

МЕТОД РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОЖАРНЫХ АВТОЦИСТЕРН

Е. Г. Казутин¹, А. М. Гоман², А. С. Скороходов³

¹ К. т. н., профессор кафедры пожарной аварийно-спасательной техники Университета гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь, e-mail: evgeny_kazutin@tut.by

² К. т. н., доцент, начальник отдела динамического анализа и вибродиагностики машин НТЦ «Карьерная техника» Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: ark.goman@gmail.com

³ К. т. н., доцент, ведущий научный сотрудник отдела динамического анализа и вибродиагностики машин НТЦ «Карьерная техника» Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: skanst@yandex.ru

Реферат

Рассмотрены вопросы надежности и ресурса пожарных автоцистерн (далее – ПАЦ), показана актуальность оценки их остаточного ресурса при эксплуатации. Предложен метод расчета остаточного ресурса основных составных частей ПАЦ, учитывающий средневзвешенный расход их ресурсного потенциала и являющийся дальнейшим развитием разрабатываемого авторами подхода, основывающегося на учете факторов пробега и времени эксплуатации. Предлагаемый метод позволяет определять остаточный ресурс для ПАЦ в целом и дифференцированно учитывать расход ресурса всех ее основных частей, в том числе замененных во время эксплуатации. Приведены зависимости для определения расхода ресурса основных частей ПАЦ по пробегу и времени эксплуатации, критерии разделения ПАЦ на категории с учетом расхода их ресурса. Рассмотрен пример расчета остаточного ресурса пожарного автомобиля с цистерной емкостью 5000 л, эксплуатирующийся в Университете гражданской защиты (далее – УГЗ) МЧС Республики Беларусь. В целях обеспечения качества и оперативности обработки данных о состоянии имеющейся техники, а также подготовки необходимой информации для принятия решений по обеспечению подразделений материальными и финансовыми средствами, планирования ремонтов и списания, дается оценка состояния ПАЦ с учетом величины остаточного ресурса. В перспективе полученные данные могут быть использованы для планирования в Производственно-технических центрах МЧС фонда агрегатов, узлов и деталей для проведения ремонтных работ, с определением их номенклатуры, в зависимости от количества эксплуатируемых пожарных автомобилей.

Ключевые слова: пожарная автоцистерна, расход ресурса, остаточный ресурс, предельное состояние, пробег, время эксплуатации.

THE METHOD OF CALCULATING THE REMAINING RESOURCE OF FIRE TANK TRUCKS

E. G. Kazutin, A. M. Goman, A. S. Skorokhodov

Abstract

The issues of reliability and resource of fire tank trucks (hereinafter referred to as FTT) are considered, the relevance of assessing their residual resource during operation is shown. A method is proposed for calculating the remaining resource of the main components of FTT, which takes into account the weighted average consumption of their resource potential and is a further development of the approach developed by the authors, based on factors mileage and operating time. The proposed method makes it possible to determine the remaining resource for a FTT as a whole and to take into account the resource consumption of all its main parts, including those replaced during operation. Dependencies for determining the resource consumption of the main parts of the FTT by mileage and operating time, criteria for dividing FTT into categories, taking into account the consumption of their resource, are given. An example of calculating the residual resource of a fire truck with a tank capacity of 5,000 liters, operated at the University of Civil Protection (hereinafter referred to as UCP) of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, is considered. In order to ensure the quality and efficiency of data processing on the condition of existing equipment, as well as the preparation of the necessary information for decision-making on providing material and financial resources to the divisions, planning repairs and decommissioning, an assessment of the condition of a FTT is given, taking into account the remaining resource. In the future, the data obtained can be used for planning in the Production and Technical Centers of the Ministry of Emergency Situations of the fund of units, assemblies and parts, with the definition of their nomenclature, depending on the number of fire trucks in operation.

Keywords: fire tanker truck, resource consumption, residual resource, limit condition, mileage, operating time.

Введение

К пожарным автомобилям предъявляется ряд требований, изложенных в СТБ 11.13.24-2017 «Система стандартов пожарной безопасности. Автомобили пожарные основные. Общие технические требования. Методы испытаний» и ГОСТ 34350-2017 «Техника пожарная. Основные пожарные автомобили. Общие технические требования. Методы испытания». ПАЦ является наиболее распространенным типом пожарного автомобиля и должна обеспечивать высокую готовность, оперативность прибытия к месту вызова и эффективность подачи огнетушащих веществ. Поэтому для ПАЦ надежность является важнейшей характеристикой.

Согласно ГОСТ Р 27.102-2021 «Надежность в технике. Термины и определения», одним из составляющих элементов надежности является долговечность – «свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта». В свою очередь предельное состояние (далее – ПС) – это «состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно», а остаточный ресурс – «суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние». При этом прогнозирование остаточного ресурса включает в себя комплекс задач: оценку текущего состояния объекта и развития этого состояния на ближайшем будущем, выдачу на основе этого прогноза рекомендаций по предотвращению возможных отказов и выполнению корректирующих действий с целью продлить срок службы машины.

