

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-3-239-245>

УДК 631.3.004.67

Определение остаточного ресурса автомобильных агрегатов по результатам виброакустического анализа

Докт. техн. наук, проф. В. П. Иванов¹⁾, магистр техн. наук В. А. Зеньков¹⁾

¹⁾Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (Новополоцк, Республика Беларусь)

Реферат. Определение остаточного ресурса агрегатов на практике или выполняют субъективно, или этот показатель совсем не оценивают по причине отсутствия необходимых методов и средств, в то время как большое число агрегатов списывают или направляют в трудоемкий ремонт со значительной долей неиспользованного ресурса. Цель работы заключалась в разработке способа оценки остаточного ресурса отдельного агрегата с использованием значений структурных параметров, связанных с измеряемыми диагностическими параметрами виброакустическими методами, а также оценки суммарного остаточного ресурса группы одноименных агрегатов. На основании обследования партии двигателей предложен метод оценки остаточного ресурса автомобильных агрегатов, который включает: выбор основного структурного параметра исследуемого вида агрегата, описание вариационного ряда прогнозных значений полного ресурса отдельных агрегатов с определением плотности вероятности его распределения, суммарного полного ресурса, плотности вероятности распределения остаточного ресурса и суммарного остаточного ресурса. Установлено, что плотность вероятности распределения полного ресурса подчиняется закону Вейбулла, а плотность остаточного ресурса – экспоненциальному закону. Показано, что потеря доли полного ресурса агрегатов перед их снятием с эксплуатации перед списанием или направлением в трудоемкий ремонт составляет в масштабах отрасли или предприятия 20–40 %. Полученные сведения позволяют дать экономическую оценку сбережения остаточного ресурса эксплуатируемых агрегатов. В случае назначения ремонтных работ с использованием предварительных диагностических исследований будет определена номенклатура заменяемых деталей, входящих в соединения, состояние которых близко к предельному.

Ключевые слова: автомобильный агрегат, диагностирование, виброакустический контроль, параметр, остаточный ресурс, сбережение ресурса

Для цитирования: Иванов, В. П. Определение остаточного ресурса автомобильных агрегатов по результатам виброакустического анализа / В. П. Иванов, В. А. Зеньков // *Наука и техника*. 2026. Т. 25, № 2. С. 239–245. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-2-239-245>

Determining the Residual Life of Automotive Units Based on Vibroacoustic Analysis

V. P. Ivanov¹⁾, V. A. Zenkov¹⁾

¹⁾Polotsk State University named after Euphrosyne of Polotsk (Novopolotsk, Republic of Belarus)

Abstract. It is noted that in practice, the determination of the residual service life of units is performed either subjectively, or this indicator is not assessed at all due to the lack of necessary methods and means, while a large number of units are written off or sent for labor-intensive repairs with a significant portion of unused service life. The objective of this study was to develop a method for assessing the residual service life of an individual unit using the values of structural parameters associated with the measured diagnostic parameters by vibroacoustic methods, as well as assessing the total residual service life of a group of similar units. Based on the examination of a batch of engines, a method for assessing the residual service life of automotive units is proposed, which includes: the selection of the main structural parameter of the unit under study, a description of the variational series of predicted values of the total service life of individual units with the determination of the probability density of its distribution, the total service life, the probability density of the distribution of the residual

Адрес для переписки

Иванов Владимир Петрович
Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой
ул. Блохина, 29,
211440, г. Новополоцк, Республика Беларусь
Тел.: +375 214 59-95-39
v.ivanov@psu.by

Address for correspondence

Ivanov Vladimir P.
Polotsk State University
named after Euphrosyne of Polotsk
29, Blohin str.,
211440, Novopolotsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 214 59-95-39
v.ivanov@psu.by

service life, and the total residual service life. It has been established that the probability density function of the total service life obeys the Weibull law, while the residual service life obeys the exponential law. It has been shown that the loss of the total service life of units before their decommissioning, write-off, or sending them for labor-intensive repairs amounts to 20–40% on an industry or enterprise scale. The obtained data allows us to provide an economic assessment of the conservation of the remaining service life of operating units. If repair work is scheduled using preliminary diagnostic studies, the range of replaceable parts included in connections whose condition is close to the ultimate limit will be determined.

