

## Исследование эксплуатационной надежности автомобильных двигателей

**Юрий В. Баженов**, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», Владимир, Россия

**Михаил Ю. Баженов**, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», Владимир, Россия



Юрий В. Баженов



Михаил Ю.  
Баженов

**Резюме.** Проблема повышения надежности двигателя, который является наиболее сложным и дорогостоящим агрегатом в составе автотранспортного средства, не может быть решена без объективной и достоверной информации по отказам и неисправностям его составных частей, причинам их возникновения, фактическим ресурсам, а также факторам, влияющим на эти показатели в реальных условиях эксплуатации. Заводы-изготовители не всегда имеют такую информацию, в результате чего среди причин потери двигателями работоспособного состояния нередко встречаются конструктивные отказы, связанные с несовершенством их проектирования и конструирования. **Целью** данной работы является исследование эксплуатационной надежности двигателя с использованием полученных результатов при организации их технического обслуживания и ремонта. **Методы исследования** базировались на эксплуатационных испытаниях двигателей, которые позволяют получить наиболее полную и объективную информацию об их надежности, так как проводились в типичных условиях функционирования автотранспортных предприятий в процессе проведения технического обслуживания и ремонта автомобилей. Результаты исследований, обработанные с помощью стандартной программы Statistica 6.0, представлены в виде статистических оценок надежности основных конструктивных элементов двигателя (наработок до отказа, изменение вероятностей их безотказной работы по пробегу). Анализ полученной информации позволяет оценить уровень фактической надежности двигателя, выявить слабые места в его конструкции, разработать конкретные мероприятия по повышению эксплуатационной надежности. Получаемая при таких испытаниях информация полезна не только для производителей двигателей, но и для сферы эксплуатации, так как позволяет научно обосновать нормативы обеспечения их работоспособного состояния. Для выявления и локализации конкретных неисправностей двигателей при проведении их обслуживания и ремонта обоснован комплекс диагностических параметров с их нормативными значениями. **Выводы.** На основе выполненных исследований сформирован комплекс диагностических параметров для оценки технического состояния основных систем двигателя (цилиндропоршневой группы, кривошипно-шатунного и газораспределительного механизмов), которые определяют и лимитируют его надежность. Внедрение результатов исследования в технологические процессы технического обслуживания и ремонта автомобилей позволяет существенно повысить эксплуатационную надежность двигателей и снизить затраты на обеспечение их работоспособного состояния.

**Ключевые слова:** двигатель, автомобиль, надежность, отказ, наработка, структурный параметр, диагностический параметр, техническое состояние.

**Формат цитирования:** Баженов Ю.В., Баженов М.Ю. Исследование эксплуатационной надежности автомобильных двигателей // Надежность. 2018. Т. 18, № 4. С. 22-27. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-4-22-27

Для решения проблемы обеспечения высокого уровня надежности и работоспособности технических систем необходимы различные сведения об условиях их работы, действующих на них нагрузках, характере и причинах возникновения отказов и неисправностей. Наличие такой информации является необходимым условием повышения надежности систем на всех стадиях их жизненного цикла и основой для разработки мероприятий по совершенствованию конструкций, технологическим процессам их изготовления и эксплуатации. Все это в полной мере относится и к двигателю внутреннего сгорания, наиболее сложному и дорогостоящему агрегату автомобиля, на который приходится до 20% всех его отказов.

Заводы-изготовители двигателей не всегда имеют достоверную информацию о неисправностях, возник-

ающих в процессе эксплуатации, причинах нарушения работоспособности, наработках до предельного состояния и других показателях, характеризующих эксплуатационную надежность выпускаемой ими продукции. В результате в реальных условиях эксплуатации среди причин отказов двигателей нередко встречаются конструктивные отказы, связанные с несовершенством их проектирования и конструирования.

