

УДК 629.3.083.+629.33

**А. П. Поляков, д. т. н., проф.; Е. М. Плахотник; В. И. Нагачевский, адъюнкт;
Н. С. Гречанюк**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПОДДЕРЖКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ДИЗЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Определены параметры математической модели процесса поддержки работоспособности системы питания дизелей автомобилей во время эксплуатации, на основе статистических данных получены зависимости параметра потока отказов от наработки и срока эксплуатации и обосновано закон распределения вероятности безотказной работы системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320.

Ключевые слова: система технического обслуживания и ремонта, работоспособность, надежность, параметр потока отказов, вероятность безотказной работы.

Введение

Система технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) занимает важное место в концепции управления качеством автомобилей, в частности в поддержке работоспособности в процессе выполнения транспортной работы. Так, в совокупном реализованном показателе качества автомобиля, который приходится на сферу эксплуатации, вес фактора – «Система и организация ТО и Р» составляет 25%. Это определяет важность проведения научно-исследовательских и практических работ по усовершенствованию системы ТО и Р [1].

Существующие методики поддержки работоспособности автомобиля [2 – 6] в основном направлены на усовершенствование системы диагностического и информационного обеспечения проведения ТО и Р, что позволит перейти от стратегии планового обслуживания к обслуживанию за состоянием, которая бесспорно является значительно более эффективной. Однако сфера производства всегда будет содержать часть автомобилей, которые будут оснащены только самыми необходимыми приборами встроенной диагностики и соответственно будут более доступными. Это касается и морально устаревших автомобилей отечественного, в большинстве, и иностранного производства. Ведь, как известно, средний возраст автомобилей, которые эксплуатируются в Украине, составляет 10 – 12 лет.

Поддержка работоспособности таких автомобилей во время эксплуатации требует поиска других подходов, в частности за счет учета дополнительных факторов, которые существенно влияют на изменение технического состояния автомобиля. Это позволит определять более оптимальные периодичности проведения и перечни работ ТО.

Как показали результаты предыдущего исследования: наряду с наработкой на работоспособность автомобиля влияет и срок его эксплуатации. Обычно в литературе данные факторы не разграничивают, однако с точки зрения организации ТО разница между календарным временем и длительностью использования автомобиля по назначению имеет существенное значение [7].

И все же на сегодняшний день отсутствуют исследования влияния на техническое состояние автомобиля наряду с наработкой – срока его эксплуатации, в частности действующая система ТО и Р недостаточно учитывает одновременное влияние данных факторов.

Методика поддержки работоспособности автомобиля во время эксплуатации, которая

учла все перечисленные недостатки, разработана и детально описана в работах [8, 9].

Целью разработанной методики поддержки работоспособности системы питания дизелей автомобилей является предупреждение отказов путем определения оптимальной периодичности проведения и перечней операций ТО наименее надежных элементов системы. Для достижения такой цели был разработан алгоритм [9], который предусматривает выполнение ряда логических условий, решения алгебраических уравнений и формул, и в сущности является математической моделью поддержки работоспособности системы питания дизелей автомобилей.

Данная математическая модель является апостериорной, поскольку конечный результат достигается при расчете входных данных по аналитическим зависимостям (формулами и законами распределения), которые получены в результате обработки и анализа экспериментальных данных.

Следовательно функционирование математической модели поддержки работоспособности системы питания дизелей автомобилей возможно при наличии апостериорных параметров, получение которых на основе обработки статистической информации по отказам системы питания автомобилей КамАЗ-5320 и является целью данной работы.

К таким параметрам, согласно разработанной методике, принадлежат:

- зависимость параметра потока отказов системы питания дизелей автомобилей от наработки и срока эксплуатации автомобиля;
- закон распределения вероятности безотказной работы;
- перечни операций ТО системы питания дизелей автомобилей и группировки их по видам.

Исходной информацией для определения данных параметров служат статистические данные об отказах системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320.

Сбор статистических данных по отказам системы питания автомобилей КамАЗ-5320 осуществлялся на ОАО «Винницкое автотранспортное предприятие АТП 10554» и предприятию «AUTODIN», которое занимается диагностикой и ремонтом дизельно-топливной аппаратуры, в том числе и автомобилей КамАЗ-5320.