Keywords: automotive unit, diagnostics, vibroacoustic monitoring, parameter, residual service life, resource conservation

For citation: Ivanov V. P., Zenkov V. A. (2026) Determining the Residual Life of Automotive Units Based on Vibroacoustic Analysis. *Science and Technique*. 25 (3), 239–245 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-3-239-245>

Введение

Надежность автомобильной техники тесно связана с экономической проблемой. Затраты на содержание парка автомобилей в исправном состоянии в течение всего срока их службы во много раз превышают затраты на их изготовление.

Остаточный ресурс – это суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения им предельного состояния. Актуальность определения остаточного ресурса агрегатов связана с тем, что большое количество агрегатов списывают или направляют в трудоемкий ремонт со значительной долей не расходуемого ресурса, что экономически неэффективно. На практике определение остаточного ресурса агрегатов выполняют субъективно или его совсем не оценивают по причине отсутствия необходимых методов и средств.

Особую значимость в диагностировании приобретают его безразборные методы, позволяющие оценивать техническое состояние агрегатов непосредственно в процессе их работы. Среди них ведущее место занимает вибродиагностирование как способ, основанный на анализе вибрационных и акустических сигналов, генерируемых движущимися и взаимодействующими деталями работающего агрегата.

Эффективное управление надежностью возможно лишь при наличии достоверной информации о техническом состоянии агрегатов и прогнозе их остаточного ресурса, а назначение технических воздействий должно осуществляться на основе диагностических данных, отражающих фактическое состояние техники [1]. Согласно [2], именно виброакустические параметры работающего двигателя несут основную диагностическую информацию. Эффективность виброакустического анализа как метода контроля технического состояния и работоспособности машин подтверждает исследование [3]. Вибрационный мониторинг двигателей рассматривается автора-

ми [4] как один из наиболее эффективных инструментов технического обслуживания по фактическому состоянию (condition-based maintenance), поскольку анализ вибросигналов позволяет судить о текущем техническом состоянии объектов. Результаты исследования [5] показывают, что по мере развития повреждений возрастают уровни ускорения и изменяются статистические параметры вибросигнала, а частотный анализ позволяет дополнительно выявлять характерные признаки неисправности подшипников. Объединение вибродиагностики и машинного обучения может быть рассмотрено как перспективная основа для мониторинга технического состояния агрегатов. Актуальность вибродиагностирования как прогрессивного метода подтверждается в систематизирующем исследовании [6].

Цель работы – разработать способ оценки остаточного ресурса отдельного агрегата с использованием значений структурных параметров, связанных с измеряемыми диагностическими параметрами виброакустическими методами, а также оценки суммарного остаточного ресурса группы одноименных агрегатов.

Методы исследования

В качестве объекта исследования выбраны наиболее сложные автомобильные агрегаты – двигатели. Были обследованы со значительно израсходованным ресурсом 25 двигателей марки ЗМЗ-402, разделенных по наработке на 8 групп и предназначенных для снятия с эксплуатации – списания или направления в капитальный ремонт. В качестве структурного параметра принят зазор (Δ , мм) в соединении «гильза цилиндра – поршень» [7]. Начальное значение структурного параметра принято равным номинальному (0,036 мм), его текущие значения изменялись от начального до предельного (0,360 мм). Зависимость наработки агрегатов от структурного параметра определяли путем стендовых ускоренных испытаний,

при этом значения структурного параметра были установлены по результатам измерения диагностических параметров. С помощью установленного на стенке блока цилиндров датчика определяли и записывали во время работы двигателя значения виброакустического параметра в виде амплитуды и частоты колебаний стенки корпусной детали.

