливости обычно уменьшается, а при ее понижении до значений, индивидуальных для каждого материала, — возрастает [9].

Тепловое старение изоляции развивается за счет ускорения различных химических реакций при рабочих температурах изоляции, обычно лежащих в пределах от 60 до 130 °С. Химические реакции приводят к постепенному изменению структуры и свойств материалов и к ухудшению диэлектрических свойств изоляции в целом.

Для твердой изоляции наиболее характерным является постепенное снижение механической прочности в процессе теплового старения. Это приводит к повреждению изоляции под действием механических нагрузок и затем к ее пробое. В жидких диэлектриках продукты разложения загрязняют изоляцию и снижают ее электрическую прочность. Для органической изоляции повышение температуры на 10 °С снижает ее долговечность вдвое. Тепловое старение также является характерным повреждающим процессом изделий из пластмасс и резинотехнических изделий.

Гидростарение изоляции обуславливается проникновением во внутренние объемы изоляции влаги, главным образом, из окружающего воздуха. При этом происходит уменьшение сопротивления изоляции, рост диэлектрических потерь, связанный с дополнительным нагревом изоляции и ускоряющий тепловое старение изоляции. Неравномерное увлажнение, кроме того, приводит к искажению электрического поля и снижает напряжение пробоя изоляции.

Скорость проникания влаги в материал увеличивается при повышении температуры окружающего воздуха. Влага, поглощенная материалом, или проникшая в него другими путями, резко снижает его объемное сопротивление. Зависимость удельной электропроводности диэлектриков от их влажности определяется уравнением:

$$\sigma_3 = \sigma_{30} \cdot e^{\chi(Z-Z_0)}, \quad (9)$$

где σ_{30} — удельная электропроводность при $t = 0$ °С; Z — абсолютная влажность материала; χ — коэффициент, зависящий от свойств материала.

Важным негативным фактором, повышающим скорость повреждающих процессов, является суперпозиция низких и высоких температур, называемая континентальностью климата и определяемая по формуле:

$$k = \frac{A_T}{\varphi} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

где A_T — годовой размах температуры воздуха; φ — географическая широта.

Континентальность климата является одной из важнейших его характеристик, оказывающих существенное влияние на показатели надежности машин. Континентальность характеризуется годовыми размахами температуры воздуха. Чем больше эти размахи, тем выше континентальность климата. В районах высокой континентальности климата они могут достигать до 100 °С (северо-восточные районы России). Поскольку размах является суммой амплитуд положительных и отрицательных температур воздуха, это особенно усложняет процесс создания машин, надежно работающих и в экстремально холодных, и в экстремально жарких условиях.

Воздействия климатических факторов вызывают определенные типичные отказы, ускоряют потоки отказов, возникающих в результате случайных перегрузок, снижают сопротивление усталости большинства материалов, ухудшают режимы трения, акцентируют отдельные структурные и детальные ошибки, допущенные при проектировании и изготовлении машин. Ухудшение эксплуатацион-

ных свойств материалов, вызванное воздействием климатических факторов, снижает наработку до наступления отказов и резко повышает интенсивность пусковых и нагрузочных отказов.

Низкие температуры воздуха существенно влияют на свойства конструкционных и эксплуатационных материалов и на показатели надежности машин в целом (рисунок 5).

Главной причиной увеличения параметра потока отказов машин в холодное время года являются хрупкие разрушения металлических деталей и элементов конструкций из металлов, полимерных материалов и, в отдельных случаях, из резин. Эти разрушения — следствие перехода материала деталей из вязкого в хрупкое состояние при определенных низких температурах (возникновение низкотемпературной хрупкости материалов).