Для получения зависимостей изменения параметра потока отказов от наработки и срока эксплуатации автомобилей собирались следующие статистические данные: дата выпуска автомобиля КамАЗ-5320, дата обслуживания (или ремонта), наработка автомобиля на момент обслуживания (или ремонта) и характеристика отказа системы питания.

Весь период эксплуатации автомобилей был разделен на группы эксплуатации: по сроку эксплуатации – от 0 до 7, от 7 до 14 и от 14 до 21 года пребывания в эксплуатации; по наработке – от 0 до 50 000 км, от 50 000 до 100 000 км и т. д. до 350 000 км, что в результате составляет $3 \times 7 = 21$ эксплуатационную группу автомобилей.

Следующим шагом, после сбора статистической информации, является расчет параметров потока отказов системы питания автомобилей для каждой эксплуатационной группы по наработке и сроку пребывания в эксплуатации.

$$\omega(L) = \frac{\sum_{i=1}^n r_i(L)}{n \cdot L}, \left[\frac{1}{\text{км}} \right] \quad (1)$$

где n – количество автомобилей в исследуемой группе; $r_i(L)$ – количество отказов i -ого автомобиля, которые произошли в интервале наработки величиной L .

Рассчитанные по статистической формуле (1) значения параметров потока отказов позволили получить графические зависимости, представленные на рис. 1.

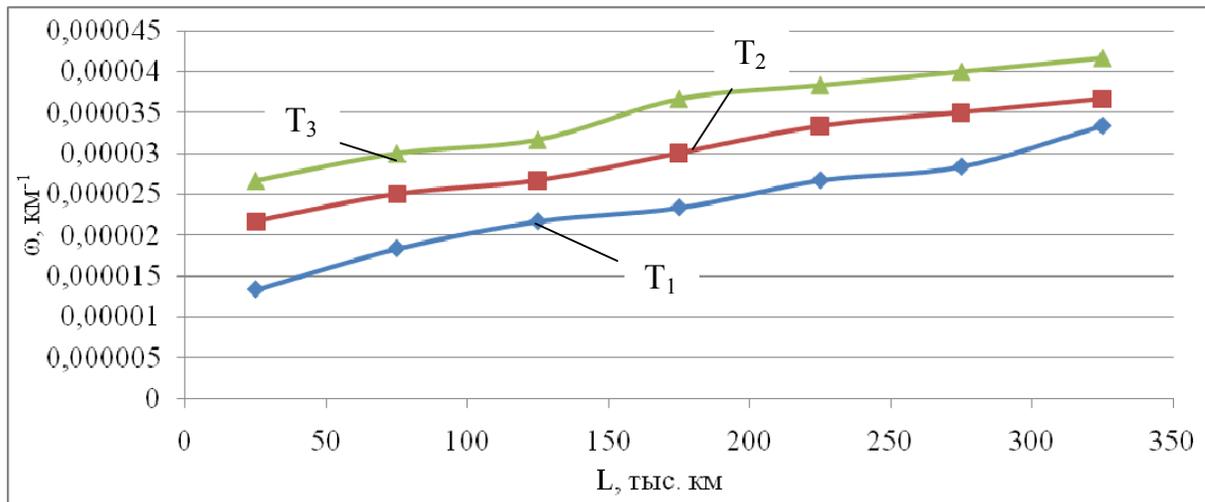


Рис. 1. Графические зависимости параметра потока отказов системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320 ω от наработки L и срока пребывания автомобилей в эксплуатации T : T_1 – до 7 лет эксплуатации; T_2 – от 7 до 14 лет эксплуатации; T_3 – от 14 до 21 года эксплуатации

Определение аналитической зависимости изменения параметра потока отказов системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320 от наработки и срока их эксплуатации

Для получения аналитического выражения зависимости параметра потока отказов системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320 от наработки L и срока пребывания автомобилей в эксплуатации T необходимо аппроксимировать полученные на основе статистических данных об отказах зависимости параметра потока отказов.

Составление двухфакторного уравнения $\omega = f(L, T)$ совершалось путем последовательной аппроксимации [12]. На первом этапе аппроксимировались графические зависимости параметра потока отказов от наработки $\omega = f(L)$ рис. 2.