Таким образом, оценка остаточного ресурса ПАЦ является актуальной во время ее эксплуатации и после проведения ремонтных работ. Зная остаточный ресурс, технический персонал и ремонтные службы могут корректировать интервалы диагностики машин при обслуживании, планировать ремонты, заменять большие ремонты мелкими и т. д. Кроме того, при оценке остаточного ресурса серьезное внимание должно уделяться оптимизации затрат на устранение отказов, вызванных простоем техники, т. е. сокращению эксплуатационных расходов [1–3]. Следует также отметить, что для оценки ресурса ПАЦ

необходим подход, позволяющий спрогнозировать остаточный срок службы при минимуме имеющейся исходной информации [4, 5].

В статье [6] приведена методика оценки расхода ресурса ПАЦ, учитывающая специфические особенности ее практической эксплуатации, основывающаяся на учете факторов пробега и времени эксплуатации. Задачей данной работы является дальнейшее развитие разрабатываемого авторами подхода, обеспечивающего возможность без проведения разборки дифференцированно определять остаточный ресурс основных составных частей ПАЦ, учитывая средневзвешенный расход их ресурсного потенциала.

Прогнозирование остаточного ресурса

Согласно методическим указаниям РД 50-423-83 [7], номенклатура контролируемых параметров, которые определяют остаточный ресурс, устанавливается в отраслевой нормативно-технической документации. Для автомобилей (в том числе ПАЦ) естественной мерой остаточного ресурса служит пробег в километрах или продолжительность эксплуатации, измеряемая временным параметром [8–10]. Под прогнозированием понимают определение срока исправной работы автомобиля до возникновения ПС, обусловленного технической документацией [11].

В зависимости от требуемой достоверности прогноза и возможностей получения информации применяют два подхода к прогнозированию: упрощенный, основанный на детерминистических оценках показателей, и уточненный, основанный на вероятностных оценках [4].

Остаточный ресурс сложного объекта со многими составными частями, как правило, определяется вероятностным методом с помощью ряда логических условий, описывающих комбинации ПС основных составных частей [12, с. 115]. Прогнозирование остаточного ресурса узлов в этом случае обеспечивает их рациональное использование и замену только в случае крайней необходимости [13].

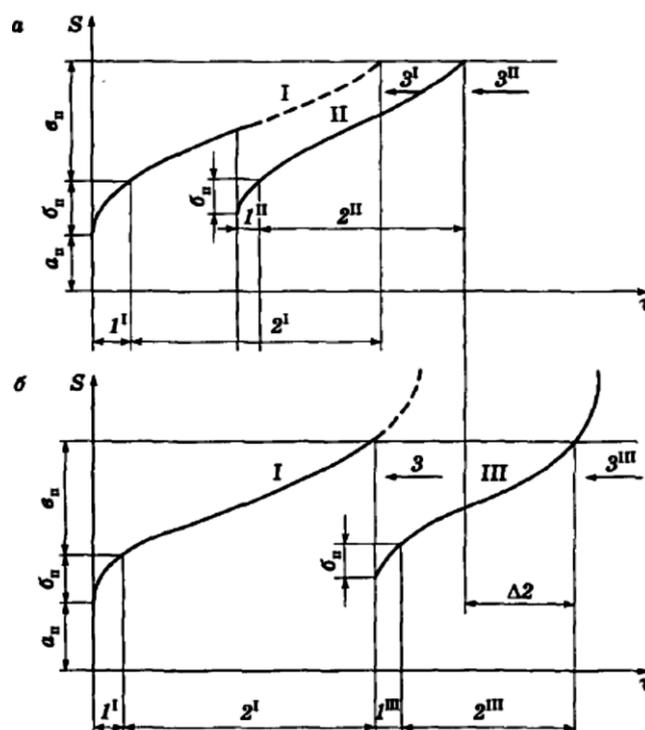
Однако вероятностно-статистические методы, применяемые для групповой оценки срока службы оборудования, малопригодны для индивидуальной оценки остаточного ресурса во время эксплуатации [5]. Достоверный индивидуальный прогноз долговечности конкретного механизма или агрегата этим методом получить сложно. Более приспособлены для индивидуальных прогнозов инженерные методы, информационной основой которых являются результаты мониторинга эксплуатационных параметров конкретного контролируемого объекта. Например, экстраполяционный метод прогнозирования [5].

Оценка остаточного ресурса (остаточного срока службы) пожарной аварийно-спасательной техники в Беларуси опирается на нормативный срок службы. При этом для конкретных ПАЦ, эксплуатируемых в пожарных частях, применяется планово-предупредительная система технического обслуживания, в рамках которой в некоторых случаях использование статистики невозможно (если изделие новое или единичное), что характерно для изделий, которые имеют ограниченный срок службы в силу быстрого функционального и морального старения (военной и специальной техники) [14].