Основная часть

Значения расчетной полной наработки $L_{\text{полн}}$ каждого двигателя с учетом текущей наработки определяли в виде прогноза по формуле [8]

$$L_{\text{полн}} = L_{\text{тек}} \left(\frac{\Pi_{\text{с пр}} - \Pi_{\text{с нач}}}{\Pi_{\text{с тек}} - \Pi_{\text{с нач}}} \right)^{\alpha}, \quad (1)$$

где $L_{\text{тек}}$ – текущее значение наработки; $\Pi_{\text{с нач}}$, $\Pi_{\text{с тек}}$, $\Pi_{\text{с пр}}$ – значения структурного параметра – начальное, текущее и предельное;

$$\alpha = \frac{\lg \frac{L_{\text{полн}}}{L_{\text{тек}}}}{\lg \frac{\Pi_{\text{с пр}} - \Pi_{\text{с нач}}}{\Pi_{\text{с тек}} - \Pi_{\text{с нач}}}} - \text{показатель степени.}$$

Показатель степени α характеризует скорость изменения структурного параметра при использовании агрегата. Его среднестатистические значения, по данным предыдущих исследований с использованием метода наименьших квадратов, составляют 0,68–0,84, тем самым исследуемая кривая (1) является выпуклой. Эти значения применяют в прогнозе об ожидаемом полном ресурсе $L_{\text{полн}}$ отдельных агрегатов.

Изменения диагностических параметров применительно к отдельным агрегатам тесно связаны с изменением соответствующих структурных параметров. Значения коэффициентов парной корреляции между диагностическими и структурными параметрами, определяющими состояние цилиндропоршневой группы и подшипников коленчатого вала, составляли 0,89 и 0,84 соответственно. Сопоставление между собой текущих значений структурных параметров при различной наработке агрегата служит базой для прогноза его технического состояния.

На рис. 1 приведены:

- динамика изменения наработки агрегатов от изменения структурного параметра;
- распределение полного ресурса отдельных агрегатов, при достижении которого они

подлежат списанию или капитальному ремонту;

– распределение остаточного ресурса отдельных агрегатов, с которым их снимают с эксплуатации.

Часть координатной оси $\Pi_{\text{с}}$ структурного параметра между его начальным и предельным значениями разделяли на 5–7 отрезков, концы которых определяют значения параметра, соответствующие долям использованного ресурса агрегата и числу измерений указанных показателей. Значения структурного параметра при текущей наработке обследуемого агрегата находят по результатам измерения соответствующего диагностического параметра.

Площадь графика $L = f(\Pi_{\text{с}})$, ограниченная двумя кривыми и ординатой $\Pi_{\text{с пр}}$ справа, определяет область возможных значений текущей наработки агрегата $L_{\text{тек}}$. Верхняя кривая определяет зависимость наработки от структурного параметра для агрегата высокого качества, способного достичь максимальной наработки L_{max} , а нижняя кривая описывает поведение агрегата, способного достичь только минимальной наработки L_{min} . Имея координаты двух точек графика (рис. 1с) – точку $(\Pi_{\text{с нач}}, 0)$, расположенную на оси $\Pi_{\text{с}}$, и точку $(\Pi_{\text{с тек}}, L_{\text{тек}})$, – можно получить уравнение кривой в степенном виде, которое определяет значение полного ресурса отдельного агрегата $L_{\text{полн}}$ при достижении структурным параметром своего предельного значения.

Для множества агрегатов одного вида применительно к автомобильному парку плотность вероятности распределения полного ресурса $f(L_{\text{полн}})$, значения которого приведены в табл. 1, подчиняется закону Вейбулла (рис. 1б)

$$f(L_{\text{полн}}) = \frac{p}{k} \left(\frac{L}{k} \right)^{p-1} e^{-\left(\frac{L}{k} \right)^p}, \quad (2)$$

где p – коэффициент формы; k – то же масштаба.