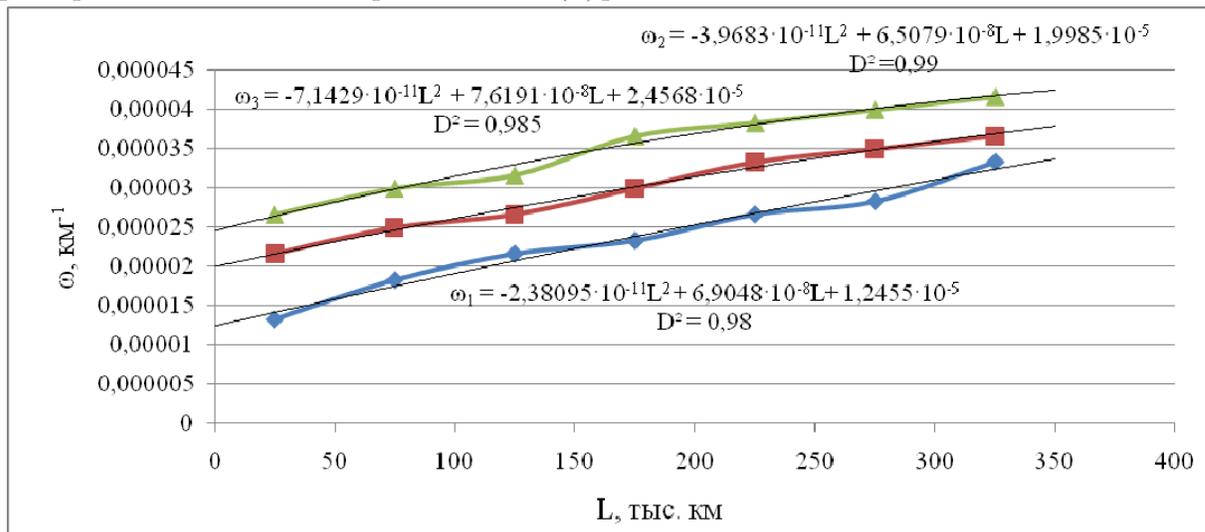


Рис. 2. Аппроксимирующие кривые зависимости параметра потока отказов системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320 ω от наработки L и срока пребывания автомобилей в эксплуатации T : T_1 – до 7 лет эксплуатации; T_2 – от 7 до 14 лет эксплуатации; T_3 – от 14 до 21 года эксплуатации. D^2 – величина, которая характеризует достоверность аппроксимации

Полученные при этом численные значения коэффициентов уравнений аппроксимации зависимости параметра потока отказов системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320

от срока пребывания автомобилей в эксплуатации приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты уравнений аппроксимации зависимости параметра потока отказов системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320

Срок эксплуатации автомобилей, лет	Коэффициенты		
	$a_0, \frac{1}{\text{км}}$	$a_1, \frac{1}{\text{км}^2}$	$a_2, \frac{1}{\text{км}^3}$
От 0 до 7	$1,2455 \cdot 10^{-5}$	$6,9048 \cdot 10^{-8}$	$-2,381 \cdot 10^{-11}$
От 7 до 14	$1,9985 \cdot 10^{-5}$	$6,5079 \cdot 10^{-8}$	$-3,9683 \cdot 10^{-11}$
От 14 до 21	$2,4568 \cdot 10^{-5}$	$7,6191 \cdot 10^{-8}$	$-7,1429 \cdot 10^{-11}$

На втором этапе за численными значениями коэффициентов уравнений аппроксимации α_k строятся их графические зависимости от срока пребывания автомобилей в эксплуатации T (рис. 3).