Наиболее рациональным в данном случае является обслуживание машины по следующей схеме: определение потребности в техническом вмешательстве – проведение необходимых работ – контроль качества проведенных работ – исправление выявленных отклонений – испытание машины [15, с.19]. Однако обслуживание машины по такой рациональной схеме требует решения ряда организационно-технических задач: определения времени, места и объема работ по выявлению потребности в техническом вмешательстве и проведению его. Как видно из рисунка 1, несвоевременное техническое вмешательство в процесс эксплуатации приводит к сокращению срока работы машины. Оптимальным моментом технического вмешательства будет точка перехода эксплуатационного периода в аварийный, при этом будет использован весь ресурс.

На рисунке 2 показана функциональная зависимость расхода ресурса ПАЦ $P(\%)$ от времени эксплуатации t (ч), которую можно представить и как зависимость от пробега L (тыс. км). Период эксплуатации длится по времени до точки k (контроля технического состояния), где ПАЦ имеет определенный пробег L_k и расход ресурса P_k . Таким образом, можно прогнозировать работу по времени до точки c (наступления ПС), в которой ПАЦ будет иметь пробег L_c и расход ресурса P_c , это и будет остаточный ресурс работы ПАЦ.

ПАЦ достигает ПС в момент пересечения реализацией $P(t)$ уровня P_c , устанавливаемого нормативно-технической документацией. Фактические моменты достижения объектами этого состояния могут существенно различаться в зависимости от их индивидуальных свойств и условий эксплуатации [16].



а – при преждевременном (кривая II) техническом вмешательстве; б – при своевременном (кривая III) вмешательстве; t^I, t^{II}, t^{III} – приработка; $2^I, 2^{II}, 2^{III}$ – нормальная эксплуатация; $3^I, 3^{II}, 3^{III}$ – аварийный период; a_n – исходное состояние показателя (расхода ресурса, обусловленного предшествующим хранением либо неполным ремонтом); b_n и b_n – изменение показателя (расхода ресурса) за периоды приработки и нормальной эксплуатации

Рисунок 1 – Изменение показателя состояния машины (расхода ресурса) в процессе ее эксплуатации [15]



Рисунок 2 – Прогнозирование остаточного ресурса ПАЦ

Функциональная зависимость расхода ресурса позволяет вычислить срок службы ПАЦ. При оценке ресурса по функциональной зависимости наиболее распространенной является линейная аппроксимация. Однако в большинстве случаев линейную аппроксимацию можно считать лишь грубым приближением к описанию реальных процессов. В более общей форме деградационные процессы старения и износа описываются зависимостью полиномиального вида [17–18]:

$$X(t) = X_0 + c_1t + c_2t^2 + \dots + c_nt^n. \quad (1)$$

В этом случае оценка полного и остаточного ресурса при известных значениях коэффициентов c_i ($i = 1...n$) и n производится решением уравнения (1) при $X = X_{пр}$ [18]. Величина предельного значения $X_{пр}$ определяется по нормативно-технической документации или исходя из требований безопасности.

Определение остаточного ресурса ПАЦ

В работе [6] предлагается использовать для определения расхода ресурса ПАЦ расчетный метод, позволяющий судить об остаточном ресурсе автомобиля и его основных частей. Расход ресурса K_p основных частей ПАЦ определяется по выражению:

$$K_p = 1 - (1 - K_L) (1 - K_T), \quad (2)$$

где K_L – расход ресурса по пробегу в относительных единицах для любой из основных частей ПАЦ либо расход ресурса по накоплению циклической усталости в относительных единицах; K_T – расход ресурса по возрасту в относительных единицах для любой из основных частей ПАЦ либо расход ресурса по коррозионно-механическому износу в относительных единицах.

Зависимости для определения расхода ресурса основных частей ПАЦ по пробегу и времени эксплуатации (K_L и K_T) приведены в работе [6].

Для определения остаточного ресурса можно использовать следующую последовательность действий [4, 5]:

- 1) через определенные периоды эксплуатации t_1, t_2, \dots и т. д. определяется расчетным путем расход ресурса основных частей ПАЦ по пробегу и времени эксплуатации;
- 2) производится аппроксимация временного ряда с целью выявления детерминированного закона изменения параметра во времени [5];
- 3) зависимость экстраполируется до предельно допустимой величины расхода ресурса [4].

Такой метод позволяет получить достаточно точные инженерные оценки остаточного ресурса как разницу между значением пробега/наработки в момент перехода в ПС и их текущим значением.

