

В. Е. Тарасенко¹, К. В. Щурин¹, А. А. Жешко²

¹УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

г. Минск, Республика Беларусь

²РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: azeshko@gmail.com

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС МОБИЛЬНЫХ МАШИН С УЧЕТОМ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. Рассмотрены основные эксплуатационные показатели, важнейшим из которых выступает климатический фактор. Предложен механизм планирования периодичности операций технического сервиса с учетом вариабельности условий эксплуатации, что способствует обеспечению высокого уровня технической готовности парка машин. Рассмотрены активная, резервная и пассивная части потенциала работоспособности. Приведены зависимости, характеризующие процессы снижения потенциала работоспособности машин, отмечена их трансформация при изменении природно-климатических условий эксплуатации. Предложена методика технического сервиса мобильных машин с учетом вариабельности условий эксплуатации, которая предполагает анализ статистического массива данных по температуре окружающей среды за последние годы для формирования точного прогноза на ближайшую перспективу и выполнения последующих расчетов непосредственно на день эксплуатации машины.

Ключевые слова: машина, работоспособность, климат, сервис, фактор, уровень, жесткость.

V. E. Tarasenko¹, K. V. Shchurin¹, A. A. Zheshko²

¹EI "Belarusian State Agrarian Technical University"

Minsk, Republic of Belarus

²RUE "SPC NAS of Belarus for Agriculture Mechanization"

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: azeshko@gmail.com

TECHNICAL SERVICE OF MOBILE MACHINES, TAKING INTO ACCOUNT THE VARIABILITY OF OPERATING CONDITIONS

Abstract. The main operational indicators are considered, the most important of which is the climatic factor. A mechanism for planning the frequency of maintenance operations is proposed, taking into account the variability of operating conditions, which contributes to ensuring a high level of technical readiness of the fleet. The active, reserve and passive parts of the performance potential are considered. The dependences characterizing the processes of reducing the potential of machine performance are given, their transformation is noted with changes in natural and climatic operating conditions. The technique of technical service of mobile machines is proposed, taking into account the variability of operating conditions, which involves the analysis of a statistical array of data on ambient temperature in recent years to form an accurate forecast for the near future and perform subsequent calculations directly on the day of operation of the machine.

Keywords: machine, performance, climate, service, factor, level, rigidity.

Введение

Индивидуальность конкретной мобильной машины (ММ) усиливается в сфере эксплуатации. В число факторов, влияющих на надежность ММ, обязательно добавляются климатические и дорожно-почвенные условия, напряженность и культура эксплуатации.

Промышленность Республики Беларусь является экспортно-ориентированной, для поддержания и повышения конкурентоспособности отечественной машиностроительной продукции, в первую очередь ММ, поставляемых на экспорт, требуется обеспечение их показателей надеж-

ности на всех стадиях жизненного цикла с учетом высокой variability условий эксплуатации [1, 2].

Основными потребителями белорусской автотракторной, строительно-дорожной, коммунальной и сельскохозяйственной техники являются Российская Федерация, среднеазиатские республики, экваториальные страны африканского и американского континентов и др. В совокупности эти территории имеют наибольшую variability 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].

Таблица 1 – Классификация и характеристика климатических районов для технических целей

Климатический район	Характеристика
Умеренный	Территория, на которой средняя из ежегодных абсолютных максимумов температура воздуха равна или ниже 40 °С, средняя из ежегодных абсолютных минимумов температура воздуха равна или выше –45 °С
Холодный	Территория, на которой средняя из ежегодных абсолютных минимумов температура 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 температура воздуха выше 40 °С и которая не относится к макроклиматическому району с влажным тропическим климатом
Умеренно-холодный морской	Акватория морей и океанов, расположенная севернее 30° северной и южнее 30° южной широты
Тропический морской	Акватория морей и океанов, расположенная между 30° северной и 30° южной широты

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

Основными повреждающими процессами при эксплуатации ММ являются: изнашивание, коррозия, усталость, эрозия и старение. В большинстве случаев повреждающие процессы действуют совместно.