С использованием результатов рангового анализа и частного влияния отдельных факторов формула для определения технической жесткости холодного климата в баллах имеет вид:



Рисунок 5 — Общая схема влияния низких температур воздуха на свойства материалов и отказы машин
Figure 5 — General scheme of the influence of low air temperatures on the properties of materials and machine failures

$$N_k = (0,75t_{\min \text{cp}} + 0,25t_{\min \text{abc}})(1 + 0,015\sigma_x)(1 + 0,07v_x) \times (1 + 0,26\varphi_x)(1 + 0,014n_{\text{т.м}})(1 + 0,022\tau_x), \quad (11)$$

где $t_{\min \text{cp}}$ — среднее значение минимальных температур воздуха за три наиболее холодных месяца, °C; $t_{\min \text{abc}}$ — среднее значение абсолютного минимума температуры воздуха за три наиболее холодных месяца, °C; σ_x — средний непериодический размах суточных колебаний температуры воздуха за три наиболее холодных месяца, °C; v_x — средняя скорость ветра за три наиболее холодных месяца, м/с; φ_x — среднее значение относительной влажности воздуха за три наиболее холодных месяца в долях единицы; $n_{\text{т.м}}$ — среднее значение за месяц числа дней с туманом и метелью за три наиболее холодных месяца; τ_x — продолжительность действия в месяцах средней температуры воздуха ниже нуля.

На основании рангового анализа и анализа влияния климатических факторов жаркого влажного климата на свойства материалов и надежность машин математическая модель для определения технической жесткости жаркого (сухого и влажного) климата в баллах примет следующий вид (12):

$$S_{\text{к.с}} = (0,55t_{\max \text{cp}} + 0,20t_{\max \text{abc}}) \times (1 + 0,01Q_{\text{т}})(1 + 0,0075\sigma_{\text{т}}) \times (1 - 0,03v_{\text{т}}) \left(1 + \frac{0,08}{\varphi_{\text{т}}}\right) \times (1 + 0,009n_{\text{б.т}})(1 + 0,012\tau_{\text{т}}), \quad (12)$$

где $t_{\max \text{cp}}$ — среднее значение максимальных температур воздуха за три наиболее теплых месяца, °C; $t_{\max \text{abc}}$ — среднее значение абсолютного максимума температуры воздуха за три наиболее теплых месяца, °C; $Q_{\text{т}}$ — среднее значение месячной суммы общей солнечной радиации за три наиболее теплых месяца, Вт/м²; $\sigma_{\text{т}}$ — средний непериодический размах суточных колебаний температуры воздуха за три наиболее теплых месяца, °C; $v_{\text{т}}$ — средняя скорость ветра за три наиболее теплых месяца, м/с; $\varphi_{\text{т}}$ — среднее значение относительной влажности воздуха за три наиболее теплых месяца в долях единицы; $n_{\text{б.т}}$ — среднее значение за месяц числа дней с пыльной бурей и туманом за три наиболее теплых месяца; $\tau_{\text{т}}$ — продолжительность действия в месяцах средней температуры воздуха выше 0 °C.

Определение значимости каждого фактора с выделением существенных и отсеиванием несущественных позволяет создать адекватные математические модели технической жесткости климата и погоды. Оценка степени согласованности экспертных оценок с помощью коэффициентов конкордации W и парной ранговой корреляции R по Спирмену показала хорошую согласованность этих оценок [1, 6,

13, 14] $\left(W = 0,735, R = \frac{0,44}{0,88}\right)$. Проверка этих коэф-

фициентов по критерию χ^2 показала их значимость с вероятностью 0,99.

В таблице 2 приведены ранжированные данные [1, 2], в балльной шкале оценивающие техническую жесткость климата в общем диапазоне его изменения — от маложесткого до наиболее жесткого. Баллы технической жесткости отдельно приведены для холодного и жаркого климата. Это позволяет констатировать, что максимальное дополнительное повреждающее воздействие оказывает эксплуатация в условиях холодного климата.

Климатограммы холодного и жаркого климата зон экспортных поставок Республики Беларусь на территории бывшего СССР, приведенные на рисунках 6 и 7 соответственно, иллюстрируют данные таблицы 2.

