

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

Павел Петрович Гамаюнов<sup>1</sup>  
Абдул Гаджибалаевич Баламирзоев<sup>2,3</sup>  
Шамиль Магамедович Игитов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

<sup>2</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) –  
Махачкалинский филиал

<sup>3</sup>Дагестанский государственный педагогический университет, г. Махачкала

Теория восстановления машин предусматривает системный подход ко всем явлениям и процессам, связанным с восстановлением работоспособности. Предметом изучения теории является комплекс проблем, решение которых позволило бы превратить сферу ремонта машин в эффективную область производственной деятельности. Уровень ремонтпригодности автомобилей и их составных частей во многом определяется объективностью системы нормативов, регламентирующих обеспечение ремонтпригодности на этапах расчета, проектирования, производства, эксплуатации и ремонта. Для изделий-аналогов путем проведения статистических исследований устанавливаются возможные повреждения, которые классифицируются по определенным признакам. В отдельную классификационную группу относятся повреждения, по которым изделие является неремонтпригодным. Одновременно фиксируются наработки до появления того или иного повреждения. Исследования и анализ проводятся для доремонтной и межремонтной наработок. В статье рассматривается моделирование прогнозирования показателей ремонтпригодности изделий. Разработаны прогнозные процедуры оценивания показателей ремонтпригодности, которые связаны с обоснованием комплексных показателей конструктивно-технологических особенностей изделий, несущих в себе информацию о возможной их работоспособности. По результатам можно определить прогнозные оценки возможного уровня повреждаемости по критическим дефектам в зависимости от величины комплексного показателя конструктивно-технологических особенностей блоков цилиндров дизельных двигателей. Полученные данные позволяют установить (по методу наименьших квадратов) эмпирическую зависимость между показателями удельной повреждаемости и показателем конструктивно-технологических особенностей для блока цилиндров. Выявленные закономерности могут быть использованы для оценки показателей ремонтной технологичности и ремонтпригодности блока цилиндров проектируемого двигателя. Приведены оценки показателей ремонтпригодности блока цилиндров проектируемого мотора. КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: моделирование, ремонтпригодность, повреждаемость детали, двигатель, эксплуатационные свойства.

## PREDICTIVE SIMULATION OF MAINTAINABILITY INDICATORS OF DIFFERENT ITEMS

Pavel P. Gamayunov<sup>1</sup>  
Abdul G. Balamirzoev<sup>2,3</sup>  
Shamil M. Igitov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

<sup>2</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) –  
Makhachkala Branch

<sup>3</sup>Dagestan State Pedagogical University, Makhachkala

The theory of machine repair presupposes a system approach to all the phenomena and processes associated with performance restoration. The subject of study of this theory is a complex of problems, the solution of which would allow turning the sphere of machine repair into an efficient area of production activities. The level of maintainability of vehicles and their components is largely determined by the objectivity of the system of standards that govern the maintainability assurance at the stages of calculation, design, production, operation, and repair. For comparable items statistical studies determine the possible damage, which is classified according to certain criteria. A separate classification group includes damages that make the item non-repairable. The

operating time before particular damages is recorded simultaneously. Research and analysis are performed for pre-repair and inter-repair operating time. This article deals with predictive simulation of maintainability indicators of different items. The authors have developed predictive procedures for assessing the maintainability indicators, which are associated with the justification of complex indicators of structural and technological features of items carrying the information about their possible operability. The results allow determining the predictive estimates of the possible damage level by critical defects depending on the value of the complex indicator of structural and technological features of diesel engine cylinder blocks. Using the least squares method the obtained data allows establishing an empirical relationship between the specific damage indicators and the indicator of structural and technological features for a cylinder block. The revealed patterns can be used to assess the indicators of maintainability and repairability of the cylinder block of the designed engine. The authors provide the estimated maintainability indicators of the cylinder block of the designed engine.

KEYWORDS: simulation, maintainability, damage of parts, engine, operational properties.

**Р**емонтопригодностью называют свойство изделия, которое характеризует его приспособленность к восстановлению состояния исправности, а также сохранение заданной технической характеристики методами предупреждения, выявления, устранения отказов.

Ремонтопригодность должна обеспечиваться уже на стадии проектирования и производства изделий посредством правильного выбора конструкции и соблюдения технологии изготовления. При эксплуатации изделия поддержание его ремонтпригодности достигается посредством рациональной системы ремонта и технического обслуживания.

Современное машиностроение характеризуется тенденцией увеличения мощности энергетических установок с одновременным снижением массы машин. Это приводит к появлению и протеканию в элементах конструкции изделий сложных процессов силового (квазистатического и вибрационного) и теплового нагружения, сопровождающихся релаксационными напряжениями, что проявляется в повышенном напряженно-деформированном состоянии конструктивных элементов машин. На величину напряженно-деформированного состояния оказывают влияние как внешние факторы (характер приложения нагрузок и их распределение, скорость перемещения трущихся тел, температурный режим, способ организации смазывания), так и конструктивное совершенство и технологическая отработка конструкции деталей, сопряжений и сборочных единиц (рациональный выбор материала, решение компоновочных схем и конструктивного оформления деталей и сопряжений) и др. [2, 3, 4, 9, 10, 11].