Закономерности, характеризующие повреждающие процессы в материалах деталей ММ и приводящие к изменению их начальных свойств, являются основой для расчета и прогнозирования показателей надежности. Основное значение для количественной оценки потери машиной работоспособности имеет изучение законов накопления повреждений, которые раскрывают физико-химическую сущность необратимых изменений, происходящих в материалах ММ.

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

Основная часть

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.

Состояние ММ, прежде всего, характеризуется ее работоспособностью. Показатель, характеризующий возможную работоспособность машины в любой момент ее эксплуатации, называется потенциалом работоспособности [3, 4, 5–12], и под этим понимают состояние ММ в фиксированный момент времени, характеризующее возможную ее работоспособность. Каждый эксплуа-

тационный цикл состоит из периода технического использования (время, наработка) t_i и периода восстановления работоспособности τ_r . Общий потенциал работоспособности ММ можно представить в виде следующих трех составных частей: активной, резервной и пассивной [3].

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

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

Пассивная часть потенциала P_{Π} является незаменимой частью машины и изменяется только при замене базовых узлов и агрегатов.

Анализ случайного характера процесса изменения и восстановления потенциала работоспособности достаточно подробно изложен в работе [3].

Используя положения теории случайных процессов, можно рекомендовать выборочную функцию математического ожидания изменения работоспособности машин для текущего момента времени, представленную в формуле (1), [1, 6, 8]:

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

и функцию выборочной дисперсии, представленную формулой (2):

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

где ν , α_1 , α_2 – показатель степени и коэффициенты, определяемые экспериментально.

Распределения доремонтного и межремонтного ресурсов обычно аппроксимируются нормальным законом. Случай, когда задано время непрерывной работы ММ T_0 , в течение которого не производится ее техническое обслуживание, рассмотрен в работе [3, 7, 9, 10]. Это период, определяемый условиями эксплуатации. Процесс изменения одного из параметров, характеризующих работоспособность ММ (мощность, КПД, производительность и др.) с течением времени t , т. е. процесс изменения состояния ММ, представляет собой общую модель постепенной потери ММ работоспособности, которая происходит при ее эксплуатации. В основе рассматриваемой модели лежит классификация процессов повреждения по скорости их протекания.

На свойства конструкционных материалов и, следовательно, на показатели надежности ММ существенно влияют не все климатические факторы и атмосферные явления; влияние основных повреждающих факторов схематически показано на рисунке 1.

Эксплуатация ММ на открытом воздухе в экстремальных условиях обуславливает повышенную интенсивность неблагоприятного воздействия климатических факторов, в первую очередь, низких и высоких температур окружающей среды (ОС), 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 и др. В результате дополнительно 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 ММ и эффективности их использования. Решение проблемы обеспечения оптимальной надежности технических и аргатических систем при их эксплуатации в различных климатических условиях требует обобщения накопленного опыта создания ММ, рассчитанных на работу в различных климатических условиях.

Наиболее существенно на технические устройства влияют низкие и высокие температуры ОС, 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**.