В результате проведенного анализа следует констатировать необходимость корректировки периодичности технических обслуживаний, которые завод-изготовитель, как правило, определяет для климатической зоны собственной локации [5]. Эта оценочная зависимость определяется по исходной формуле (1) с применением корректирующего коэффициента. Для этого в уравнении (1) полагаем $\tilde{m}_p(t) = P_{\min}$ — нижняя граница активной части потенциала работоспособности.

Далее, логарифмируя обе части полученного уравнения, получаем

$$\ln P_{\min} = \ln P_{\max} - vt, \quad (13)$$

откуда

$$vt = \ln \frac{P_{\max}}{P_{\min}}. \quad (14)$$

Таким образом, средняя периодичность операций технических обслуживаний (ТО) с учетом реального климатического фактора $T_{\text{ТО,CP}} = t$ (см. рисунок 1) определяется как

$$T_{\text{ТО,CP}} = \left(\ln \frac{P_{\max}}{P_{\min}}\right) \cdot v^{-1}. \quad (15)$$

Здесь коэффициент корректирования

$$v = K_{\text{к}} \cdot K_{\text{СЖР}} / K_{\text{СЖИ}}, \quad (16)$$

где $K_{\text{к}}$ — коэффициент учета фактора континентальности климата зоны эксплуатации; $K_{\text{СЖР}}$ — среднее значение балла технической жесткости климата зоны реальной эксплуатации; $K_{\text{СЖИ}}$ —

Таблица 2 — Стратификация показателей жесткости климата
Table 2 — Stratification of climate rigidity indicators

Климат	Баллы технической жесткости климата	
	холодного	жаркого
Маложесткий	0–30	0–15
Умеренно жесткий	31–60	16–25
Жесткий	61–90	26–35
Очень жесткий	91–120	36–45
Наиболее жесткий	121–170	46–60