Пример определения остаточного ресурса ПАЦ

Срок службы АЦ-5,0-40 (модель 5309) с емкостью цистерны 5000 л, эксплуатируемой в учебной пожарной аварийно-спасательной части (далее – УПАСЧ) УГЗ (рисунок 3), составляет 10 полных лет. Фактический пробег – 50 тыс. км. Фактическая наработка в стационарном режиме – 300 ч. Общая масса рассматриваемых основных частей ПАЦ m_0 составляет 5165 кг. Нормативный пробег каждой основной части до капитального ремонта (K_P) L_n принят по значению пробега до K_P для ПАЦ на шасси МАЗ – 200 тыс. км [19]. В ПАЦ кузов выполняется в виде пожарной надстройки. Эксплуатируется ПАЦ в г. Минске на дорогах с асфальтобетонным покрытием.

Таблица 2 – Определение расхода ресурса АЦ-5,0-40 (модель 5309)

Основная часть	Нормативный пробег до КР или списания L_n , тыс. км	Фактический пробег L , тыс. км	Относительный пробег $L_{отн} = 100 \cdot L/L_n$, %	Срок службы, T , лет	Расход ресурса основной части K_p , %	Расход ресурса основной части, прошедшей КР, $K_{p-1,2}$, %	Масса основной части m , кг	Удельный показатель $\xi_{ф.}$, %	Расход ресурса ПАЦ $K_{ПАЦ}$, %
Кабина	200	50	25	10	77,4	–	420	8,1	58,6
Кузов	200	50	25	10	77,4	–	770	14,9	
Рама	200	50	25	10	60,9	–	650	12,6	
Двигатель	200	30	15	3	26	31,2	640	12,4	
Коробка передач	200	50	25	10	47,2	–	350	6,8	
Раздаточная коробка	200	50	25	10	47,2	–	320	6,2	
Передний мост	200	50	25	10	54,6	–	670	13	
Задний мост	200	25	12,5	5	32,1	38,5	650	12,6	
Цистерна	200	50	25	10	86,1	–	630	12,2	
Пожарный насос	200	50	25	10	56,9	–	65	1,2	



Рисунок 3 – Автоцистерна АЦ-5,0-40 (модель 5309), эксплуатируемая в УПАСЧ УГЗ

Сведения о замене отдельных основных частей ПАЦ приведены в таблице 1. Для двигателя, установленного после КР, учтена фактическая наработка при пробеге и наработка в стационарном режиме, связанном с приводом пожарного насоса. Для заднего моста учтен пробег после замены. При определении наработки основных частей ПАЦ в стационарных режимах 1 ч работы соответствует пробегу 50 км [19].

Таблица 1 – Сведения о замене основных частей АЦ-5,0-40 (модель 5309)

Показатель	Основная часть, пробег (тыс. км) и наработка в стационарном режиме (часы) после установки	
	двигатель, 15 тыс. км, 300 ч	задний мост, 25 тыс. км
Пробег после установки, тыс. км	30	25
Срок службы после установки, лет	3	5

Результаты определения расхода ресурса АЦ-5,0-40 (5309) для 10 лет службы приведены в таблице 2.

Данные по остаточному ресурсу АЦ-5,0-40 (5309) и ее основных частей – за 10 лет с несколькими контрольными точками сведены в таблицу 3. Остаточный ресурс определяется как разница между значением ресурса объекта при достижении ПС (90 %) и текущим значением расхода ресурса.

Таблица 3 – Определение остаточного ресурса АЦ-5,0-40 (модель 5309)

Основная часть	Срок службы					
	1 год		5 лет		10 лет	
	Расход ресурса $K_P, \%$	Остаточный ресурс $K_O, \%$	Расход ресурса $K_P, \%$	Остаточный ресурс $K_O, \%$	Расход ресурса $K_P, \%$	Остаточный ресурс $K_O, \%$
1	2	3	4	5	6	7
Автомобиль	9,9	80,1	36,7	53,3	58,6	31,4
Кабина	14	76	52,7	37,3	77,4	12,6
Кузов	14	76	52,7	37,3	77,4	12,6
Рама	8,7	81,3	37	53	60,9	29,1
Двигатель	9,2	80,8	40	50	31,2	58,8
Коробка передач	5,9	84,1	26,8	63,2	47,2	42,8
Раздаточная коробка	5,9	84,1	26,8	63,2	47,2	42,8
Передний мост	7,3	82,7	32,1	57,9	54,6	35,4
Задний мост	7,3	82,7	0	90	38,5	51,5
Цистерна	14,3	75,7	56,6	33,4	86,1	3,9
Пожарный насос	7,7	82,3	33,7	56,3	56,9	33,1

Остаточный ресурс обычно оценивают в процентном соотношении: 100 % – ресурс нового ПАЦ; 0 % – ресурс ПАЦ, полностью исчерпавшего ресурс использования.