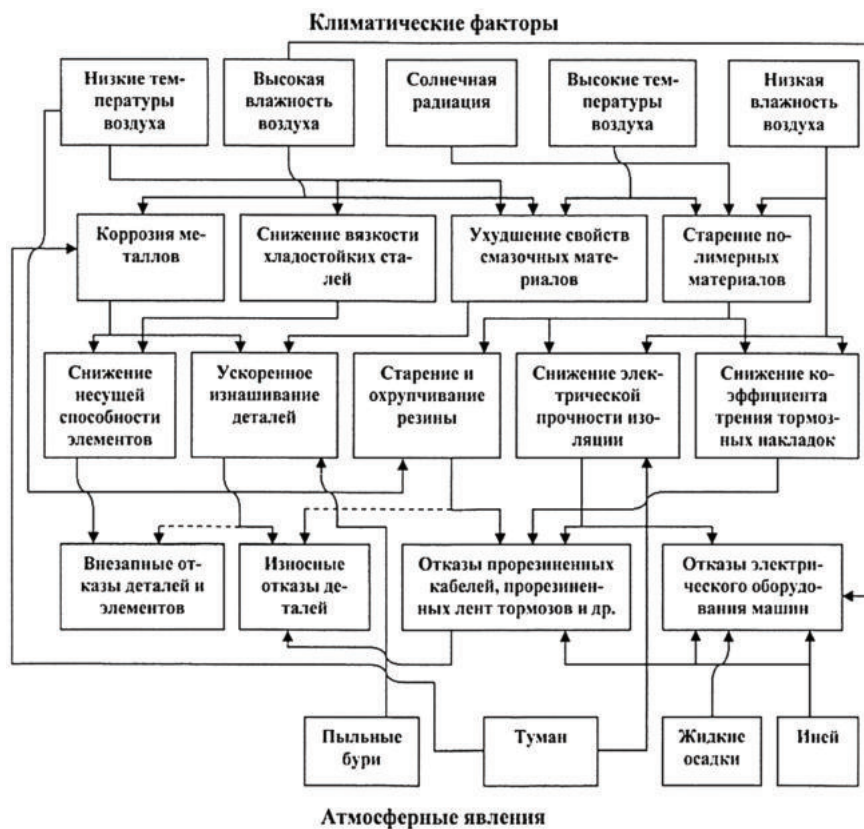


Рисунок 1 – Схема комплексного влияния климатических факторов и атмосферных явлений на свойства материалов и показатели надежности машин

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.

Процессы изнашивания определяют показатели безотказности и долговечности двигателей, трансмиссий, 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 и других факторов. Так, для жидкостного гидродинамического трения в подшипнике скольжения толщина несущего масляного слоя определяется по формуле Гюмбеля – Фальца [8, 9]:

$$h_{\min} = \mu d^2 n / (18,36 q s c), \quad (3)$$

где μ – вязкость масла; d – диаметр цапфы вала; n – частота вращения вала; q – удельная нагрузка 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 (4) [1]

$$V_k = k_p C \exp \left[-\frac{W}{RT} \right], \quad (4)$$

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 (4) 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 способствует 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, величина предела выносливости возрастает [9–12].

Тепловое старение изоляции развивается за счет ускорения различных химических реакций при рабочих температурах изоляции, обычно лежащих в пределах от 60 °С 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 пробою. 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 (5):

$$\sigma_Z = \sigma_{Z0} e^{\chi(Z-Z_0)}, \quad (5)$$

где σ_{Z0} – 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 ОС, называемая континентальностью климата и определяемая по формуле (6):

$$\kappa = \frac{A_T}{\varphi} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где A_T – годовой размах температуры ОС; φ – географическая широта.

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

Низкие температуры ОС существенно влияют на свойства конструкционных и эксплуатационных материалов и на показатели надежности ММ в целом.

Главной причиной увеличения параметра потока отказов ММ 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 такой вид (7):

$$N_K = (0,75t_{\min \text{cp}} + 0,25t_{\min \text{abc}})(1 + 0,015\sigma_x)(1 + 0,07v_x)(1 + 0,26\varphi_x) \times \\ \times (1 + 0,014n_{\text{т.м}})(1 + 0,022\tau_x). \quad (7)$$

где $t_{\min \text{cp}}$ – среднее значение минимальных температур ОС за три наиболее холодных месяца, °С; $t_{\min \text{abc}}$ – среднее значение абсолютного минимума температуры ОС за три наиболее холодных месяца, °С; σ_x – средний непериодический размах суточных колебаний температуры ОС за три наиболее холодных месяца, °С; 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 (8):

$$S_{\text{к.с}} = (0,55t_{\max \text{cp}} + 0,20t_{\max \text{abc}})(1 + 0,01Q_T)(1 + 0,0075\sigma_T)(1 - 0,03v_T) \left(1 + \frac{0,08}{\varphi_T}\right) \times \\ \times (1 + 0,009n_{\text{б.т}})(1 + 0,012\tau_T). \quad (8)$$

где $t_{\max \text{cp}}$ – среднее значение максимальных температур воздуха за три наиболее теплых месяца, °С; $t_{\max \text{abc}}$ – среднее значение абсолютного максимума температуры воздуха за три наиболее теплых месяца, °С; Q_T – среднее значение месячной суммы суммарной солнечной радиации за три наиболее теплых месяца, Вт/м²; σ_T – средний непериодический размах суточных колебаний температуры воздуха за три наиболее теплых месяца, °С; v_T – средняя скорость ветра за три наиболее теплых месяца, м/с; φ_T – 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; τ_T – продолжительность действия в месяцах средней температуры воздуха выше 0 °С.