Параметры p и k находили путем решения системы уравнений [9, 10]:

$$\frac{n}{p} + \sum_{i=1}^n \ln L_i - \frac{n}{\sum_{i=1}^n L_i^p} \sum_{i=1}^n (L_i^p \ln L_i) = 0;$$

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n L_i^p}{n} \right)^{\frac{1}{p}},$$

где $i = 1 \dots n$; n – число измерений.

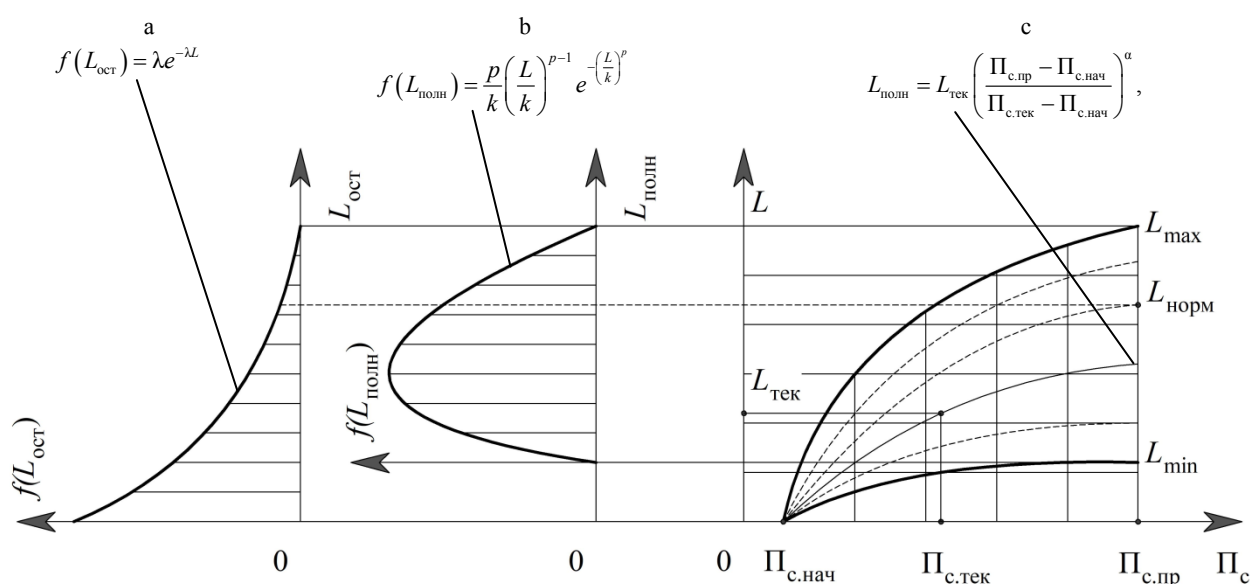


Рис. 1. Связь истощения ресурса L агрегата с изменением структурного параметра Π_c : а – плотность вероятности распределения остаточного ресурса $f(L_{ост})$; б – то же вероятности распределения полного ресурса $f(L_{полн})$; с – зависимость изменения структурного параметра от наработки $L = f(\Pi_c)$. Обозначения: $L_{мин}$, $L_{норм}$, $L_{макс}$, $L_{полн}$ и $L_{ост}$ – ресурс агрегата минимальный, нормативный, максимальный, полный и остаточный

Fig. 1. Relationship between the exhaustion of the resource L of the unit and the change in the structural parameter Π_c : а – probability density function of the distribution of the residual resource $f(L_{ост})$; б – probability density function of the distribution of the full resource $f(L_{полн})$; с – dependence of the change in the structural parameter on the operating time $L = f(\Pi_c)$. Designations: $L_{мин}$, $L_{норм}$, $L_{макс}$, $L_{полн}$ and $L_{ост}$ – the minimum, standard, maximum, full and residual resource of the unit

Таблица 1

Вариационный ряд значений полной наработки отдельных двигателей $L_{полн}$ до предельного состояния
Variational series of values of the total operating time of individual engines $L_{полн}$ to the limit state

№ двигателя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значение наработки $L_{полн}$	72	77	80	83	85	90	101	110	113	117