В СТБ 11.13.24-2017 и ГОСТ 34350-2017 определено, что полный средний срок службы до списания для новых ПАЦ установлен не менее 10 лет с момента ввода в эксплуатацию, однако предлагаемый метод позволяет продлить их использование. Связано это с тем, что остаточный ресурс оборудование может иметь не только до истечения расчетного срока службы, но и после него [5]. Это обусловлено действующими нормами и правилами расчета сроков службы оборудования, предусматривающими обеспечение прочности и износостойкости изделий при наиболее неблагоприятных режимах нагружения в заданных условиях эксплуатации, а также при минимальных уровнях механических характеристик конструкционных материалов, обеспечиваемых по государственным стандартам. Фактические режимы нагружения при соблюдении правил эксплуатации оказываются, как правило, менее напряженными, чем расчетные, что снижает интенсивность расходования заложенных запасов (по прочности, износо- и коррозионной стойкости) и обеспечивает резерв по остаточному ресурсу оборудования [5].

В зависимости от технического состояния, а также выработки (расхода) ресурса ПАЦ в работе [20] предложено разделение пожарных автоцистерн на категории с учетом расхода их ресурса:

I – новая, исправная, не бывшая в использовании, в пределах гарантийных сроков использования (хранения), с расходом ресурса менее 20 %;

II – исправная, находившаяся в использовании (на хранении), а также прошедшая капитальный ремонт, с расходом ресурса от 20 до 50 %;

III – неисправная, по техническому состоянию требующая проведения текущего ремонта, с расходом ресурса от 50 до 70 %;

IV – неисправная, выработавшая установленные сроки эксплуатации и требующая по своему техническому состоянию проведения капитального ремонта, с расходом ресурса от 70 до 90 %;

V – неисправная, выработавшая установленные сроки эксплуатации, восстановление которой технически невозможно или экономически нецелесообразно, с расходом ресурса более 90 %.

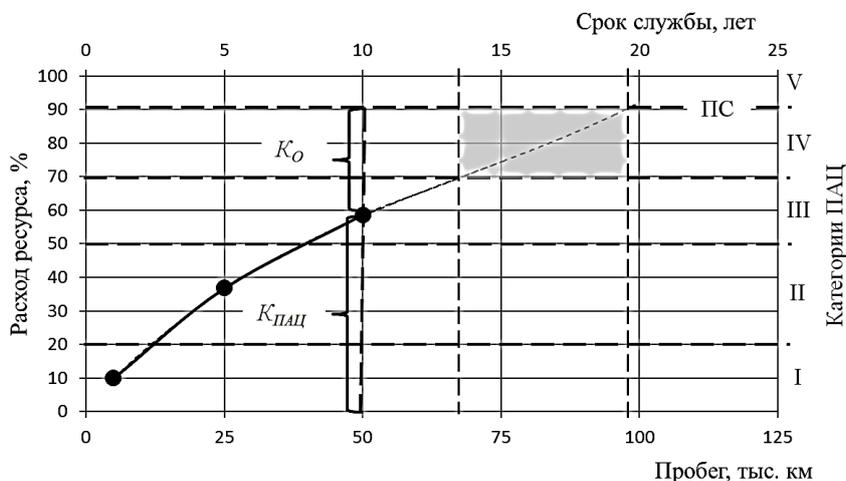
На основании полученных данных (таблица 4) определен расход ресурса эксплуатируемой в УПАСЧ УГЗ АЦ-5,0-40 (5309) (рисунок 4), при этом после 10 лет использования ПАЦ находится в III категории (неисправная, по техническому состоянию требующая проведение текущего ремонта).

Графики расхода ресурса ПАЦ аппроксимируются зависимостями: от наработки $y = 0,0097x^3 - 0,413x^2 + 8,8771x + 1,4262$;

от пробега $y = 8E-05x^3 - 0,0165x^2 + 1,7754x + 1,4262$.

Прогнозирование остаточного ресурса показывает, что: до перехода в IV категорию по наработке $\approx 3,4$ года; до перехода в IV категорию по пробегу $\approx 17,0$ тыс. км; до наступления ПС по наработке $\approx 9,36$ года; до наступления ПС по пробегу $\approx 46,8$ тыс. км.

Результаты определения расхода ресурса некоторых характерных основных частей (задний мост, коробка передач, цистерна) АЦ-5,0-40 (5309), эксплуатируемой в УПАСЧ УГЗ, проиллюстрированы на рисунке 5. Задний мост и коробка передач имеют расход ресурса менее 50 % и, как показывает прогноз, могут еще длительное время эксплуатироваться. В то же время цистерна после 10 лет использования практически достигла своего ПС и требует проведения ремонта или замены.