Конструктивно-технологические факторы и сложный характер нагружения формируют общие свойства, характеризующие ремонтпригодность и ремонтную технологичность машин и их составных частей, определяют в конечном итоге уровень восстанавливаемости их эксплуатационных свойств [6, 7].

Объективный расчет показателей ремонтпригодности на стадиях технического задания, технического предложения и эскизного проекта затрудняется из-за отсутствия необходимой информации. Поэтому приходится разрабатывать прогнозные процедуры оценивания показателей ремонтпригодности, что связано с необходимостью определения показателей конструктивно-технологических особенностей изделий, несущих в себе информацию о возможной их работоспособности.

Выбор и обоснование показателей конструктивно-технологических особенностей, расчетное определение их значений, установление взаимосвязи с эксплуатационными свойствами определяются функциональным назначением изделия, характером конструктивного и технологического исполнения и другими факторами. В настоящее время пока не следует ожидать появления универсального метода выбора и обоснования такого рода показателей. Наиболее удовлетворительное решение этой задачи основывается на использовании информации об изделиях-аналогах, опыте их разработки, изготовления, эксплуатации и ремонта [1, 8, 12].

Выбор показателя конструктивно-технологических особенностей изделия рассмотрим на примере блока цилиндров двигателей внутреннего сгорания как наиболее сложной, материалоемкой и трудоемкой базовой детали.

В литературе предложены некоторые обобщенные параметры, к которым прежде всего относятся удельная материалоемкость и жесткость [5, 13, 14]. Удельная материалоемкость определяется отношением

$$m = \frac{G}{N_e}, \quad (1)$$

где  $G$  – масса двигателя (детали), кг;

$N_e$  – эффективная мощность двигателя, кВт.

В качестве параметра, определяющего жесткость блока цилиндров, используют показатель

$$\varphi = \frac{D}{L_0}, \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр отверстия под верхний посадочный буртик гильзы цилиндра, м;

$L_0$  – расстояние между осями примыкающих отверстий под гильзы цилиндров, м.

На глубину и характер повреждаемости детали оказывает влияние материал, из которого она изготовлена. В качестве характеристики материала может быть применен относительный коэффициент интенсивности напряжений

$$K_{\text{и.отн}} = \frac{K_{\text{и}}^{\text{б}}}{K_{\text{и}}^{\text{i}}}, \quad (3)$$

где  $K_{\text{и}}^{\text{б}}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений для базового двигателя;

$K_{\text{и}}^{\text{i}}$  – то же для сравниваемого варианта двигателя.

Этот показатель несет информацию о величине нагрузки, выдерживаемой материалом при наличии трещинки, т. е. характеризует сопротивление распространению трещин.

Влияние нагруженности, возникающей под действием максимальной суммарной силы за цикл в работающем двигателе, учитывают с помощью коэффициента приведения

$$K_{\text{пр}} = \frac{P_{\sum \text{max}}^{\text{б}}}{P_{\sum \text{max}}^{\text{i}}}, \quad (4)$$

где  $P_{\sum \text{max}}^{\text{б}}$  – максимальная суммарная сила за цикл работы двигателя, определяемая для базового варианта, Н;

$P_{\sum \text{max}}^{\text{i}}$  – то же для сравниваемого варианта мотора, Н.

В соответствии с уравнениями (1) – (4) введем понятие комплексного показателя конструктивно-технологических особенностей применительно к блоку цилиндров дизельных двигателей

$$K_{\text{кт}} = \frac{m}{\varphi} K_{\text{и.отн}} K_{\text{пр}}, \quad (5)$$

который может быть применен для прогнозной оценки значения повреждаемости конструктивных составляющих блока цилиндров, определения наработок до возникновения критических повреждений, расчета характеристик ремонтпригодности и иных целей на этапах проектирования, доводки и опережающего выпуска свежих изделий.

К критическим повреждениям относятся те, с появлением которых деталь (изделие) становится неремонтопригодной. К примеру, для блока цилиндров – это трещинки по коренным опорам, перемычкам, на привалочных плоскостях под головки цилиндров и др. Для прогнозирования характеристик ремонтпригодности и ремонтной технологичности на стадии проектирования следует в большем объеме применять информацию об изделиях-аналогах.