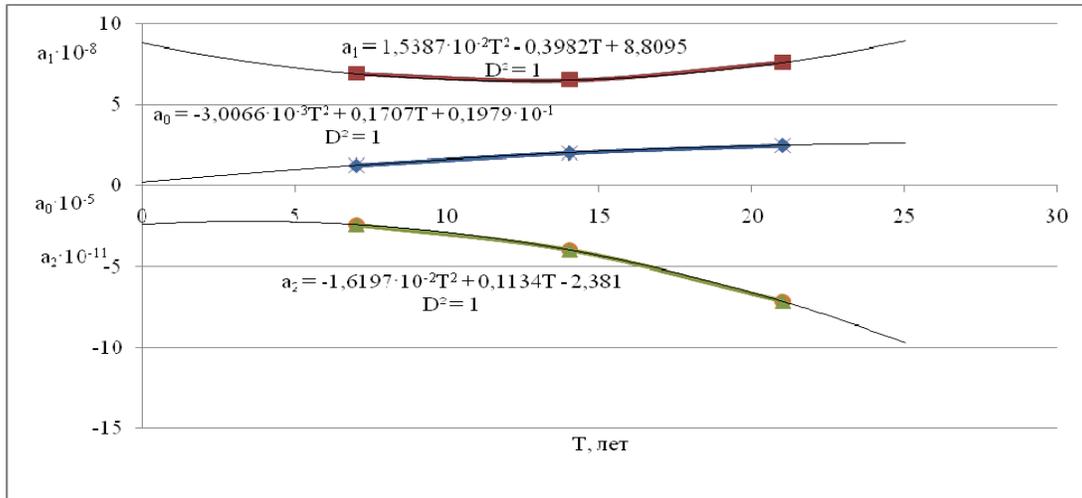


Рис. 3. Зависимости коэффициентов $a_k = f_k(T)$ уравнений аппроксимации зависимости параметра потока отказов системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320 от срока пребывания автомобилей в эксплуатации T

Методом наименьших квадратов графические зависимости аппроксимируются уравнениями 2-ого порядка:

$$a_m = (b_{0m} + b_{1m} T + b_{2m} \cdot T^2) \cdot k_m, \tag{2}$$

где k_m – размерный коэффициент: $k_0 = 1, [\frac{1}{\text{км}}]$; $k_1 = 1, [\frac{1}{\text{км}^2}]$; $k_2 = 1, [\frac{1}{\text{км}^3}]$.

Постоянные коэффициенты уравнений аппроксимации b_{0m} – являются безразмерными величинами, размерность постоянных коэффициентов уравнений аппроксимации b_{1m} и b_{2m} – $\frac{1}{\text{год}}$ и $\frac{1}{\text{год}^2}$.

На третьем этапе составляется общая аналитическая зависимость параметра потока отказов ω автомобиля от наработки L и срока пребывания в эксплуатации T :

$$\omega = \alpha_0(f_0(T)) + \alpha_1(f_1(T)) \cdot L + \dots + \alpha_m(f_m(T)) \cdot L^m, \left[\frac{1}{\text{км}} \right] \quad (3)$$

где $\alpha_m = f_m(T)$ – аналитические зависимости коэффициентов уравнений аппроксимации от срока эксплуатации автомобиля; m – степень уравнения аппроксимации.

Зависимости коэффициентов $a_m = f_m(T)$ уравнений аппроксимации зависимости параметра потока отказов системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320 от срока пребывания автомобилей в эксплуатации T имеют такой вид:

$$\begin{aligned} a_0 &= -3,0066 \cdot 10^{-3} T^2 + 0,1707 \cdot T + 0,1979 \\ a_1 &= 1,5387 \cdot 10^{-2} T^2 - 0,3982 T + 8,8095 \\ a_2 &= -1,6197 \cdot 10^{-2} T^2 + 0,1134 T - 2,381 \end{aligned}$$

Величины постоянных коэффициентов уравнений аппроксимации b_{jm} для каждой марки системы питания (автомобиля) рассчитываются отдельно.

Применение уравнений аппроксимации 2-ого порядка обеспечивают необходимую точность расчетов, при этом среднеквадратическое отклонение расчетных данных от статистических не превышает 2 %.

Определение закона распределения вероятности безотказной работы системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320

При оценке вероятности безотказной работы систем, которые работают с заменой поврежденных элементов, обычно допускают, что параметр потока отказов в рассматриваемом промежутке времени следует закону Пуассона. Такое предположение выполняется точно, если законы распределения вероятности безотказной работы элементов системы – экспоненциальные, то есть $P(I) = e^{-\omega \cdot L}$, где $\omega = \text{const}$. Кроме того, в соответствии с предельной теоремой Пальма это предположение можно считать практически выполненным при каких-нибудь законах распределения вероятности безотказной работы элементов системы, если количество последних в системе достаточно большое [10].

Как показал анализ отказов элементов системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320, подавляющее их большинство вызвано постепенным сносом, а следовательно законы распределения вероятности безотказной работы элементов системы будут заметно отличаться от экспоненциальных. А количество переменных элементов системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320, по результатам проведенных расчетов, является относительно небольшим, о чем свидетельствует невыполнение условий принадлежности потока отказов к пуассоновскому [10].