№ двигателя	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Значение наработки $L_{полн}$	120	122	123	125	131	138	140	144	148	155

№ двигателя	21	22	23	24	25
Значение наработки $L_{полн}$	160	170	185	195	245

В итоге получили: $p = 3,28$; $k = 146,07$, тогда

$$f(L_{полн}) = 0,0225(0,0068L)^{2,28} e^{-(0,0068L)^{3,28}}$$

Характеристики распределения:

- выборочное среднее 129,458;
- дисперсия 1694,082;
- среднеквадратическое отклонение 41,159;
- медиана 124;
- коэффициент эксцесса 1,023;
- коэффициент асимметрии 0,878.

Для подтверждения соответствия теоретических значений показателя экспериментальным сведениям рассчитывали значение критерия Пирсона χ^2 . Его расчетное значение со-

ставляет 10,2, а табличное значение при 5%-м уровне значимости и числе степеней свободы 6 равно 12,6 [11]. Гибкость распределения (2) заключается в том, что при $p = 1$ оно превращается в экспоненциальное с постоянной интенсивностью отказов при использовании агрегата, при $p = 2$ – в распределение Релея, а при $p = 3,44$ – в нормальное с возрастающей интенсивностью отказов.

Суммарный полный ресурс множества агрегатов одного вида

$$L_{\text{полн сум}} = \int_{L_{\text{мин}}}^{L_{\text{макс}}} Lf(L_{\text{полн}})dL.$$

Плотность вероятности распределения остаточного ресурса агрегатов $f(L_{\text{ост}})$ подчиняется экспоненциальному закону (рис. 1а)

$$f(L_{\text{ост}}) = \lambda e^{-\lambda L},$$

где λ – параметр распределения.

Параметр λ как обратная величина математического ожидания наработки до отказа (списания) $M(L_{\text{пред}})$ определяли по формуле

$$\lambda = \frac{1}{M(L_{\text{пред}})}.$$

Остаточный ресурс группы агрегатов зависит от изменения структурного параметра таким образом: при значении структурного параметра, равном начальному, остаточный ресурс равен полному ($L_{\text{ост}} = L_{\text{полн}}$); при значении структурного параметра, равном предельному, остаточный ресурс нулевой ($L_{\text{ост}} = 0$). Остаточный ресурс группы агрегатов в самом начале их использования равен полному ресурсу, по мере наработки он будет уменьшаться. Практический интерес представляет определение остаточного ресурса на завершающей стадии использования агрегатов.

Прогнозная суммарная наработка 25 (8 групп) двигателей группы составляла 12265 тыс. км (табл. 2). Шаг значений наработки 25 тыс. км.

Значение $M(L_{\text{пред}})$ рассчитывали в виде суммы произведений общей наработки $\sum L_{\text{полн}}$ в пределах отрезка шага наработки. Нарботка представляется количеством этих шагов в значении наработки. В итоге получили $M(L_{\text{пред}}) = 3,57$, а $\lambda = 0,28$, тогда

$$f(L_{\text{ост}}) = 0,28e^{-0,28L}. \quad (3)$$

Проверку гипотезы о законе распределения (3) выполняли с использованием критерия Пирсона χ^2 при 5%-м уровне значимости. Его расчетное значение составляет 12,8, а таб-

личное значение при 5%-м уровне значимости и числе степеней свободы 7 равно 14,1 [5].

Исключив из полного ресурса агрегата израсходованный ресурс $L_{\text{тек}}$, получили его остаточный ресурс $L_{\text{ост}}$

$$L_{\text{ост}} = L_{\text{полн}} - L_{\text{тек}}.$$

Суммарный остаточный ресурс $L_{\text{ост сум}}$ множества агрегатов парка автомобилей предприятия или региона, списываемых или направляемых в ремонт для восстановления ресурса, можно определить по формуле

$$L_{\text{ост сум}} = \int_{L_{\text{мин}}}^{L_{\text{макс}}} Lf(L_{\text{полн}})dL - \int_0^{L_{\text{макс}}} Lf(L_{\text{тек}})dL.$$

Средний остаточный ресурс $L_{\text{ост ср}}$ одного агрегата

$$L_{\text{ост ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} L_{\text{ост } i} f(L_{\text{ост } i}).$$

Доля двигателей с неизрасходованным ресурсом $P(L)$ равна

$$P(L) = e^{-0,28L}.$$

В рассматриваемом случае при $L = 100$ тыс. км эта доля равна 32,8 %, при $L = 150$ тыс. км она составит 18,8 %.