ПС – предельное состояние ПАЦ (расход ресурса 90 %); K_O – остаточный ресурс ПАЦ (%); $K_{ПАЦ}$ – расход ресурса ПАЦ (%)

Рисунок 4 – Ресурс АЦ-5,0-40 (модель 5309) и его составляющие

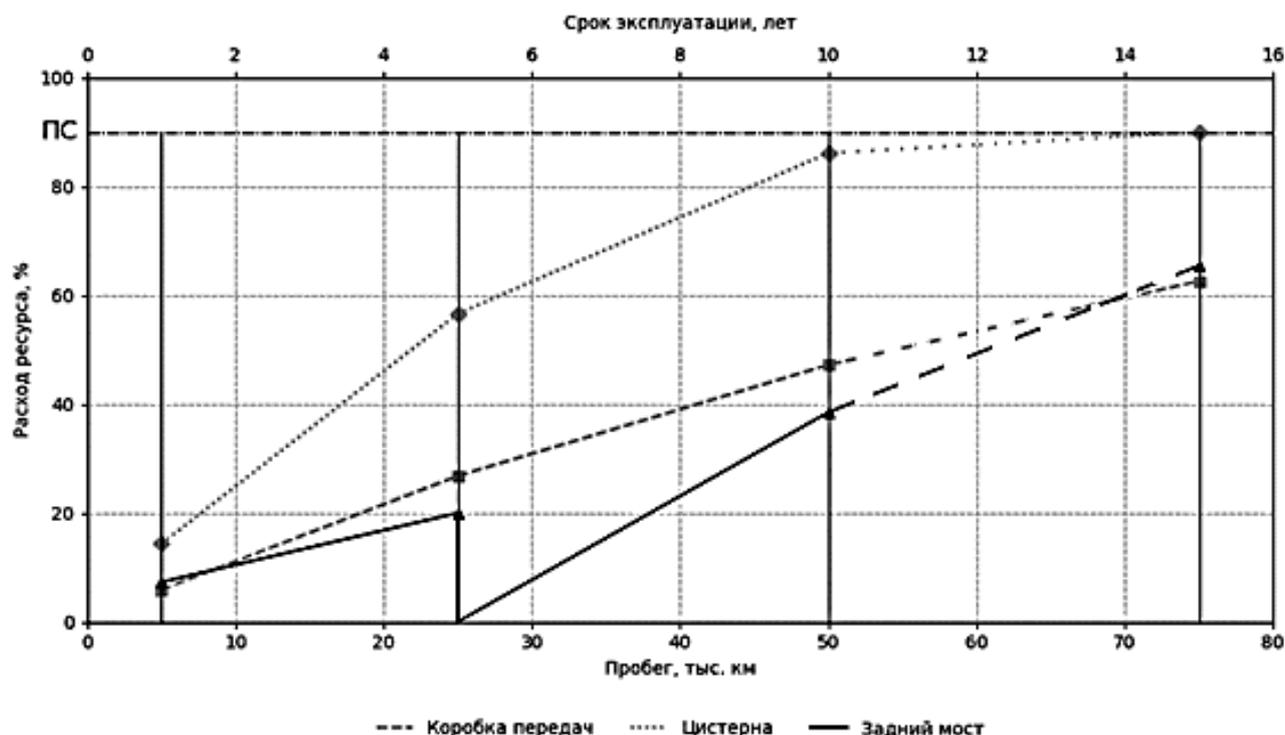


Рисунок 5 – Расход ресурса основных частей АЦ-5,0-40 (модель 5309)

Заключение

Предложен метод оценки остаточного ресурса ПАЦ с учетом расхода ресурса ее основных частей, учитывающий износ под воздействием факторов пробега и времени эксплуатации. Особенностью рассмотренного подхода является применение различных по виду и параметрам законов, описывающих воздействие нагружающих факторов и времени эксплуатации на расход ресурса основных составных частей ПАЦ.

Предлагаемый метод позволяет определять остаточный срок службы или остаточный пробег для ПАЦ в целом и дифференцированно учитывать расход ресурса всех ее основных частей, в том числе замененных во время эксплуатации, с учетом их пробега и работы в стационарном режиме. Это дает возможность устанавливать периодичность проведения ремонтов и технического обслуживания ПАЦ и тем самым влиять на его показатели надежности.

Приведен пример расчета с использованием разработанного метода остаточного ресурса образца АЦ-5,0-40 (5309) с емкостью цистерны 5000 л, эксплуатируемой в УПАСЧ УГЗ. Расчет показал, что при пробеге 50 тыс. км (срок службы 10 лет) ПАЦ выработала полный средний срок службы до списания согласно нормативной документации, однако ее эксплуатация может быть продлена, т. к. расход ресурса ПАЦ составляет 58,6 %, что позволяет отнести ее к III категории – неисправная, по техническому состоянию требующая проведения текущего ремонта. Задний мост и коробка передач имеют расход ресурса менее 50 % и могут еще длительное время эксплуатироваться. Цистерна приближается к своему ПС, требуя проведения ремонта или замены.