Определение значимости каждого фактора с выделением существенных факторов 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, 2, 6] ($W = 0,735$, $R = \frac{0,44}{0,88}$). Проверка этих коэффициентов 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.

Таблица 2 – Стратификация показателей жесткости климата

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

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:

$$\ln P_{\min} = \ln P_{\max} - vt, \quad (9)$$

откуда

$$vt = \ln \frac{P_{\max}}{P_{\min}}. \quad (10)$$

Таким образом, средняя периодичность операций технических обслуживаний (ТО) с учетом реального климатического фактора $T_{\text{РТО СР}} = t$ определяется как

$$T_{\text{РТО СР}} = \left(\ln \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right) v^{-1}. \quad (11)$$

Здесь коэффициент корректирования:

$$v = K_K K_{\text{СЖР}} / K_{\text{СЖИ}}, \quad (12)$$

где K_K – коэффициент учета фактора континентальности климата зоны эксплуатации; $K_{\text{СЖР}}$ – среднее значение балла технической жесткости климата зоны реальной эксплуатации; $K_{\text{СЖИ}}$ – среднее значение балла технической жесткости климата зоны изготовителя машины.

Таким образом, предложено решение, позволяющее осуществлять достаточно точный расчет по приведенной выше методике температуры ОС, при которой происходит эксплуатация ММ в конкретном регионе мира. Данное решение может быть оформлено в виде мобильного приложения, которое позволит выполнять расчет в автоматическом режиме. Указав планируемое место эксплуатации ММ и получив координаты на местности, можно получить достаточно точное значение температуры ОС из выбранной базы данных. При этом открывается возможность учитывать как среднестатистические значения температуры ОС за последние семь лет из базы данных выбранного сервера, так и текущие значения температуры. В качестве примера предлагается использовать данные с сервера погоды «Premium weather API for Developers», базы которого содержат необходимые актуальные статистические сведения. Анализ статистического массива данных по температуре ОС за последние годы позволяет сформировать достаточно точный прогноз на ближайшую перспективу и выполнить последующие расчеты непосредственно на день эксплуатации ММ.

Место эксплуатации ММ указывается на электронной карте из картографического сервиса. Изначально предлагается осуществлять поиск объекта (населенного пункта), вблизи которого планируется эксплуатация ММ, и определение координат места эксплуатации ММ методом прямого геокодирования. Далее осуществляется уточнение координат места эксплуатации ММ, т. е. выполняется обратное геокодирование.

После выбора места и времени эксплуатации ММ осуществляется загрузка соответствующих данных с выбранного сервера погоды.

Поскольку точный прогноз можно получить не более чем на 10 дней, предлагается выбрать значение температуры исходя из статистических данных за последние годы

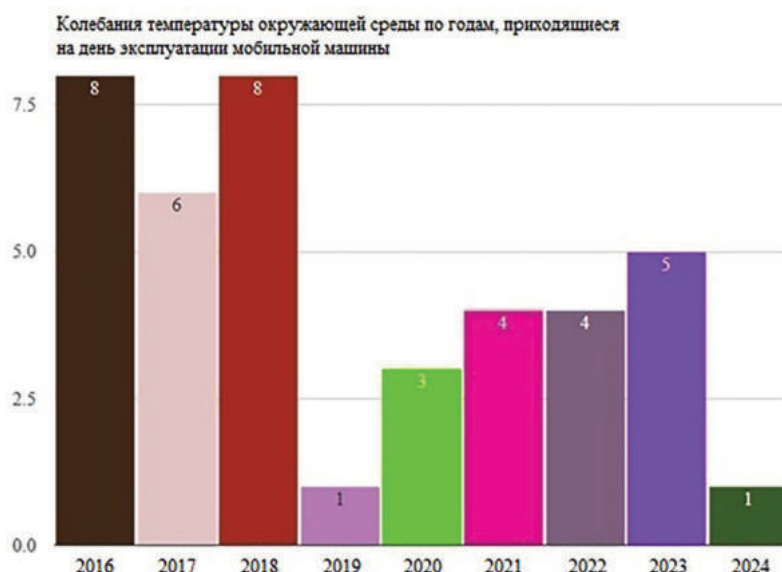


Рисунок 2 – Диаграмма вывода статистических данных колебания температуры окружающей среды в день эксплуатации ММ

В случае дальнейшей разработки и использования мобильного приложения можно определять разность текущей даты и даты предполагаемой эксплуатации ММ, для чего будет загружаться прогноз погоды, предоставляемый веб-сервисом, на дату эксплуатации ММ. Временной интервал данных о погоде в течение суток может задаваться в диапазоне 1–24 ч, по умолчанию можно установить на величину 3 ч.