Долю использования полного ресурса $IP_{\text{полн}}$ парка агрегатов можно также рассчитать по формуле

$$IP_{\text{полн}} = \frac{L_{\text{полн ср}} - L_{\text{ост ср}}}{L_{\text{полн ср}}} = 1 - \frac{L_{\text{ост ср}}}{L_{\text{полн ср}}}.$$

Виброакустическое диагностирование позволяет выявить детали цилиндропоршневой группы, кривошипно-шатунного и газораспределительного механизмов с износом, близким к предельному, и рекомендовать их замену.

Алгоритм определения остаточного ресурса автомобильных агрегатов с расчетом доли использования их полного ресурса приведен на рис. 2.

Таблица 2

Характеристика полного ресурса группы двигателей $\sum L_{\text{полн}}$ по достижении наработки L с частотой w
Characteristic of the total service life of a group of engines $\sum L_{\text{полн}}$ upon reaching the operating time L with frequency w

Отрезок значений наработки, тыс. км	50–75	75–100	100–125	125–150	150–175	175–200	200–225	225–250
Общая наработка в пределах отрезка $\sum L_{\text{полн}}$, тыс. км	3225	3150	2650	1505	755	530	0	250
Частота w	0,26	0,25	0,22	0,12	0,06	0,04	0	0,02
Количество двигателей в отрезке значений наработки	1	5	7	5	3	3	0	1