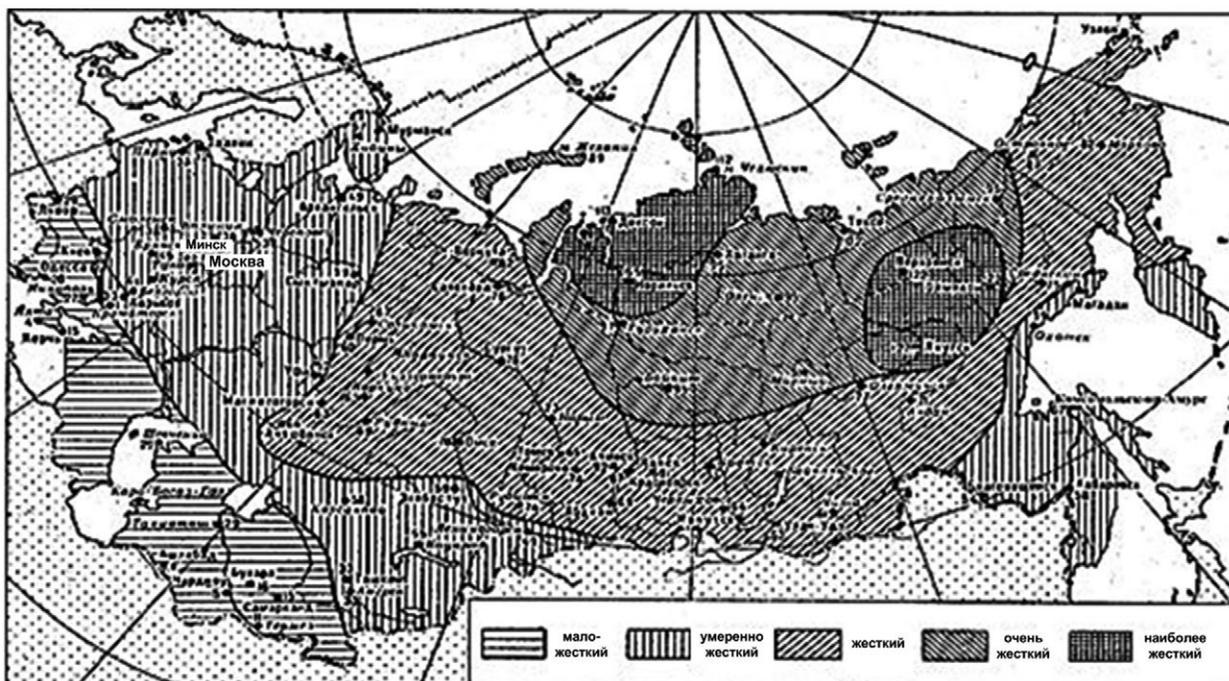


Рисунок 6 — Распределение на территории бывшего СССР зон технической жесткости холодного климата
Figure 6 — Distribution of cold climate zones of technical rigidity on the territory of the former USSR

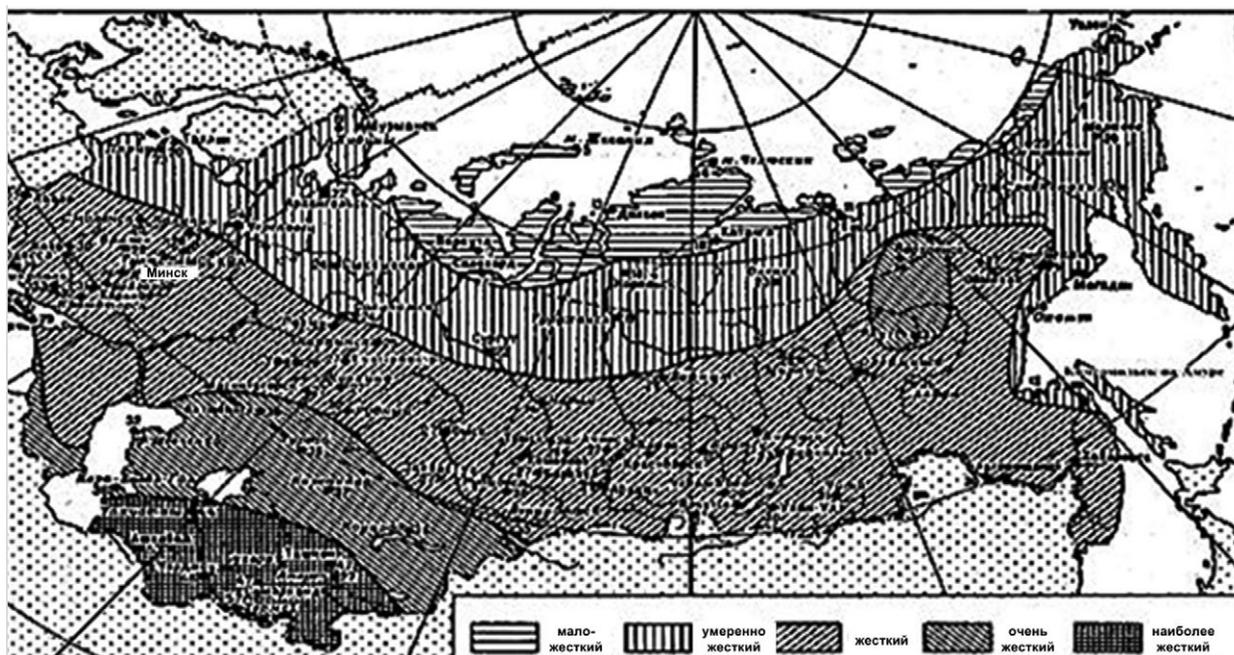


Рисунок 7 — Распределение на территории бывшего СССР зон технической жесткости жаркого климата
Figure 7 — Distribution of hot climate zones of technical rigidity on the territory of the former USSR

среднее значение балла технической жесткости климата зоны изготовителя машины.

Аналогично осуществляется нормирование расхода запасных частей.