В таком случае целесообразно вводить поправку к пуассоновскому приближению. Для этого необходимо сначала определить функцию, которая является вероятностью k отказов в рассматриваемом интервале наработки:

$$\left. \begin{aligned} R_k &\approx \psi(k, a) + \varepsilon \nabla^2 \psi(k, a); \\ \varepsilon &= \frac{1}{2} (D - a), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где a – математическое ожидание (или среднее количество отказов),

$$a = \omega \cdot L = \frac{\sum_{i=1}^n r_i(L)}{n \cdot L} \cdot L = \frac{\sum_{i=1}^n r_i(L)}{n}; \quad \psi(k, a) - \text{пуассоновское приближение для искомой}$$

вероятности R_k ; $\nabla^2 \psi(k, a)$ – поправка к пуассоновскому приближению, что равняется второй производной функции $\psi(k, a)$; D – дисперсия количества отказов в рассматриваемом интервале наработки; ε – множитель, который учитывает отклонение дисперсии количества

отказов для данного потока от дисперсии для соответствующего пуассоновского потока (что равняется а).

$$\psi(k, a) = \frac{a^k}{k!} e^{-a};$$

$$\nabla^2 \psi(k, a) = \psi(k, a) - 2\psi(k-1, a) + \psi(k-2, a),$$

Поскольку нас интересует вероятность безотказной работы Р или вероятность возникновения 0 отказов R_0 , то есть $k=0$ и $R_0 = P$, будем иметь:

$$\psi(0, a) = \nabla^2 \psi(0, a) = e^{-a},$$

откуда получаем формулу для вероятности отсутствия отказов в рассматриваемом интервале наработки:

$$P \approx [1 + \varepsilon] \cdot e^{-a}. \tag{5}$$

Анализ области применения данного метода расчета поправки к пуассоновскому потоку показал, что формулы (4) и (5) можно применять, если значение максимальной поправки будет составлять меньше половины от соответствующего пуассоновского приближения, то есть когда $\varepsilon < 1/2$ [10].

Выполненные расчеты показали, что данный метод может быть применен для определения поправки к пуассоновскому потоку. В других случаях необходимо проводить глубокий анализ отказов системы, их характера и особенностей, с целью установления закона распределения вероятности безотказной работы системы от наработки, после чего проверить выдвинутое предположение с помощью критериев согласия.

Значение рассчитанной максимальной поправки оказалось на несколько порядков меньше собственно самого пуассоновского приближения, что позволяет не учитывать ее величину.

В случае, когда среднее количество отказов $a > 15$, то функции $\psi(k, a)$ и $\nabla^2 \psi(k, a)$ становятся близкими к соответствующим функциям для нормального распределения. Поэтому при $a > 15$, расчеты ведутся по формуле:

$$P_0 \approx \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi(-\sqrt{a}) + \frac{\varepsilon}{a\sqrt{a}} \varphi''(-\sqrt{a}), \tag{6}$$

где

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} \tag{7}$$

По результатам проведенного экспериментально исследования максимальное значение среднего количества отказов является меньше 15.

Определение перечней операций ТО системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320 и группировки их по видам предусматривает анализ полученных статистических данных об отказах системы питания с точки зрения:

распределения отказов по элементам системы питания, что позволит выделить менее надежные из них;

частоты возникновения разных видов отказов – это позволит распределить отказы по видам ДТО и сформировать перечни контрольно-диагностических работ каждого вида ДТО в порядке уменьшения вероятности возникновения каждого следующего отказа.

Виды и перечни контрольно-диагностических работ ДТО системы питания дизелей автомобилей устанавливаются по каждой эксплуатационной группе. Это объясняется возможным разным влиянием наработки и срока пребывания автомобиля в эксплуатации на

изменение технического состояния отдельных элементов. Да, с ростом срока пребывания автомобиля в эксплуатации частица отказов, вызванных потерей свойств ГТВ, может отличаться в сравнении с автомобилями другого возраста.

Важным является анализ средней наработки на каждую разновидность отказов. Это позволит точнее формировать перечни контрольно-диагностических работ ДТО системы питания дизелей автомобилей, за счет избежания повторения операции из устранения отказа, средняя наработка на которую является меньше наработки с момента последнего выполнения данной операции.

Результаты анализа отказов системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320 планируется описать в виде методики определения перечней и группировки по видам операций ТО системы питания дизелей автомобилей.