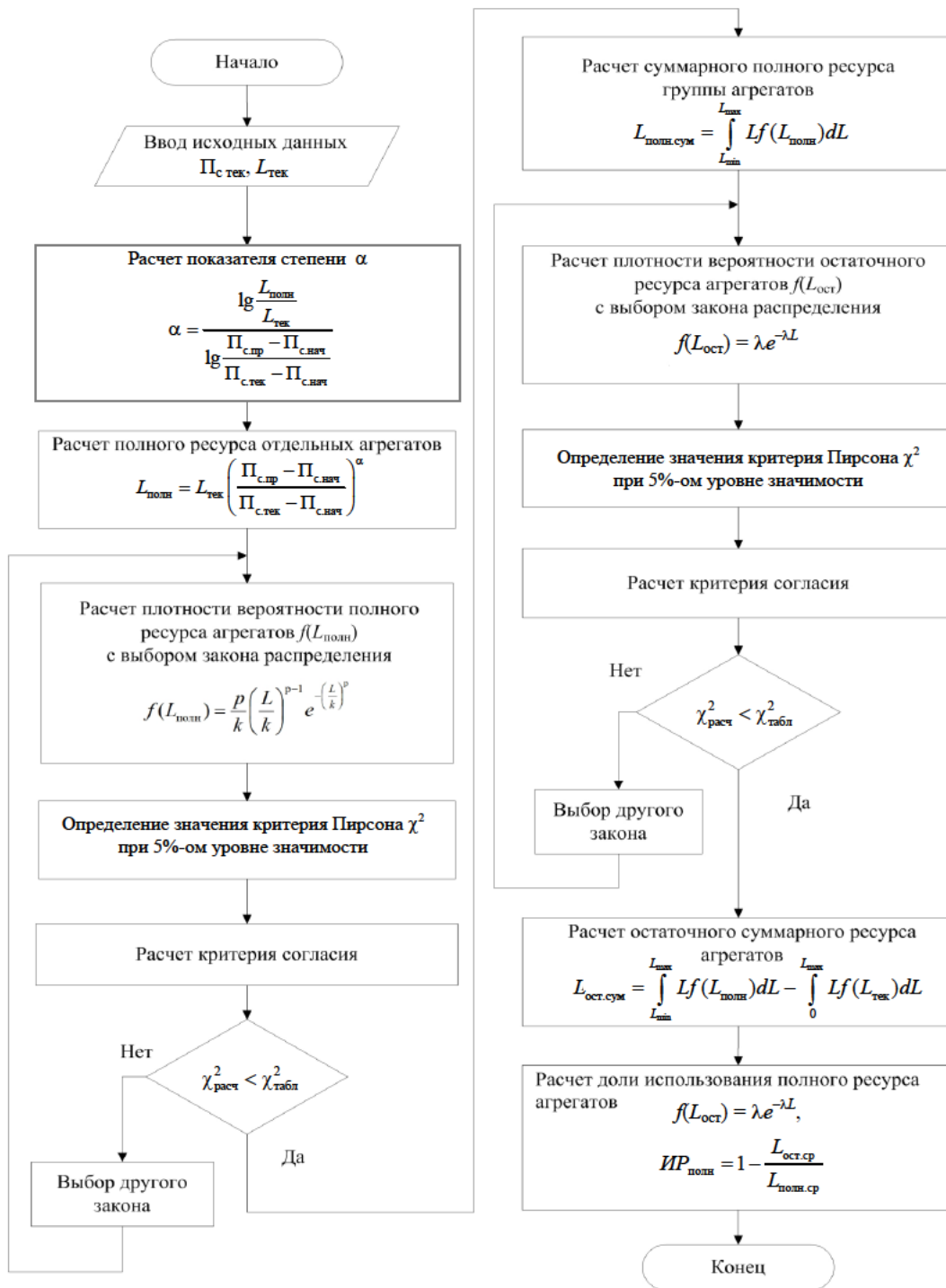


Рис. 2. Алгоритм определения остаточного ресурса автомобильных агрегатов с расчетом доли использования их ресурса
 Fig. 2. Algorithm for determining the remaining life of automotive units with calculation of the percentage of their resource use

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод оценки остаточного ресурса группы автомобильных агрегатов, который включает выбор основного структурного параметра исследуемого вида агрегата, описание вариационного ряда прогнозных значений

полного ресурса отдельных агрегатов с определением плотности вероятности его распределения, суммарного полного ресурса, плотности вероятности распределения остаточного ресурса и суммарного остаточного ресурса. Он устанавливает, что плотность вероятности распределения полного ресурса подчиняется закону Вей-

булла, а плотность остаточного ресурса – экспоненциальному закону, что позволяет получать сведения о доле использованного полного ресурса агрегатов перед их снятием с эксплуатации, которая составляет в масштабах отрасли или предприятия 20–40 %.