Заключение. Корректирование периодичности операций технического сервиса мобильных транспортно-технологических машин с учетом климатического фактора зоны их реальной эксплуатации следует осуществлять в последовательности:

1) с использованием данных таблицы 2 и климатограмм (см. рисунки 6 и 7) определить граничные

и средние значения балла технической жесткости климата зоны эксплуатации машины;

2) с использованием формулы (10) и справочных данных определяется коэффициент континентальности климата зоны эксплуатации;

3) определяются граничные и среднее значения балла технической жесткости климата зон производителей машины и ее основных агрегатов;

4) с использованием формул (15), (16) и данных изготовителя осуществляется корректирова-

ние периодичности операций технического сервиса для зоны реальной эксплуатации машины.

Использование предложенной методики позволит обеспечить показатели надежности мобильных машин при их эксплуатации в экстремальных климатических зонах на уровне, назначенном заводом-изготовителем для умеренно жестких климатических зон.

Список литературы

1. Щурин, К.В. Надежность машин: учеб. пособие / К.В. Щурин. — СПб: Лань, 2019. — 592 с. (Учебники для вузов. Специальная литература).
2. Кох, П.И. Климат и надежность машин / П.И. Кох. — М.: Машиностроение, 1981. — 175 с.
3. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей: ГОСТ 16350-80. — Введ. 07.01.1981.
4. Моделирование процессов восстановления машин / В.П. Апсин [и др.]. — М.: Транспорт, 1996. — 311 с.
5. Технический сервис машин и основы проектирования предприятий: учеб. для вузов / М.И. Юдин [и др.]. — Краснодар: Совет. Кубань, 2007. — 968 с.
6. Щурин, К.В. Планирование и организация эксперимента: учеб. пособие для вузов / К.В. Щурин, Е.К. Волкова. — СПб: Лань, 2022. — 326 с.
7. Проников, А.С. Параметрическая надежность машин / А.С. Проников. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 560 с.
8. Браун, Э.Д. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для техн. вузов / Э.Д. Браун [и др.]; под ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Центр «Наука и техника», 1995. — 778 с.
9. Пачурин, Г.В. Влияние температуры на механические свойства листовых конструкционных сталей [Электронный ресурс] / Г.В. Пачурин // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 1. — С. 18–23. — Режим доступа: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33495>. — Дата доступа: 21.02.2023.
10. Альгин, В.Б. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / В.Б. Альгин, А.С. Васильев, В.Ю. Бломенштейн. — Минск: Беларус. наука, 2010. — 111 с.
11. Тарасенко, В.Е. Надежность технических систем: практикум для студентов УВО специальности 1-74 06 03 Ремонтно-обслуживающее пр-во в сельском хоз-ве / В.Е. Тарасенко, В.П. Миклуш, А.А. Жешко. — Минск: БГАТУ, 2015. — 200 с.
12. Щурин, К.В. Планирование системы технического обслуживания мобильных машин с учетом технической жесткости климата / К.В. Щурин, Д.Б. Шаромето // Современные проблемы и пути развития технического сервиса в АПК: материалы междунар. науч.-практич. конф., Минск, 24–25 нояб. 2022 г. — Минск: БГАТУ, 2022. — С. 126–136.
13. Половко, А.М. Основы теории надежности. — 2-е изд., перераб. и доп. / А.М. Половко, С.В. Гуров. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 704 с.
14. Острейковский, В.А. Теория надежности: учеб. для вузов / В.А. Острейковский. — М.: Высш. шк., 2003. — 464 с.

SHCHURIN Konstantin V., D. Sc. in Eng., Prof.

Professor of the Department of Mechanics of Materials and Machine Parts¹

E-mail: tteng@mail.ru

TARASENKO Viktor E., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Department of Technologies and Organization of Technical Service¹

E-mail: trs9@yandex.ru

¹Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Received 31 March 2023.