Выводы

На основе экспериментального определения параметров математической модели процесса поддержки работоспособности системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320 во время эксплуатации – впервые получены аналитические зависимости изменения параметра потока отказов системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320 от наработки L и срока эксплуатации автомобиля T , которые лягут в основу данной математической модели; установлено, что вероятность безотказной работы системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320 изменяется во времени за экспоненциальным законом. То есть: $P(I) = e^{-\omega \cdot L}$, где $\omega = \text{const}$ – параметр потока отказов системы питания; L – наработка, тыс. км.

Математическая модель позволит удобно, просто и оперативно поддерживать работоспособность системы питания дизелей автомобилей КамАЗ-5320 на реальных предприятиях и в организациях, которые занимаются автомобильными перевозками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Е. С. Управление технической эксплуатацией автомобилей. – 2-е изд., перераб. и доп. / Е. С. Кузнецов – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
2. Говорущенко Н. Я. Новая методика нормирования расхода топлива транспортных машин (метод четырех КПД) / Н. Я. Говорущенко, С. И. Кривошапов // Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр.–Харьков: ХНАДУ. – 2004. – Вып.15. – С. 31 – 34.
3. Говорущенко Н. Я. Развитие диагностики и технической кибернетики на автомобильном транспорте / Н. Я. Говорущенко, В. Н. Варфоломеев // Вестник ХНАДУ: Сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2004. – Вып. 24. – С. 46 – 49.
4. Бажинов А. В. Ресурсно-энергетический метод оценки жизненного цикла транспортных машин / А. В. Бажинов // Вестник ХНАДУ. – 2003. – Вып. 22. – С.102 – 104. – ISBN 966-303-025-9
5. Кравченко О. П. Наукові основи управління ефективністю експлуатації автомобільних поїздів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец 05.22.20 "Експлуатація та ремонт засобів транспорту" / Кравченко Олександр Петрович; Східноукр. нац. ун-т ім. Володимира Даля та Харків. нац. автомоб.-дорожн. ун-т. – Харків, 2007. – 31 с.: іл., табл. – Бібліогр.: с. 26 – 29.
6. Степанов О. В. Підвищення надійності автосамоскидів, що працюють на породних відвалах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец 05.22.20 "Експлуатація та ремонт засобів транспорту" / Степанов Олександр Вікторович; Харків. нац. автомоб.-дорожн. ун-т. – Харків, 2008. – 21 с.: іл., табл. – Бібліогр.: с. 17 – 19.
7. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с. – ISBN 5-217-00840-7
8. Поляков А. П. Методика прогнозування технічного стану систем автомобіля / А. П. Поляков, О. М. Плахотник // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. – 2009. – № 1(8). – С. 82 – 86.
9. Плахотник О. М. Реалізація методики підтримання автомобіля у працездатному стані під час експлуатації / О. М. Плахотник // Автомобільний транспорт. – 2009. – № 24. – С. 98 – 103.
10. Погожев И. Б. Оценка отклонений потока отказов в аппаратуре многократного использования от пуассоновского потока // Кибернетику на службу коммунизму. – М., 1974. – Т. 2. – С. 228 – 246.
11. Колмогоров А. Н. Число попаданий при нескольких независимых выстрелах и общие принципы оценки эффективности системы стрельбы, Труды математического института им. В. А. Стеклова / А. Н. Колмогоров, 1945, т. XII

12. Поляков А. П. Методика визначення аналітичної залежності параметра потоку відмов на зразках БТОТ від напрацювання і терміну перебування їх в експлуатації / А. П. Поляков, О. Г. Чепак, Я. Р. Карабін / Труды НАОУ № 49. – 2004. – С.288 – 292.

Поляков Андрей Павлович – д. т. н., профессор, декан факультета автомобилей и их ремонта и восстановления, тел. 59-86-31

Плахотник Елена Михайловна – аспирант Винницкого национального технического университета, тел. 0937241855, lena_plahotnik@mail.ru.
Винницкий национальный технический университет.

Нагачевский Вячеслав Иосифович – адъюнкт Камянец-Подольського национального университета имени Ивана Огиенко, тел. (038-49) 2-55-20, (067) 790-79-28.
Камянец-Подольський национальный университет.

Гречанюк Николай Сергеевич – аспирант Винницкого национального технического университета, тел. 46-52-46.
Винницкий национальный технический университет.