2. Полученные сведения позволяют дать экономическую оценку сбережения остаточного ресурса эксплуатируемых агрегатов. В случае назначения ремонтных работ с использованием предварительных диагностических исследований будет определена номенклатура заменяемых деталей, входящих в соединения, состояние которых близко к предельному.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михлин, В. М. Управление надежностью сельскохозяйственной техники / В. М. Михлин. М.: Колос, 1984. 355 с.
2. Ждановский, Н. С. Надежность и долговечность авто-тракторных двигателей / Н. С. Ждановский, А. В. Николаенко. Л.: Колос, 1981. 292 с.
3. Mohd Ghazali M. H., Rahiman W. (2021) Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review / M. H. Mohd Ghazali, W. Rahiman // *Shock and Vibration*. 2021. Vol. 2021, iss. 1. Article ID 9469318. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>
4. Nithin, S. K. Review on Combustion and Vibration Condition Monitoring of IC Engine / S. K. Nithin, K. Hemanth, V. Shamanth // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. P. 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.093>
5. Internal Combustion Engine Gearbox Bearing Fault Prediction Using J48 and Random Forest Classifier / N. Somehalli Kapanigowda, H. Krishna, S. Vasanth, A. Thammaiah // *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2023. Vol. 13, No 4. P. 4467–4476. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i4.pp4467-4476>
6. Review on Vibration-Based Condition Monitoring of Rotating Machinery / M. Tiboni, C. Remino, R. Bussola, C. A. Amici // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No 3. Art. 972. <https://doi.org/10.3390/app12030972>
7. Иванов, В. П. Оценка остаточного ресурса автомобильных двигателей с обоснованием мероприятий по повышению их долговечности / В. П. Иванов, А. В. Дудан, Т. В. Вигерина // *Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. Минск: Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси*, 2022. Вып. 11. С. 97–100.
8. Гурвич, И. Б. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей / И. Б. Гурвич, П. Э. Сыркин. М.: Транспорт, 1984. 141 с.
9. Статистические методы: распределение Вейбулла. Анализ данных: ГОСТ Р 50779.27-2017 (МЭК 61649:2008) (IEC 61649:2008, Weibull analysis, MOD). Введ. 10.08.2017. М.: Стандартинформ, 2017. 57 с.
10. Абдуллин, М. Р. Статистическое обоснование прочностных характеристик композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04 / М. Р. Абдуллин; Ин-т машиноведения имени А. А. Благонравова. М., 2014. 90 с.
11. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений: учебник / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. М.: Наука, 1965. 511 с.

Поступила 22.01.2026

Подписана в печать 24.03.2026

Опубликована онлайн 29.05.2026

REFERENCES

1. Mikhlin V. M. (1984) *Reliability Management of Agricultural Machinery*. Moscow, Kolos Publ. 355 (in Russian).
2. Zhdanovsky N. S., Nikolaenko A. V. (1981) *Reliability and Durability of Automotive and Tractor Engines*. Leningrad, Kolos Publ. 292 (in Russian).
3. Mohd Ghazali M. H., Rahiman W. (2021) Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review. *Shock and Vibration*, 2021 (1), 9469318. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>
4. Nithin S. K., Hemanth K., Shamanth, V. (2021) A Review on Combustion and Vibration Condition Monitoring of IC Engine. *Materials Today: Proceedings*, 45, 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.093>
5. Somehalli Kapanigowda N., Krishna H., Vasanth S., Thammaiah A. (2023) Internal Combustion Engine Gearbox Bearing Fault Prediction Using J48 and Random Forest Classifier. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 13 (4), 4467–4476. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i4.pp4467-4476>
6. Tiboni M., Remino C., Bussola R., Amici C. (2022) A Review on Vibration-Based Condition Monitoring of Rotating Machinery. *Applied Sciences*, 12 (3), 972. <https://doi.org/10.3390/app12030972>
7. Ivanov V. P., Dudan A. V., Vigerina T. V. (2022) Assessment of the Residual Life of Automobile Engines with Justification of Measures to Increase Their Durability. *Aktualnye Voprosy Mashinovedeniya: sb. nauch. tr.* [Current Issues in Mechanical Engineering: collection of scientific papers]. Minsk, The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Iss. 11, 97–100 (in Russian).
8. Gurvich I. B., Syркин P. E. (1984) *Operational Reliability of Automobile Engines*. Moscow, Transport Publ. 141 (in Russian).
9. State Standard P 50779.27-2017. (MEK 61649: 2008). *Statistical methods: Weibull distribution. Data analysis (IEC 61649:2008, Weibull analysis, MOD)*. Moscow, Standartinform Publ. 57 (in Russian).
10. Abdullin M. R. (2014) *Statistical Justification of Strength Characteristics of Composite Materials* [Dissertation]. Moscow, Publishing House of Mechanical Engineering Research Institute named after A. A. Blagonravov. 90 (in Russian).
11. Smirnov N. V., Dunin-Barkovsky I. V. (1965) *Course in Probability Theory and Mathematical Statistics for Technical Applications*. Moscow, Nauka Publ. 511 (in Russian).

Received: 22.01.2026

Accepted: 24.03.2026

Published online: 29.05.2026