Рассмотрим некоторые характеристики ремонтпригодности блока цилиндров проектируемого двигателя внутреннего сгорания, для которого в качестве двигателей-аналогов могут быть применены двигатели-дизели № 1–4. Исходные данные для определения численных значений комплексного показателя  $K_{кт}$  и итоги его расчета приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Формирование показателей конструктивно-технологических особенностей двигателей-аналогов**

Двигатель-аналог	Масса блока, кг	Мощность, кВт	$\varphi$	$K_{и.отн}$	$K_{пр}$	$K_{кт}$
№ 1	190	154	0,911	1,0	1,0	1,35
№ 2	292	176	0,802	1,0	1,057	2,19
№ 3	269	132	0,802	1,0	1,057	2,68
№ 4	530	141	0,963	1,0	1,0	3,90

Для изделий-аналогов путем проведения статистических исследований устанавливаются возможные повреждения, которые классифицируются по определенным признакам. В отдельную классификационную группу относятся повреждения, по которым изделие является неремонтопригодным. Одновременно фиксируются наработки до появления того или иного повреждения. Исследования и анализ проводятся для доремонтной и межремонтной наработок.

В качестве количественной оценки уровня повреждений примем показатель удельной повреждаемости

$$g_i = \frac{\sum_{k=1}^{N_i} \frac{1}{L_{ik}}}{N_i}, \quad (6)$$

где  $L_{ik}$  – наработка  $k$ -го изделия до появления  $i$ -го повреждения, ч;

$N_i$  – количество изделий, имеющих  $i$ -й вид повреждений, шт.

Обработанные по формуле (6) результаты статистического исследования технического состояния блоков цилиндров на авторемонтных предприятиях представлены в таблице 2.

**Таблица 2. Показатели удельной повреждаемости для двигателей-аналогов**

Показатель	Двигатель-аналог			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
$K_{кт}$	1,35	2,19	2,68	3,90
$g_1$	0,2710	0,0833	0,0379	0,0014
$g_2$	0,2080	0,0237	0,0056	0,0014
$g_3$	0,1020	0,0268	0,0158	0,0014

В таблице 2 приведены показатели удельной повреждаемости для следующих критических повреждений блока цилиндров:

$g_1$  – трещины на рубашке охлаждения;

$g_2$  – трещины по перемычкам на привалочных плоскостях под головки цилиндров;

$g_3$  – трещины по коренным опорам.

Данные таблицы 2 позволяют установить (по методу наименьших квадратов) эмпирическую зависимость между показателями удельной повреждаемости  $g_1, g_2, g_3$  и показателем конструктивно-технологических особенностей  $K_{кт}$  для блока цилиндров.

Указанная эмпирическая зависимость может быть представлена в виде

$$g_i = a \cdot \exp\left\{\frac{b}{K_{кт}}\right\}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (7)$$

где  $a, b$  – параметры, подлежащие определению.

Логарифмируя (7), получим

$$\ln g_i = \ln a + \frac{b}{K_{кт}}. \quad (8)$$

После замены переменных  $z = \ln g_i, \quad t = \frac{1}{K_{кт}}$  уравнение (8) принимает вид линейной зависимости

$$z = At + B. \quad (9)$$

Параметры уравнений (7) и (9) связаны соотношениями:

$$a = e^B; \quad b = A, \quad (10)$$

где  $A$  и  $B$  определяют по методу наименьших квадратов.

Результаты расчетов представлены в таблице 3.

**Таблица 3. Формирование эмпирических зависимостей**

Параметр	Двигатель-аналог			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
$K_{кт}$	1,35	2,19	2,68	3,90
$e = \frac{1}{K_{кт}}$	0,741	0,457	0,373	0,256
$g_1$	0,2710	0,0833	0,0379	0,0014
$z = \ln g_1$	-1,3056	-2,4853	-3,2728	-6,5713
	$A = 9,535; B = -7,7638$		$a = 4,248 \cdot 10^{-4}; b = 9,535$	
Выравненное значение $g_1$	0,4974	0,03316	0,01489	0,004879
$g_2$	0,2080	0,0237	0,0056	0,0014
$z = \ln g_2$	-1,5702	-3,7423	-5,1850	-6,5713
	$A = 10,195; B = -8,9240$		$a = 1,332 \cdot 10^{-4}; b = 10,195$	
Выравненное значение $g_2$	0,2543	0,01406	0,005669	0,001811
$g_3$	0,1020	0,0268	0,0158	0,0014
$z = \ln g_3$	-2,2828	-3,6194	-4,1478	-6,5713
	$A = 7,937; B = -7,7804$		$a = 4,178 \cdot 10^{-4}; b = 7,937$	
Выравненное значение $g_3$	0,1497	0,01571	0,008067	0,003187

Таким образом, мы получили эмпирические зависимости показателей удельной повреждаемости от значений комплексного показателя конструктивно-технологических индивидуальностей для следующих критических повреждений блока цилиндров:

- трещины на рубашке охлаждения

$$g_1 = 4,248 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left\{\frac{9,535}{K_{кт}}\right\}; \quad (11)$$