В настоящее время предлагаемый метод оценки остаточного ресурса ПАЦ используется в учебном процессе ГУО «Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь» при изучении учебной дисциплины «Пожарная аварийно-спасательная техника», а также проходит апробацию в УПАСЧ УГЗ.

Список цитированных источников

1. Дубровин, В. И. Методы оценки остаточного ресурса изделий (обзор) / В. И. Дубровин, В. А. Клименко // Математичні машини і системи. – 2010. – № 4. – С. 162–168.
2. Nagy, J. Predictive maintenance and predictive repair of road vehicles—opportunities, limitations and practical applications / J. Nagy, I. Lakatos // Engineering Proceedings. – 2024. – DOI: 10.1007/s10010-020-00415-0.

3. Vietze, D. Method for a cloud based remaining-service-life-prediction for vehicle-gearboxes based on big-data-analysis and machine learning / D. Vietze, M. Hein, K. Stahl // Forsch Ingenieurwes. – 2020. – DOI: 10.3390/engproc2024079027.
4. Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации: РД 26.260.004-91. – М.: НИИХИММАШ, 1992. – 50 с.
5. Равин, А. А. Инженерные методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования / А. А. Равин, О. В. Хруцкий // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2018. – № 1. – С. 33–47. – DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-33-47.
6. Методика оценки расхода ресурса пожарных автоцистерн / Е. Г. Казутин, А. В. Коваленко, А. М. Гоман, А. С. Скороходов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2024. – № 3 (68). – С. 63–70.
7. Методические указания. Надежность в технике. Методика прогнозирования остаточного ресурса машин и деталей, подверженных изнашиванию: РД 50-423-83. – М., 1984. – 38 с. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=2033945> (дата обращения: 25.03.2025).
8. Дубов, А. А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования / А. А. Дубов // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – № 3. – С. 46–49.
9. Шевнин, В. М. Методы оценки остаточного ресурса металлических конструкций грузоподъемных кранов, отработавших нормативный срок службы / В. М. Шевнин, Ю. М. Гофман // Подъемные сооружения и спец. техника. – 2001. – № 2. – С. 25–26.
10. Зудов, Г. Ю. Методика расчета остаточного срока службы автомобиля / Г. Ю. Зудов, А. М. Ишков, А. И. Левин // Вестник ИрГТУ. – 2014. – № 12 (95). – С. 161–165.
11. Жданко, Д. А. Прогнозирование остаточного ресурса мобильных энергетических средств : учебное пособие / Д. А. Жданко, В. Е. Тарасенко, Т. А. Непарко. – Минск : БГАТУ, 2022. – 280 с.
12. Волков, Д. Н. Надежность строительных машин и оборудования / Д. Н. Волков, С. Н. Николаев. – М.: Высш. школа, 1979. – 400 с.