Источником достоверных сведений о надежности двигателей, как и любого механизма и системы автомобиля, являются испытания (доводочные, исследовательские, приемочные, квалификационные и др.). Наиболее объективную и исчерпывающую информацию о надежности двигателей дают эксплуатационные испытания, которые проводят в типичных условиях эксплуатации автомобилей с выполнением присущей им транспортной

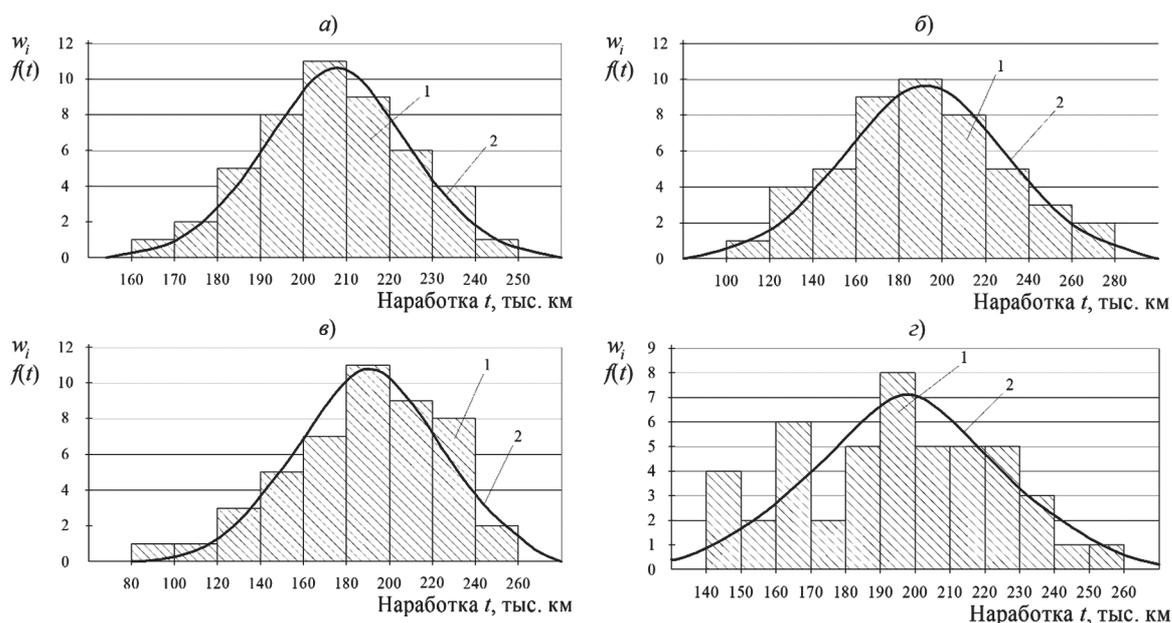


Рисунок 1 – Гистограммы (1) и теоретические кривые (2) распределения наработок до отказа конструктивных элементов двигателя: а – блок цилиндров; б – головка блока; в – поршневая группа; г – коленчатый вал

Таблица 1 – Статистические оценки числовых характеристик надежности двигателей

№ п/п	Наименование конструктивных элементов двигателя	Средний ресурс $t_{cp}$ , тыс. км	Среднее квадратическое отклонение $\sigma$ , тыс. км	Коэффициент вариации $v$
1	Блок цилиндров	203,7	34,5	0,169
2	Вал коленчатый	198,4	39,2	0,198
3	Промежуточный вал	141,8	41,7	0,294
4	Вал распределительный	194,6	26,8	0,138
5	Поршневая группа	191,6	35,3	0,184
6	Кольца поршневые	148,2	45,2	0,304
7	Вкладыши нижних головок шатунов	164,0	41,4	0,254
8	Вкладыши подшипников коленчатого вала	166,0	40,6	0,245
9	Втулка верхней головки шатуна	195,9	52,9	0,270
10	Поршневой палец	186,2	37,2	0,200
11	Направляющая втулка клапана	154,6	34,0	0,220
12	Клапан выпускной	169,0	34,8	0,206
13	Толкатель гидравлический	131,8	39,8	0,302
14	Головка блока цилиндров	193,6	39,0	0,201

работы. Получаемая при таких испытаниях информация полезна не только для производителей двигателей, но и для сферы эксплуатации, так как позволяет научно обосновать нормативы обеспечения их работоспособного состояния.