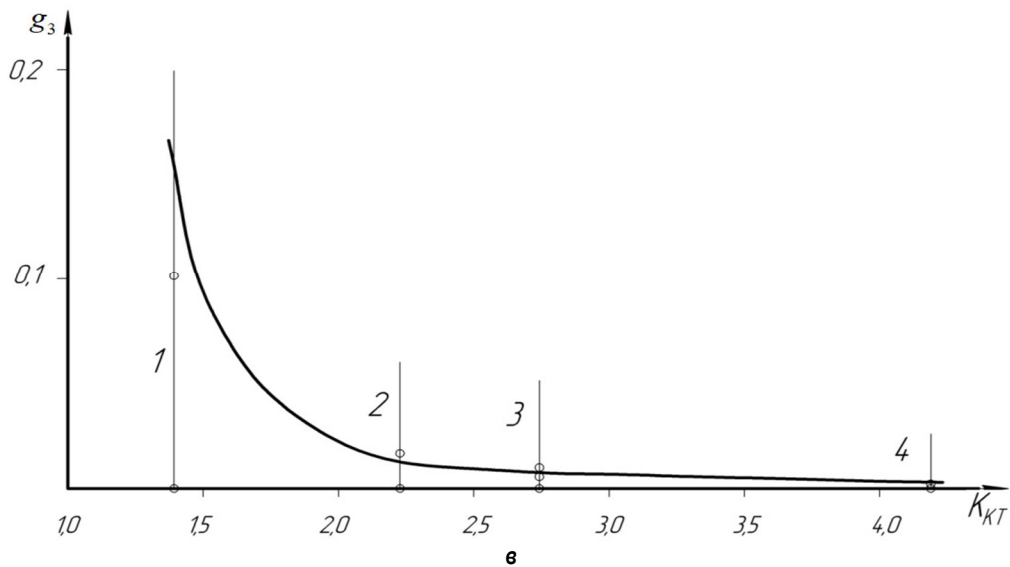
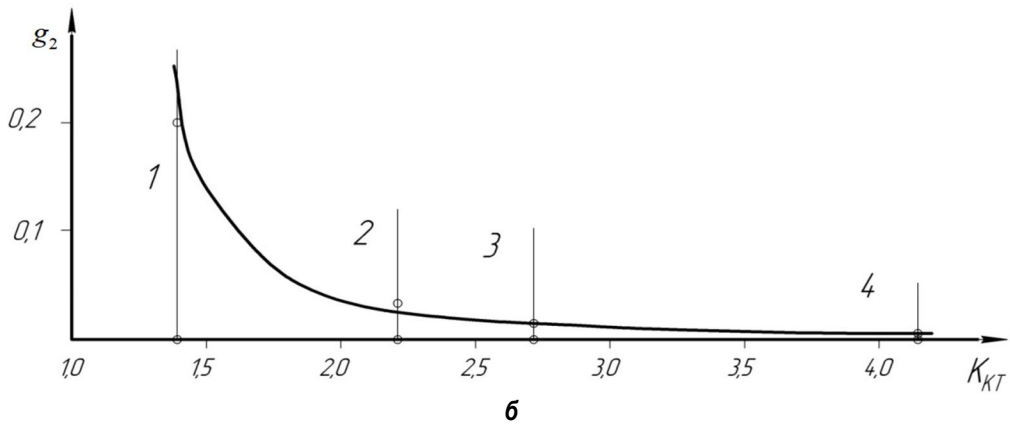
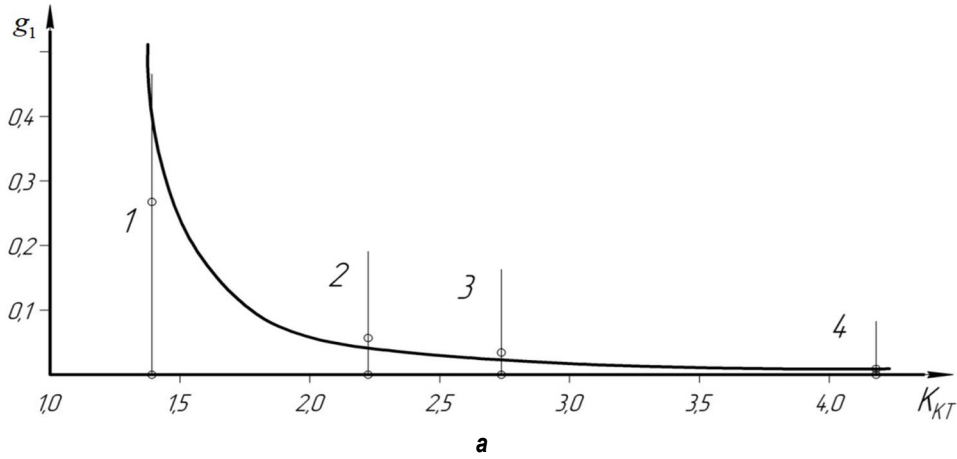
- трещины по перемычкам на привалочных плоскостях под головки цилиндров

$$g_2 = 1,332 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left\{\frac{10,195}{K_{кт}}\right\}; \quad (12)$$

- трещины по коренным опорам

$$g_3 = 4,178 \cdot 10^{-4} \cdot \exp \left\{ \frac{7,937}{K_{KT}} \right\}. \quad (13)$$

Эти зависимости представлены на рисунке.