CORRECTING THE FREQUENCY OF OPERATIONS OF TECHNICAL SERVICE OF MOBILE MACHINES TAKING INTO ACCOUNT THE CLIMATE RIGIDITY

Based on the analysis of the main operational factors, among which, for specific areas of equipment supply, one of the main ones is the climatic factor, as well as the main damaging degradation processes during the operation of machines, an effective mechanism for planning the frequency of maintenance operations is proposed, which helps to ensure a high level of technical readiness of machines. The operability potential was analyzed, its active, reserve and passive parts were considered, which made it possible to present a model for changing and restoring the operability potential of a mobile machine. Mathematical dependences are given for certain models of machines of the same functional purpose, as well as characterizing processes of reducing the potential of their performance in a certain external environment, their transformation is noted when changing natural and climatic operating conditions. The construction of a priori diagram of the ranks of climatic factors made it possible to note that the most significant adverse effect is exerted by temperature, humidity and solar radiation in the operating area. Taking into account the distribution of zones of technical rigidity of the climate, its score and the coefficient of continentality, a method is proposed for correcting the frequency of operations of technical service of transport-technological machines for the zone of their actual operation.

Keywords: model, performance, machine, service, factor, rigidity, climate

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-14-24>

References

1. Shchurin K.V. *Nadezhnost mashin* [Reliability of machines]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2019. 592 p. (in Russ.).
2. Kokh P.I. *Klimat i nadezhnost mashin* [Climate and reliability of machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 175 p. (in Russ.).
3. State Standard 16350-80. *Klimat SSSR. Rayonirovanie i statisticheskie parametry klimaticheskikh faktorov dlya tekhnicheskikh tseley* [Climate of the USSR. Regionalizing and statistical parameters of climatic factors for technical purposes]. 1981 (in Russ.).
4. Apsin V.P., Dekhterinskiy L.V., Norkin S.B., Prikhodko V.M. *Modelirovanie protsessov vosstanovleniya mashin* [Simulation of machine recovery processes]. Moscow, Transport Publ., 1996. 311p. (in Russ.).
5. Yudin M.I., et al. *Tekhnicheskii servis mashin i osnovy proektirovaniya predpriyatiy* [Technical service of machines and fundamentals of enterprise design]. Krasnodar, Sovetskaya Kuban Publ., 2007. 968 p. (in Russ.).
6. Shchurin K.V., Volkova E.K. *Planirovanie i organizatsiya eksperimenta* [Planning and organization of the experiment]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2022. 326 p. (in Russ.).
7. Pronikov A.S. *Parametricheskaya nadezhnost mashin* [Parametric reliability of machines]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2002. 560 p. (in Russ.).
8. Braun E.D., et al. *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka)* [Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication)]. Moscow, Tsentr "Nauka i tekhnika" Publ., 1995. 778 p. (in Russ.).
9. Pachurin G.V. *Vliyanie temperatury na mekhanicheskie svoystva listovykh konstruktsionnykh staley* [Effect of temperature on mechanical properties of structural steel sheet]. *Fundamental research*, 2014, no. 1, pp. 18–23. Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33495> (accessed 21 February 2023) (in Russ.).
10. Algin V.B., Vasilev A.S., Blyumenshteyn V.Yu. *Tekhnologicheskie i ekspluatatsionnye metody obespecheniya kachestva mashin* [Technological and operational methods of ensuring the quality of machines]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2010. 111 p. (in Russ.).
11. Tarasenko V.E., Miklush V.P., Zheshko A.A. *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem* [Reliability of technical systems]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy agrarnyy tekhnicheskii universitet Publ., 2015. 200 p. (in Russ.).
12. Shchurin K.V., Sharometa D.B. *Planirovanie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya mobilnykh mashin s uchedom tekhnicheskoy zhestkosti klimata* [Planning of the maintenance system of mobile machines taking into account the technical rigidity of the climate]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sovremennye problemy i puti razvitiya tekhnicheskogo servisa v APK"* [Proc. international scientific and practical conference "Modern problems and ways of development of technical service in the agro-industrial complex"]. Minsk, 2022, pp. 126–136 (in Russ.).
13. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory]. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2006. 704 p. (in Russ.).
14. Ostreykovskiy V.A. *Teoriya nadezhnosti* [Reliability theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 464 p. (in Russ.).