В данной работе исследования надежности двигателей проводились в реальных условиях эксплуатации с регистрацией данных об их состоянии в процессе проведения технического обслуживания и ремонта автомобилей. В качестве объекта исследования был принят двигатель ЗМЗ-4063.10 Заволжского моторного завода, устанавливаемый на автомобили семейства «Газель». По результатам исследований собран большой массив информации по возникающим в процессе эксплуатации автомобилей неисправностям и отказам двигателей.

Результаты исследований эксплуатационной надежности основных конструктивных элементов двигателей, обработанные с помощью компьютерной программы Statistica 6.0, представлены в табл. 1 и частично, в виде гистограмм и сглаживающих их теоретических кривых распределения наработок до отказа, на рис. 1.

Вид кривых, а также рассчитанные значения коэффициентов вариации  $v$  показывают, что распределения наработок до отказа деталей двигателя хорошо описываются нормальным законом. Проверка гипотезы о принадлежности опытных данных нормальному распределению с помощью критерия согласия  $\chi^2$  Пирсона подтвердила её правоту.

Одним из основных показателей, оценивающих надежность конструктивных элементов двигателя, служит вероятность их безотказной работы  $P(t)$  или отказа  $F(t)$  в пределах заданной наработки. В табл. 2 приведены результаты обработки статистических данных по эксплуатационной надежности основных деталей исследуемых двигателей, которые наглядно показывают изменение вероятности их отказов по наработке  $t$ .

Анализируя приведенные в таблице данные, можно сделать некоторые выводы по эксплуатационной надежности деталей исследуемых двигателей. Для начальных интервалов наработки от 0 до 90 тыс. км вероятность безотказной работы деталей находится на достаточно высоком уровне. В этот период эксплуатации с невысокой долей вероятности могут потерять свою работоспособность выпускные клапаны и гидравлические толкатели газораспределительного механизма, которые подвергаются большим механическим и тепловым нагрузкам при работе двигателя. К наработке 154 тыс. км существенно снижается вероятность безотказной работы промежуточного вала, прокладок головок блока цилиндров, поршневых колец, вкладышей нижних головок шатуна и направляющих втулок клапана. В интервале наработки от 154 до 218 тыс. км наблюдается резкое увеличение вероятности отказов двигателя, которая для разных деталей колеблется от  $F(t) = 0,620$  (втулка верхней головки шатуна) до  $F(t) = 0,995$  (выпускной клапан). Практически все детали двигателя полностью реализуют свой ресурс к наработке 250 тыс. км. Вероятность отказа базовой детали двигателя, блока цилиндров, достигает к этой наработке значения  $F(t) = 0,911$ , что указывает на необходимость проведения капитального ремонта двигателя или его списания.

Среди причин такого уровня эксплуатационной надежности двигателя, кроме факторов конструирования и производства, следует отметить и влияние условий его эксплуатации: состояние дорог, хранение, природно-климатические условия, производственно-техническая база и др. К условиям эксплуатации относится и система ТО, включающая в себя комплекс контрольно-диагностических, профилактических и ремонтных мероприятий, направленных на обеспечение работоспособности двигателей.