Зависимости показателей удельной повреждаемости от комплексного показателя конструктивно-технологических индивидуальностей для критических повреждений блока цилиндров: 1 – двигатель № 1; 2 – двигатель № 2; 3 – двигатель № 3; 4 – двигатель № 4; а, б, в – эмпирические зависимости соответственно (11), (12), (13)

По формулам (11) – (13) можно определить прогнозные оценки возможного уровня повреждаемости по критическим дефектам в зависимости от величины комплексного показателя конструктивно-технологических особенностей блоков цилиндров дизельных двигателей. Полученные зависимости справедливы для  $K_{кт}$ , лежащих в пределах 1,35–3,90, для других значений  $K_{кт}$  их необходимо корректировать. Например, по данным конструкторской документации известно численное значение комплексного показателя конструктивно-технологических особенностей блока цилиндров проектируемого двигателя  $K_{кт} = 1,79$ . Используя зависимости (11) – (13), по значению  $K_{кт}$  оценивают показатели удельной повреждаемости блока цилиндров проектируемого двигателя по критическим дефектам:

- трещины на рубашке охлаждения

$$g_1 = 4,248 \cdot 10^{-4} \cdot \exp \left\{ \frac{9,535}{K_{кт}} \right\} = 0,0874; \quad (14)$$

- трещины по перемычкам на привалочных плоскостях под головки цилиндров

$$g_2 = 1,332 \cdot 10^{-4} \cdot \exp \left\{ \frac{10,195}{K_{кт}} \right\} = 0,0396; \quad (15)$$

- трещины по коренным опорам

$$g_3 = 4,178 \cdot 10^{-4} \cdot \exp \left\{ \frac{7,937}{K_{кт}} \right\} = 0,0352. \quad (16)$$

Рассмотрим теперь задачу построения прогнозной процедуры оценки минимальной наработки изделия до появления того или иного вида повреждений. Предположим, что необходимо определить момент появления критических повреждений (например, трещинообразования), т. е. наработки изделия на отказ. Тогда можно предположить, что наработка изделия до появления трещин есть случайная величина  $X$  с экспоненциальным распределением – внезапные отказы

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < x_0, \\ \lambda e^{-\lambda(x-x_0)}, & x \geq x_0, \end{cases} \quad (17)$$

где  $\lambda$  – интенсивность потока отказов.

Математическое ожидание случайной величины  $X$  определяется по формуле (18)

$$M(X) = \int_{x_0}^{\infty} \lambda x e^{-\lambda(x-x_0)} dx = x_0 + \frac{1}{\lambda} = \bar{x}, \quad (18)$$

где  $\bar{x}$  – точечная статистическая оценка для  $M(X)$ .

При этом

$$\bar{x} - x = 1/\lambda = \sigma, \quad (19)$$

где  $\sigma$  – точечная статистическая оценка для среднего квадратического отклонения, а смещение  $x_0$  определяется как разность статистических оценок  $\bar{x} - \sigma$  – среднее наименьшее значение наработки на отказ.

В силу (17) вероятность отказа изделия на интервале наработки  $(x_0, x)$

$$q(x) = \int_{x_0}^{\infty} \lambda x e^{-\lambda(x-x_0)} dx = 1 + e^{-\lambda(x-x_0)}, \quad (20)$$

а вероятность противоположного события, т. е. безотказной работы на интервале наработки  $(x_0, x)$

$$p(x) = 1 - g(x) = e^{-\lambda(x-x_0)}. \quad (21)$$

Из формирующей функции потенциала работоспособности системы [2] для изделия-детали согласно (21) следует

$$p(x) = e^{-\lambda(x-x_0)} = k(x), \quad (22)$$

где  $k(x)$  – коэффициент повторного использования массы детали с наработкой  $x$ .

Из (22) следует, что наработка

$$x = x_0 - \frac{\ln k(x)}{\lambda}. \quad (23)$$

В соответствии с уравнением (23), задаваясь значением  $k$  и используя информацию по потокам возникновения повреждений, рассчитывают прогнозные значения наработок за доремонтный и межремонтные циклы для каждого изделия-аналога.