Также вполне разрешимой является ситуация, когда разность текущей даты и даты планируемой эксплуатации ММ будет больше либо равно 10 дням. В такой ситуации планируется наделить мобильное приложение функцией отправки запроса на веб-сервис погоды о предоставлении статистических данных о метеонаблюдениях за указанным местом эксплуатации ММ (за последние 9 лет). В запросе можно также задавать временной интервал из ряда 1, 3, 6, 12 и 24 ч. Причем интервалу 24 ч соответствует среднесуточная температура на день эксплуатации ММ. Временной интервал 24 ч предполагается использовать по умолчанию. Данные о колебании температуры ОС в день эксплуатации ММ будут отображаться в виде диаграммы (рисунок 2).

Описанное решение позволяет более рационально осуществлять контроль за техническим состоянием ММ, своевременно определять перечень необходимых операций технического сервиса в зависимости от фактического состояния ММ и конкретного региона эксплуатации.

Заключение

Корректирование периодичности операций технического сервиса мобильных машин с учетом климатического фактора зоны их реальной эксплуатации следует осуществлять в определенной последовательности.

1. С использованием данных таблицы 2 и с сервера метеорологических наблюдений определить граничные и среднее значения балла технической жесткости климата зоны эксплуатации машины.

2. С использованием формулы (6) 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 (11) и (12), а также данных изготовителя ММ осуществляется корректирование периодичности операций технического сервиса для зоны реальной эксплуатации ММ.

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

Список использованных источников

1. Щурин, К. В. Надежность мобильных машин : учебник / К. В. Щурин, В. Е. Тарасенко. – СПб. : Лань, 2024. – 400 с.
2. Щурин, К. В. Корректирование периодичности операций технического сервиса мобильных машин с учетом жесткости климата / К. В. Щурин, В. Е. Тарасенко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2023. – № 2 (63). – С. 14–23.
3. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей : ГОСТ 16350-80. – Взамен ГОСТ 16350-70 ; введ. 17.12.1980.
4. Моделирование процессов восстановления машин / В. П. Апсин, Л. В. Дехтеринский, С. Б. Норкин, В. М. Приходько. – М. : Транспорт, 1996. – 311с.
5. Технический сервис машин и основы проектирования предприятий : учебник / М. И. Юдин, М. Н. Кузнецов, А. Т. Кузовлев [и др.]. – Краснодар : Совет. Кубань, 2007. – 968 с.
6. Щурин, К. В. Планирование и организация эксперимента : учеб. пособие / К. В. Щурин, Е. К. Волкова. – СПб. : Лань, 2022. – 326 с.
7. Проников, А. С. Параметрическая надежность машин / А. С. Проников. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 560 с.
8. Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учебник / Э. Д. Браун, Н. А. Буше, И. А. Буяновский [и др.] ; под ред. А. В. Чичинадзе. – М. : Наука и техника, 1995. – 778 с.
9. Пачурин, Г. В. Влияние температуры на механические свойства листовых конструкционных сталей // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 1. – С. 18–23. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33495> (дата обращения: 21.02.2023).
10. Альгин, В. Б. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / В. Б. Альгин, А. С. Васильев, В. Ю. Блюменштейн. – Минск : Беларус. навука, 2023. – 111 с.
11. Тарасенко, В. Е. Надежность технических систем [Текст] : практикум для студентов УВО специальности 1-74 06 03 Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве / В. Е. Тарасенко, В. П. Миклуш, А. А. Жешко : БГАТУ. – Минск, 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.-практ. конф., Минск, 24–25 нояб. 2022 г. – Минск : БГАТУ, 2022. – С. 126–136.