Для обеспечения надежной работы двигателя и снижения затрат на проведение ремонтных операций

**Таблица 2 – Вероятности отказов основных деталей двигателя ЗМЗ-4063 по наработке**

№ п/п	Наименование деталей	Вероятность отказа $F(t)$ на наработке, тыс. км						
		58	90	122	154	186	218	250
1	Блок цилиндров	0	0,001	0,009	0,075	0,304	0,661	0,911
2	Вал коленчатый	0	0	0,004	0,065	0,336	0,749	0,961
3	Вал промежуточный	0,022	0,107	0,317	0,615	0,856	0,966	0,995
4	Вал распределительный	0	0	0,003	0,065	0,375	0,810	0,981
5	Поршневая группа	0	0,002	0,024	0,143	0,437	0,773	0,951
6	Кольца поршневые	0,023	0,099	0,281	0,551	0,799	0,939	0,988
7	Вкладыши нижних головок шатунов	0,005	0,037	0,161	0,405	0,702	0,904	0,981
8	Вкладыши подшипников коленчатого вала	0,004	0,030	0,139	0,384	0,689	0,901	0,981
9	Втулка верхней головки шатуна	0,005	0,023	0,081	0,214	0,426	0,620	0,847
10	Поршневой палец	0	0,005	0,042	0,194	0,438	0,804	0,957
11	Направляющая втулка клапана	0,002	0,031	0,169	0,493	0,807	0,969	0,997
12	Клапан выпускной	0,053	0,221	0,5314	0,827	0,962	0,995	0,999
13	Толкатель гидравлический	0,071	0,229	0,493	0,759	0,923	0,984	0,998
14	Головка блока цилиндров	0	0,001	0,033	0,155	0,423	0,735	0,926
15	Прокладка головки блока цилиндров	0,006	0,069	0,332	0,729	0,951	0,996	0,999

после отказов необходимо, чтобы большая их часть была предупреждена при выполнении регламентных ТО. Поэтому при проведении ТО весьма важно иметь индивидуальную информацию о техническом состоянии двигателя, скрытых и назревающих в нем отказов, причинах нарушения работоспособности и т.д. Такая информация может быть получена при диагностировании двигателя путем измерения параметров, характеризующих его состояние и сопоставления их с нормативными значениями.

Разнообразие и значительное число диагностических параметров, оценивающих состояние ДВС, вызывает необходимость выбора из них наиболее информативных, которые характеризуются чувствительностью изменения их значений с изменением структурных параметров и однозначностью в постановке диагноза. Обоснование комплекса диагностических параметров для оценки технического состояния двигателя осуществлялось на основе анализа статистических данных по отказам и неисправностям его конструктивных элементов, закономерностей изменения технического состояния механизмов и узлов, разработанных схем структурно-следственных связей для основных систем двигателя, которые определяют и лимитируют его ресурс (цилиндропоршневой группы, кривошипно-шатунного механизма, механизма газораспределения). Не менее важным условием выбора диагностических параметров является возможность по их текущим значениям оценивать остаточный ресурс двигателя (запас его исправной работы).

Поэтому такие параметры, как анализ качественного и количественного состава продуктов износа в масле, расход масла на угар, разряжение в камере сгорания, массовый расход топлива, содержание вредных выбросов в отработавших газах и некоторые другие мало информативны или требуют больших затрат времени на постановку диагноза. В табл. 3 приведены диагностические параметры, отвечающие предъявляемым к ним требованиям, а также перечень структурных параметров, которые они оценивают.

Нормативные значения номинальных и предельных значений диагностических параметров, установленные заводом-изготовителем для двигателей ЗМЗ-4061.10, 4063.10, 40637.10, приведены в табл. 4.

В процессе эксплуатационных испытаний надежности двигателей исследовалось влияние значений приведенных в табл. 3 зазоров в сопряжениях на оценивающие их диагностические параметры. С этой целью перед выполнением ТО-2 контролировалось техническое состояние механических систем ДВС. В случае, когда значения диагностических параметров превышали предельно допустимые, двигатели направлялись на участок ремонта, где подвергались частичной или, при необходимости, полной разборке и измерению соответствующих зазоров. По мере накопления данных о результатах измерений была сформирована база данных, по результатам обработки которой построены регрессионные модели, характеризующие влияние структурных параметров

Таблица 3 – Структурные и оценивающие их диагностические параметры двигателя ЗМЗ-4063