Вернемся к рассмотренному выше блоку цилиндров двигателя с теми же двигателями-аналогами. Для определения средней наработки блока цилиндров по крайней мере до одного из рассмотренных критических повреждений за доремонтный ( $L_{нб}$ ) и межремонтные ( $L_{рб}$ ) циклы объединим результаты статистического исследования по  $L_{ik}$ , выполненного по формуле (6), в соответствии с уравнениями (17) и (18) рассчитаем значения  $\bar{x}$  и  $\sigma$ , а затем вычислим интенсивность потока отказов (24) и смещение (25):

$$\lambda = 1/\sigma; \quad (24)$$

$$x_0 = \bar{x} - 1/\lambda. \quad (25)$$

Приняв, что наработке блока цилиндров (как детали) на отказ соответствует предельное значение коэффициента повторного использования массы детали, с учетом уравнений (18) и (23), рассчитаем наработку детали на отказ (среднее время жизни)

$$x_{\text{отк}} = x_0 - \frac{\ln k_{\text{пред}}}{\lambda} = \bar{x}. \quad (26)$$

Откуда с учетом уравнений (22) и (25) определим  $k_{\text{пред}}$

$$k_{\text{пред}} = P(X = \bar{x}) = e^{-\lambda(x_0 - \bar{x})} = \frac{1}{e} = 0,368. \quad (27)$$

С другой стороны, наработке блока цилиндров как базовой детали двигателя за доремонтный ( $L_{нд}$ ) и межремонтный ( $L_{рд}$ ) циклы работы двигателя должны соответствовать достаточно большие значения коэффициента повторного использования массы. Будем полагать, что

$$k = k(L_{нд}) = 0,99, \quad k = k(L_{нд} + L_{рд}) = 0,97. \quad (28)$$

Теперь с учетом уравнений (23), (24), (27) и (28) получим информацию о наработках по блокам цилиндров двигателей-аналогов (табл. 4).



## ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

**Таблица 4. Информация по блокам цилиндров двигателей-аналогов**

Показатель	Двигатель-аналог			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
$K_{кт}$	1,35	2,19	2,68	3,90
<b>Доремонтный цикл</b>				
$L_{мин}$ , ТЫС. КМ	102,9	158,8	160,5	700
$\lambda$ , 1 /ТЫС. КМ	0,01044	0,01076	0,01665	-
$k_{пред}$	0,368	0,368	0,368	-
$L_{нб}$ , ТЫС. КМ	198,7	251,7	220,6	700
$k(L_{нд})$	0,99	0,99	0,99	-
$L_{нд}$ , ТЫС. КМ	103,9	159,7	161,1	700
<b>Межремонтный цикл</b>				
$L_{мин}$ , ТЫС. КМ	59,9	139,5	141,8	500
$\lambda$ , 1 /ТЫС. КМ	0,01533	0,02544	0,02587	-
$k_{пред}$	0,368	0,368	0,368	-
$L_{рб}$ , ТЫС. КМ	125,1	178,8	180,5	500
$k(L_{рд})$	0,97	0,97	0,97	-
$L_{рд}$ , ТЫС. КМ	61,9	140,7	143,0	500

Прогнозная наработка блока цилиндров зависит от показателя конструктивно-технологических особенностей  $K_{кт}$

$$x = aK_{кт}^b, \quad (29)$$

где  $a, b$  – параметры, подлежащие определению.

Из уравнения (29) получим

$$\ln x = \ln a + b \ln K_{кт}. \quad (30)$$

Замена переменных в уравнении (30) приводит к линейной зависимости

$$z = At + B. \quad (31)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 5.

**Таблица 5. Формирование эмпирических зависимостей**

Параметр	Двигатель-аналог			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
$K_{кт}$	1,35	2,19	2,68	3,90
$t = \ln K_{кт}$	0,3001	0,7839	0,9858	1,3610
$L_{нб}$	198,7	251,7	220,6	700
$z = \ln L_{нб}$	5,2918	5,5282	5,3964	6,5511
	$A = 1,0745; B = 4,7703$		$a = 117,95; b = 1,0745$	
Выравненное значение $L_{нб}$	162,8	273,9	340,2	509,1
$L_{нд}$	103,9	159,7	161,1	700
$z = \ln L_{нд}$	4,6434	5,0733	5,0820	6,5511
	$A = 1,6800; B = 3,8965$		$a = 49,23; b = 1,6800$	
Выравненное значение $L_{нд}$	81,5	183,7	257,9	484,4
$L_{рб}$	125,1	178,8	180,5	500
$z = \ln L_{рб}$	4,8291	5,1863	5,1957	6,2146
	$A = 1,2250; B = 4,3058$		$a = 72,13; b = 1,2250$	
Выравненное значение $L_{рб}$	107,1	193,6	248,0	321,5
$L_{рд}$	61,9	140,7	143,0	500
$z = \ln L_{рд}$	4,1255	4,9466	4,9628	6,2146
	$A = 1,8736; B = 3,4554$		$a = 31,67; b = 1,8736$	
Выравненное значение $L_{рд}$	55,6	137,6	200,8	405,6

Таким образом, в соответствии с (27) и (28) наработка за доремонтный цикл описывается зависимостями:

$$k = k_{\text{перед}} = 0,368; L_{\text{нб}} = 117,95 K_{\text{кт}}^{1,0745} \text{ (тыс. км);} \quad (32)$$

$$k = 0,99; L_{\text{нд}} = 49,23 K_{\text{кт}}^{1,6800} \text{ (тыс. км).} \quad (33)$$

Для межремонтной наработки имеют место зависимости:

$$k = k_{\text{перед}} = 0,368; L_{\text{рб}} = 72,13 K_{\text{кт}}^{1,2250} \text{ (тыс. км);} \quad (34)$$

$$k = 0,97; L_{\text{рд}} = 31,67 K_{\text{кт}}^{1,8736} \text{ (тыс. км).} \quad (35)$$

Покажем теперь, как полученные закономерности могут быть использованы для оценки показателей ремонтной технологичности и ремонтпригодности блока цилиндров проектируемого двигателя.