13. Kumar, A. Visual Defect Identification and Prediction of Remaining Useful Lifefor Automobile Components / A. Kumar, D. Gupta, R. P. Singh // 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Kamand, India, 2024. – DOI: 10.1109/ICCCNT61001.2024.10725095.
 14. Андриян, К. Э. Анализ и планирование технического обслуживания и ремонта сложного объекта на основе его функционального состояния / К. Э. Андриян, Д. А. Курсин // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2011. – № 8. – С. 11.
 15. Диагностирование автомобилей. Практикум : учеб. пособие / А. Н. Карташев, В. А. Белоусов, А. А. Рудашко, А. В. Новиков ; под ред. А. Н. Карташевича. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2011. – 208 с.
 16. Баженов, Ю. В. Прогнозирование остаточного ресурса конструктивных элементов автомобилей в условиях эксплуатации // Ю. В. Баженов, М. Ю. Баженов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 4. – С. 16–21.
 17. Окладникова, Е. Н. Вероятностная оценка ресурса узлов трения износа / Е. Н. Окладникова, Е. В. Сугак // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. – 2005. – № 3. – С. 148–152.
 18. Сугак, Е. В. Надежность технических систем : лаб. практикум / Е. В. Сугак. – Красноярск : СибГАУ, 2004. – 141 с.
 19. Правила организации технической службы в органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь : приказ МЧС Республики Беларусь от 15 апр. 2024 г., № 165. – Минск, 2024. – 269 с.
 20. Казутин, Е. Г. Категорирование пожарных автоцистерн с учетом расхода их ресурса / Е. Г. Казутин, А. С. Скороходов // Актуальные вопросы машиноведения. – Минск, 2024. – Вып. 13. – С. 205–209.
 7. Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost' v tekhnike. Metodika prognozirovaniya ostatochnogo resursa mashin i detalej, podverzhennyh iznashivaniyu: RD 50-423-83. – М., 1984. – 38 s. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=2033945> (data obrashcheniya: 25.03.2025).
 8. Dubov, A. A. Problemy ocenki ostatochnogo resursa stareyushchego oborudovaniya / A. A. Dubov // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. – 2003. – № 3. – С. 46–49.
 9. Shevnin, V. M. Metody ocenki ostatochnogo resursa metallicheskih konstrukcij gruzopod'emnyh kranov, otrabotavshih normativnyj srok sluzhby / V. M. Shevnin, YU. M. Gofman // Pod'emnye sooruzheniya i spec. tekhnika. – 2001. – № 2. – С. 25–26.
 10. Zudov, G. YU. Metodika rascheta ostatochnogo sroka sluzhby avtomobilya / G. YU. Zudov, A. M. Ishkov, A. I. Levin // Vestnik IrGTU. – 2014. – № 12 (95). – С. 161–165.
 11. Zhdanko, D. A. Prognozirovanie ostatochnogo resursa mobil'nyh energeticheskikh sredstv : uchebnoe posobie / D. A. Zhdanko, V. E. Tarasenko, T. A. Neparko. – Minsk : BGATU, 2022. – 280 s.
 12. Volkov, D. N. Nadezhnost' stroitel'nyh mashin i oborudovaniya / D. N. Volkov, S. N. Nikolaev. – М. : Vyssh. shkola, 1979. – 400 s.
 13. Kumar, A. Visual Defect Identification and Prediction of Remaining Useful Lifefor Automobile Components / A. Kumar, D. Gupta, R. P. Singh // 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Kamand, India, 2024. – DOI: 10.1109/ICCCNT61001.2024.10725095.
 14. Andriyan, K. E. Analiz i planirovanie tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta slozhnogo ob'ekta na osnove ego funkcional'nogo sostoyaniya / K. E. Andriyan, D. A. Kursin // Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. E. Bauman. – 2011. – № 8. – С. 11.
 15. Diagnostirovanie avtomobilej. Praktikum : ucheb. posobie / A. N. Kartashevich, V. A. Belousov, A. A. Rudashko, A. V. Novikov ; pod red. A. N. Kartashevicha. – Minsk : Novoe znanie ; М. : INFRA-М, 2011. – 208 s.
 16. Bazhenov, YU. V. Prognozirovanie ostatochnogo resursa konstruktivnyh elementov avtomobilej v usloviyah ekspluatatsii // YU. V. Bazhenov, M. YU. Bazhenov // Fundamental'nye issledovaniya. – 2015. – № 4. – С. 16–21.
 17. Okladnikova, E. N. Veroyatnostnaya ocenka resursa uzlov treniya iznosa / E. N. Okladnikova, E. V. Sugak // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aekokosmicheskogo universiteta im. akademika M. F. Reshetneva. – 2005. – № 3. – С. 148–152.
 18. Sugak, E. V. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem : lab. praktikum / E. V. Sugak. – Krasnoyarsk : SibGAU, 2004. – 141 s.
 19. Pravila organizatsii tekhnicheskoy sluzhby v organah i podrazdeleniyah po chrezvychajnym situatsiyam Respubliki Belarus' : prikaz MCHS Respubliki Belarus' ot 15 apr. 2024 g., № 165. – Minsk, 2024. – 269 s.
 20. Kazutin, E. G. Kategorirovanie pozhamykh avtocistem s uchetom rashkoda ih resursa / E. G. Kazutin, A. S. Skorohodov // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya. – Minsk, 2024. – Vyp. 13. – С. 205–209.
- References**
1. Dubrovin, V. I. Metody ocenki ostatochnogo resursa izdelij (obzor) / V. I. Dubrovin, V. A. Klimenko // Matematichni mashini i sistemi. – 2010. – № 4. – С. 162–168.
 2. Nagy, J. Predictive maintenance and predictive repair of road vehicles—opportunities, limitations and practical applications / J. Nagy, I. Lakatos // Engineering Proceedings. – 2024. – DOI: 10.1007/s10010-020-00415-0.
 3. Vietze, D. Method for a cloud based remaining-service-life-prediction for vehicle-gearboxes based on big-data-analysis and machine learning / D. Vietze, M. Hein, K. Stahl // Forsch Ingenieurwes. – 2020. – DOI: 10.3390/engproc2024079027.
 4. Metodicheskie ukazaniya. Prognozirovanie ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmeneniyu parametrov ego tekhnicheskogo sostoyaniya pri ekspluatatsii: RD 26.260.004-91. – М. : NIИИММASH, 1992. – 50 s.
 5. Ravin, A. A. Inzhenernyye metody prognozirovaniya ostatochnogo resursa oborudovaniya / A. A. Ravin, O. V. Hruckij // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2018. – № 1. – С. 33–47. – DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-33-47.
 6. Metodika ocenki rashkoda resursa pozhamykh avtocistem / E. G. Kazutin, A. V. Kovalenko, A. M. Goman, A. S. Skorohodov // Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov. – 2024. – № 3 (68). – С. 63–70.

Материал поступил 16.05.2025, одобрен 20.06.2025, принят к публикации 20.06.2025