№ п/п	Диагностический параметр	Структурный параметр
1	Давление в конце такта сжатия – $S_1$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Зазор между поршнем и 1-м компрессионным кольцом по высоте канавки – <math>Y_1</math></li> <li>• Зазор в стыке 1-го компрессионного кольца – <math>Y_2</math></li> <li>• Зазор между поршнем и 2-м компрессионным кольцом по высоте канавки – <math>Y_3</math></li> <li>• Зазор в стыке 2-го компрессионного кольца – <math>Y_4</math></li> <li>• Зазор между поршнем и блоком цилиндров – <math>Y_5</math></li> <li>• Зазор «стержень клапана – направляющая втулка» – <math>Y_6</math></li> <li>• Зазор «клапан-седло клапана» – <math>Y_7</math></li> </ul>
2	Значение относительной утечки воздуха при положении поршня в ВМТ – $S_2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Зазор между поршнем и 1-м компрессионным кольцом по высоте канавки – <math>Y_1</math></li> <li>• Зазор в стыке 1-го компрессионного кольца – <math>Y_2</math></li> <li>• Зазор между поршнем и 2-м компрессионным кольцом по высоте канавки – <math>Y_3</math></li> <li>• Зазор в стыке 2-го компрессионного кольца – <math>Y_4</math></li> <li>• Зазор между поршнем и блоком цилиндров – <math>Y_5</math></li> <li>• Зазор «стержень клапана – направляющая втулка» – <math>Y_6</math></li> <li>• Зазор «клапан – седло клапана» – <math>Y_7</math></li> </ul>
3	Расход картерных газов – $S_3$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Зазор между поршнем и 1-м компрессионным кольцом по высоте канавки – <math>Y_1</math></li> <li>• Зазор в стыке 1-го компрессионного кольца – <math>Y_2</math></li> <li>• Зазор между поршнем и 2-м компрессионным кольцом по высоте канавки – <math>Y_3</math></li> <li>• Зазор в стыке 2-го компрессионного кольца – <math>Y_4</math></li> <li>• Зазор между поршнем и блоком цилиндров – <math>Y_5</math></li> </ul>
4	Давление в главной масляной магистрали – $S_4$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Зазор «шатунная шейка – вкладыш» – <math>Y_8</math></li> <li>• Зазор «коренная шейка – вкладыш» – <math>Y_9</math></li> <li>• Зазор «втулка промежуточного вала – шейка вала» – <math>Y_{10}</math></li> <li>• Зазор «опора распределительного вала – шейка вала» – <math>Y_{11}</math></li> </ul>

Таблица 4 – Нормативные значения диагностических параметров, оценивающих состояние двигателя

№ п/п	Диагностический параметр	Номинальное	Предельное
1	Давление в конце такта сжатия, кгс/см <sup>2</sup>	12	9,6
2	Значение относительных утечек воздуха при положении поршня в ВМТ, кгс/см <sup>2</sup> в течении не менее 5 с	снижение с 1,5 до 1	снижение с 1,5 до 0,75
3	Расход картерных газов при 4000 мин <sup>-1</sup> , л/мин не более	22	62
4	Значение давления в главной масляной магистрали, кгс/см <sup>2</sup> : при 2500 мин <sup>-1</sup> при 700-800 мин <sup>-1</sup>	5,0	3,0
		–	1,1

У систем двигателя на выбранные для их оценки диагностические параметры S:

$$S_1 = 0,355 Y_1 + 0,054 Y_2 + 0,073 Y_3 + 0,031 Y_4 + 0,16 Y_5 + 0,105 Y_6 + 0,223 Y_7;$$

$$S_2 = 0,298 Y_1 + 0,037 Y_2 + 0,033 Y_3 + 0,015 Y_4 + 0,104 Y_5 + 0,077 Y_6 + 0,436 Y_7;$$

$$S_3 = 0,434 Y_1 + 0,078 Y_2 + 0,103 Y_3 + 0,035 Y_4 + 0,350 Y_5;$$

$$S_4 = 0,294 Y_8 + 0,372 Y_9 + 0,148 Y_{10} + 0,186 Y_{11}.$$

Результаты исследований показали, что степень влияния одних и тех же структурных параметров на выбранные для оценки технического состояния ДВС диагностические параметры имеют разное значение. Зазор, например, между поршнем и 1-м компрессионным кольцом по высоте канавки (Y<sub>1</sub>) оказывает доминирующее влияние на диагностические параметры S<sub>1</sub> – давление в конце такта сжатия (35,5%) и S<sub>3</sub> – расход картерных газов (43,4%). На относительную утечку сжатого воздуха S<sub>2</sub> наибольшее влияние оказывает структурный параметр Y<sub>7</sub> – зазор «клапан – седло клапана» (43,6%). На величину диагностического параметра S<sub>4</sub> – давление

в главной масляной магистрали основное влияние оказывают зазоры «коренная шейка – вкладыш Y<sub>9</sub>» (37,2%) и «шатунная шейка – вкладыш Y<sub>8</sub>» (29,4%). Графическая интерпретация степени влияния зазоров на диагностические параметры (в процентах) представлена на рис. 2.

Полученные зависимости диагностических параметров от формирующих их структурных позволяют определить наиболее вероятные отказы механических систем двигателя и сформировать необходимый перечень и алгоритм технических воздействий для восстановления их работоспособности. Например, выход за допустимые пределы параметра S<sub>2</sub> (относительная утечка сжатого воздуха при положении поршня в ВМТ) с большой долей вероятности свидетельствует об увеличенных износах выпускных клапанов, поршней и компрессионных колец и в меньшей степени – об изменениях в остальных элементах двигателя.

Наиболее вероятными неисправностями при отклонении от нормативных значений диагностического параметра S<sub>1</sub> (давление в конце такта сжатия) являются