Пусть по данным конструкторской документации определено числовое значение комплексного показателя конструктивно-технологических особенностей блока цилиндров проектируемого двигателя  $K_{\text{кт}} = 1,79$ . Тогда, учитывая значение  $K_{\text{кт}}$  и используя зависимости (32) – (35), получим следующие прогнозные оценки наработки:

$$L_{\text{нб}} = 117,95 \cdot 1,79^{1,0745} = 220,5 \text{ (тыс. км);} \quad (36)$$

$$L_{\text{нд}} = 49,23 \cdot 1,79^{1,6800} = 130,9 \text{ (тыс. км);} \quad (37)$$

$$L_{\text{рб}} = 72,13 \cdot 1,79^{1,2250} = 147,2 \text{ (тыс. км);} \quad (38)$$

$$L_{\text{рд}} = 31,67 \cdot 1,79^{1,8736} = 94,3 \text{ (тыс. км).} \quad (39)$$

Для оценки показателя ремонтпригодности блока цилиндров проектную стоимость двигателя принимаем равной 2000 руб., а стоимость нового блока цилиндров –  $S_{\text{н}} = 240$  руб. (на основе допущения, что стоимость деталей двигателя пропорциональна их массе).

Стоимость ремонта блока цилиндров, а также стоимость сборочных работ определим, учитывая расчетные данные и опыт ремонта двигателей-аналогов:

$$S_{\text{р.ном}} = 95 \text{ руб.}; S_{\text{сб}} = 0,15 \cdot S_{\text{р.ном}} = 14,25 \text{ руб.}$$

Определим стоимость ремонта блока цилиндров, учитывая собственные показатели ремонтпригодности ( $k = k_{\text{крат}} = 0,368$ ,  $k_{\text{см}} = 1 - k = 0,632$ ,  $k_{\text{р}} = 1 - k_{\text{см}} = 0,368$ ):

$$S_{\text{р}} = k_{\text{см}} \cdot S_{\text{н}} + k_{\text{рем}} \cdot S_{\text{р.ном}} = 0,632 \cdot 240 + 0,368 \cdot 95 = 186,64 \text{ руб.} \quad (40)$$

С учетом (36) и (38) по формуле среднеквадратического отклонения получим оценки собственного показателя ремонтпригодности блока цилиндров проектируемого двигателя:

-  $r = 1$  – к началу первого межремонтного цикла (по блоку)

$$\Pi_{1\sigma} = \frac{0,368 \cdot 147,2}{(1 + 186,64/240) \cdot 220,5} = 0,138; \quad (41)$$

-  $r = 2$  – к началу второго межремонтного цикла (по блоку)

$$\Pi_{2\sigma} = \frac{0,368 \cdot 147,2}{(1 + 2 \cdot 186,64/240) \cdot 220,5} = 0,097. \quad (42)$$

Показатель ремонтпригодности блока цилиндров относительно двигателя ( $\Pi_{\text{рд}}$ ) определим, учитывая показатели ремонтпригодности и их значения:  $k = 0,99$ ,  $k_{\text{см}} = 0,01$ ,  $k_{\text{р}} = 0,685$ .

Стоимость ремонта блока цилиндров составит

$$S_{\text{р}} = k_{\text{см}} \cdot S_{\text{н}} + k_{\text{рем}} \cdot S_{\text{р.ном}} = 0,01 \cdot 240 + 0,685 \cdot 95 = 67,48 \text{ руб.} \quad (43)$$

С учетом (37) и (39) формула определения функции распределения дает оценку показателя ремонтпригодности блока цилиндров проектируемого двигателя:

-  $r=1$  – к началу первого межремонтного цикла (по двигателю)

$$P_{1д} = \frac{0,99 \cdot 94,3}{(1 + (67,48 + 14,25)/240) \cdot 130,9} = 0,532 ; \quad (44)$$

-  $r=2$  – к началу второго межремонтного цикла (по двигателю)

$$P_{2д} = \frac{0,97 \cdot 94,3}{(1 + 2 \cdot (67,48 + 14,25)/240) \cdot 130,9} = 0,416. \quad (45)$$

Полагая для блока цилиндров  $k_{пред} = 0,95$  (базовая деталь) и используя формулу (46) определения предельного показателя ремонтпригодности

$$P_{пред} = k_{пред} \frac{L_p}{(1 + \Pi_{л}^{кр} / S_n) L_n}, \quad (46)$$

получим

$$P_{пред} = 0,513 \cdot 0,95 = 0,487. \quad (47)$$

Из (44) – (47) следует, что блок цилиндров проектируемого двигателя может быть капитально отремонтирован вместе с двигателем только один раз. Повторный капитальный ремонт экономически нецелесообразен.