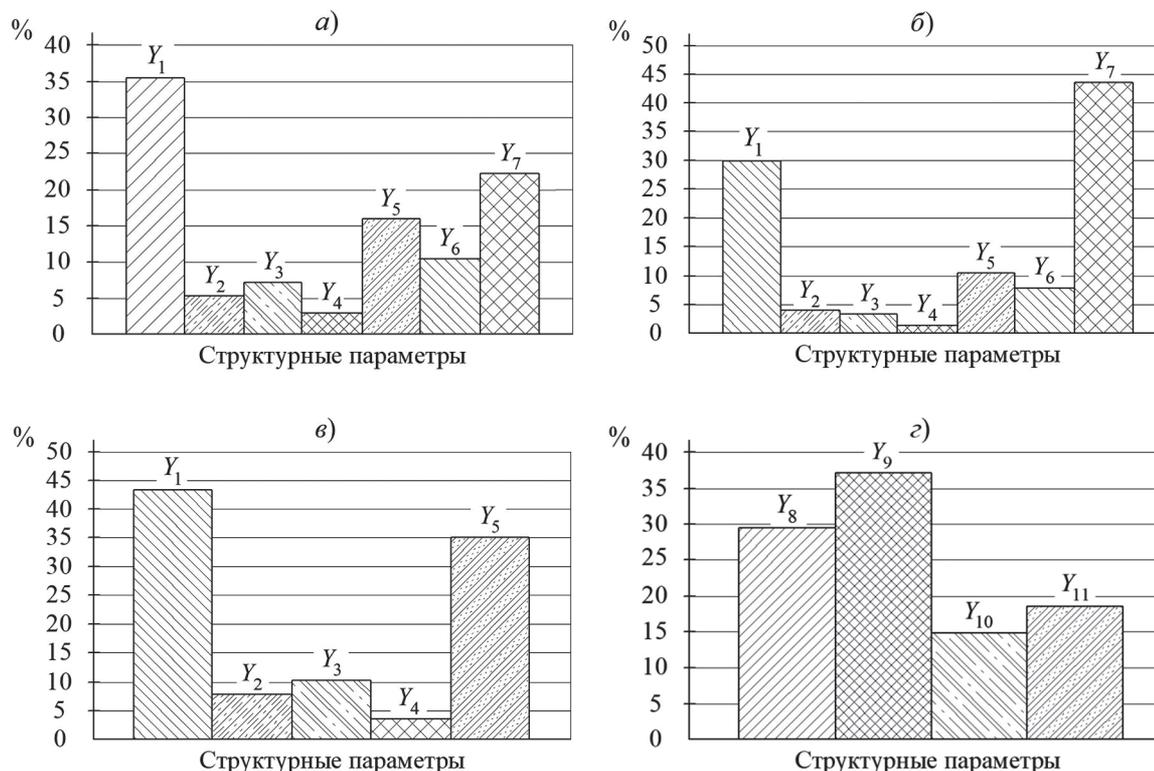


Рисунок 2 – Степень влияния структурных параметров на диагностические: а – давление в конце сжатия; б – относительная утечка воздуха; в – расход картерных газов; г – давление в главной масляной магистрали

износы в сопряжениях «поршень – компрессионное кольцо», «клапан – седло клапана», а также «поршень – блок цилиндров». Выход за допустимое значение диагностического параметра  $S_4$  (давление масла в главной масляной магистрали) свидетельствует об износах в сопряжениях «коренные шейки коленчатого вала – вкладыши подшипников», «шатунные шейки – вкладыши нижних головок шатунов», а также износах шеек промежуточного и распределительного валов.

Результаты выполненных исследований эксплуатационной надежности двигателей позволяют оптимизировать систему их технического обслуживания и ремонта, разработать алгоритмы поиска и устранения возникающих в них неисправностей. Например, до наработки 90 тыс. км нет необходимости контролировать состояние механических систем двигателя, так как вероятности их безотказной работы находятся на достаточно высоком уровне. В интервале наработки 90–122 тыс. км рекомендуется выполнять углубленное диагностирование сопряжений газораспределительного механизма, так как в этом интервале наблюдается существенное увеличение вероятностей отказов их деталей (выпускного клапана, толкателя гидравлического, прокладки головки блока цилиндров). Начиная с наработки 122 тыс. км необходимо контролировать техническое состояние всех структурных параметров двигателя.

Внедрение результатов исследований в технологические процессы ТО и ремонта автомобилей позволяет существенно повысить эксплуатационную надежность двигателей и снизить затраты на обеспечение их работоспособного состояния.

### Библиографический список

1. Баженов Ю.В. Основы теории надежности машин: учеб. пособие для вузов. – М.: Форум, 2017. – 320 с.

2. Баженов Ю.В., Баженов М.Ю. Прогнозирование остаточного ресурса конструктивных элементов автомобилей в условиях эксплуатации // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 8, ч. 1. – С. 18-23.

3. Баженов Ю.В., Каленов В.П. Обеспечение работоспособного состояния электронных систем управления двигателем в эксплуатации // *Автомобильная промышленность*. – 2015. – № 12. – С. 23-27.

4. Денисов А.С. Обеспечение надежности автотракторных двигателей / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков. – Саратов: Издательство СГТУ, 2007. – 422 с.

5. Денисов И.В. Исследование эксплуатационной надежности систем автомобиля *Lada Kalina*, влияющих на безопасность дорожного движения [Текст] / И.В. Денисов, А.А. Смирнов // *Надежность*. – 2017. – Том 17, № 4. – С. 31-35.

6. ГОСТ 27578–87. Техническая диагностика. Диагностирование изделий. Общие требования [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 20 с.

7. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. РД 50-690-89. – М.: Издательство стандартов, 1990.

### Сведения об авторах

**Юрий В. Баженов** – кандидат технических наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт», ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», Владимир, Россия

**Михаил Ю. Баженов** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт», ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», Владимир, Россия, e-mail: bagenovyv@mail.ru

**Поступила: 30.03.2018**