### Библиографический список

1. Авдеев М.В. Технология ремонта машин и оборудования (по спец. 1509 «Механизация сельского хозяйства» / М.В. Авдеев, Е.Л. Воловик, И.Е. Ульман. – Москва : Агропромиздат, 1986. – 248 с.
2. Авдонькин Ф.Н. Оптимизация изменения технического состояния автомобиля / Ф.Н. Авдонькин. – Москва : Транспорт, 1993. – 349 с.
3. Восстановление деталей автомобиля КАМАЗ / Р.А. Азаматов, В.Г. Дажин, А.Т. Кулаков, А.И. Модин ; под ред. В.Г. Дажина. – Набережные Челны : КАМАЗ, 1994. – 215 с.

4. Бондаренко Е.В. Методика размерного обоснования составных частей автомобильных двигателей при ремонте на основе обеспечения выходных параметров : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Е.В. Бондаренко. – Оренбург, 1996. – 127 с.
5. Григорьев М.А. Износ и долговечность автомобильных двигателей / М.А. Григорьев, Н.Н. Пономарев. – Москва : Машиностроение, 1976 – 246 с.
6. Денисов А.С. Основы формирования эксплуатационно-ремонтного цикла автомобилей / А.С. Денисов. – Саратов : СГТУ, 1999. – 352 с.
7. Дехтеринский Л.В. Оценка ремонтпригодности двигателей : учеб. пособие / Л.В. Дехтеринский, В.П. Апсин, С.Б. Норкин. – Москва : МАДИ, 1987. – 55 с.
8. Конструирование двигателей внутреннего сгорания : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» направления подготовки «Энергомашиностроение» / Н.Д. Чайнов, Н.А. Иващенко, А.Н. Краснокутский, Л.Л. Мягков ; под ред. Н.Д. Чайнова. – Москва : Машиностроение, 2008. – 494 с.
9. Малаховецкий А.Ф. Повышение надежности турбокомпрессоров автотракторных двигателей путем снижения их теплонапряженности : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / А.Ф. Малаховецкий. – Саратов, 2004. – 116 с.
10. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений / А.К. Митропольский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Наука, 1971. – 571 с.
11. Моделирование процессов восстановления машин / В.П. Апсин, Л.В. Дехтеринский, С.Б. Норкин, В.М. Приходько. – Москва : Транспорт, 1996.– 311 с.
12. Моисеев Н.Н. Численные методы в теории оптимальных систем / Н.Н. Моисеев. – Москва : Наука, 1971. – 424 с.
13. Молибошко Л.А. Компьютерное моделирование автомобилей : учеб. пособие для студентов специальности «Автомобилестроение» учреждений, обеспечивающих получение высшего образования / Л.А. Молибошко. – Минск : ИВЦ Минфина, 2007. – 280 с.
14. Обеспечение работоспособности турбокомпрессоров автотракторных двигателей : научное издание / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков, А.Р. Асоян, А.А. Коркин. – Саратов : СГТУ, 2012. – 155 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Павел Петрович Гамаюнов – доктор технических наук, профессор кафедры организации перевозок, безопасности движения и сервиса автомобилей ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов, e-mail: [gamaunovv@yandex.ru](mailto:gamaunovv@yandex.ru).

Абдул Гаджибалаевич Баламирзоев – доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» – Махачкалинский филиал; профессор кафедры информатики и вычислительной техники ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный педагогический университет», Россия, Махачкала, e-mail: [abdul2000@yandex.ru](mailto:abdul2000@yandex.ru).

Шамиль Магомедович Игитов – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» – Махачкалинский филиал, Россия, Махачкала, e-mail: [shamiligitov@yandex.ru](mailto:shamiligitov@yandex.ru).

Дата поступления в редакцию 19.09.2019

Дата принятия к печати 30.10.2019

### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Pavel P. Gamayunov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Transportation, Traffic Safety and Car Service Organization, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov, e-mail: [gamaunovv@yandex.ru](mailto:gamaunovv@yandex.ru).

Abdul G. Balamirzoev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Applied Mathematics, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) – Makhachkala Branch, Professor, the Dept. of Informatics and Computer Engineering, Dagestan State Pedagogical University, e-mail: [abdul2000@yandex.ru](mailto:abdul2000@yandex.ru).

Shamil M. Igitov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Road Transport, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) – Makhachkala Branch, Russia, Makhachkala, e-mail: [shamiligitov@yandex.ru](mailto:shamiligitov@yandex.ru).

Received September 19, 2019

Accepted after revision October 30, 2019