

Карнаух Н.В.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени П.Василенко,
г. Харьков, Украина
E-mail: nikolay.karnauh@gmail.com

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
НАДЕЖНОСТИ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ
ДИЗЕЛЕЙ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА ПРИ
РАСШИРЕНИИ ТОПЛИВНОЙ БАЗЫ**

УДК 621.936-61

Выполнен структурный анализ надежности топливной системы дизеля средств транспорта. Получены математические выражения для определения вероятности безотказной работы топливной системы и вероятности отказа ее элементов при эксплуатации на разных видах топлива. Сформирован критерий оптимизации смесового состава, позволяющий определить процентное соотношение биодизеля в смеси из условия минимизации расхода топлива и выброса вредных веществ в атмосферу, а также повышения крутящего момента на валу двигателя.

Ключевые слова: биодизель, вероятность отказа, критерий оптимизации, моделирование, надежность, смесовой состав, теория подобия, топливная система

Актуальность проблемы. Расширение топливной базы транспортных средств путем использования альтернативных видов топлива позволяет снизить энергетическую зависимость страны от минеральных углеводородов и снизить выбросы вредных веществ в атмосферу. Однако переход на возобновляемые виды топлива влечет за собой отклонение физико-химических свойств от требований, которые предусмотрены стандартом для минеральных углеводородов, а это сказывается на эксплуатационных характеристиках автомобиля в целом, силового агрегата и топливной системы в частности. Данные изменения оказывают непосредственное влияние на топливную экономичность, экологические и тягово-скоростные показатели транспортного средства. Значительные отклонения этих параметров от нормативов, устанавливаемых заводом изготовителем, влекут за собой снижение работоспособности и долговечности двигателя и элементов топливной аппаратуры, что ведет к существенным экономическим потерям.

На топливную систему приходится более 25...30% отказов дизельных двигателей, до 60% которых относятся к топливному насосу высокого давления (ТНВД). Несоблюдение технологического процесса производства биодизельного топлива, наряду с отсутствием соответствующей системы фильтрации и очищения от механических примесей, продуктов омыления и остаточного глицерина [1] оказывает негативное влияние на ресурс топливной системы и приводит к её преждевременному отказу.

В тоже время, трибологические характеристики биологического топлива превалируют над минеральным [2]. Поскольку смазывание прецизионных пар топливной аппаратуры осуществляется самим топливом, то данный факт способствует повышению их износостойкости.

Учитывая неоднозначное воздействия биодизельного топлива на безотказность топливной системы, можно констатировать, что исследования, направленные на изучение воздействия биологического топлива на надежность топливной системы и безотказность ее работы, недостаточны и носят актуальный характер.

Анализ публикаций, посвященных данной проблеме. Исследованию надежности топливной системы дизельного двигателя уделяется незначительное внимание, поскольку проблема данного рода требует проведения экспериментальных и ресурсных испытаний. Реализация оных требует затрат как материального, так и временного ресурса, что не всегда приемлемо. Поэтому большая часть работ направлена на моделирование, позволяющее

определить безотказность работы составных элементов топливной системы силового агрегата, работающего на дизельном и альтернативном топливах, без натуральных испытаний.

В результате проведенного анализа научных источников можно констатировать, что внимание исследователей, занимающихся изучением вопроса безотказной работы элементов топливной системы, сосредоточено на выявлении закономерностей отказов и установлении среднего ресурса. Данные параметры, как правило, находятся в прямой зависимости от качества используемого топлива и соответствия его физико-химических свойств стандарту качества.

Так, в работе Вороновского И.Б. [3] рассматривается влияние загрязненности топлива на функциональные и эксплуатационные показатели работы машинно-тракторного агрегата посредством определения ресурса плунжерных пар. Проведенные исследования носят практический характер и учитывают ряд мероприятий, позволяющих повысить наработку до отказа за счет дополнительной фильтрации топлива. Этим же автором проведены глубокие теоретические исследования [4], позволяющие смоделировать надежность и износ топливной системы и определить вероятность нахождения её элементов в исправном состоянии. Однако, в данных работах не рассматривается отличие свойств традиционного топлива от альтернативных и влияние этих отличий на саму систему.

Обширные ресурсные испытания в работе Кюрчева С.В. [5] позволили определить законы параметрических отказов топливной системы при работе на разном смесевом составе биодизельного топлива в виде метиловых эфиров растительных масел. Снижение ресурса ТНВД объясняется агрессивным воздействием метанола в биодизеле. Рассматривая тот факт, что качеству биологического топлива при производстве не уделяется должного внимания, можно предположить, что испытания в данной работе проводились на топливе с повышенным содержанием остаточного метанола.

Учитывая вышеизложенное, можно отметить недостаточность работ в изучении надежности топливных систем, работающих на альтернативном топливе.

Цель исследований. Определить вероятность безотказной работы топливной системы и ее элементов при эксплуатации на разных видах топлива.

Результаты исследования. В процессе исследования работ по расширению топливной базы средств транспорта актуальным является вопрос об изменении показателей надежности элементов топливной системы дизелей и топливной системы в целом в процессе эксплуатации. Теоретическая оценка вероятности отказа каждого из элементов, входящих в топливную систему, а так же оценка вероятности безотказной работы системы, позволит обосновать сроки проведения технического обслуживания или ремонта, что повысит эффективность использования средств транспорта.

При расширении топливной базы средств транспорта формируется концепция возможности одновременного использования нескольких видов топлива одновременно. Следовательно, переход с традиционного нефтяного дизельного топлива (ДСТУ 4840:2007) на биодизель в виде метиловых эфиров жирных кислот растительных масел и жиров (ДСТУ 6081:2009), а так же на новый перспективный вид биодизеля – этиловые эфиры жирных кислот растительных масел и жиров, получение которых запатентовано автором данной работы (и 2011 05331 від 26.04.2011) не должен вызывать снижение надежности элементов топливной системы в целом при условии соответствия их физико-химических свойств указанным стандартам.

Топливную систему дизеля транспортного средства можно представить в виде некоторой системы, состоящей из ряда последовательно соединенных функциональных элементов. К таким элементам, выполняющим определенные функции относятся: топливный бак, трубопроводы, фильтр грубой очистки (фильтр-отстойник), подкачивающий насос, фильтр тонкой очистки, плунжерные пары топливного насоса высокого давления или насос-форсунок, распылители форсунок.

Надежность работы топливной системы зависит от надежности каждого из элементов системы, которую можно оценить через вероятность отказа, а так же способа соединения элементов между собой, которую можно оценить как вероятность безотказной работы системы в целом. При этом отказ любого элемента системы ведет к отказу топливной системы в целом и прекращению эксплуатации транспортного средства. Каждый из элементов топливной системы может находиться в двух фиксированных состояниях: рабочем или не рабочем, находящемся в состоянии ремонта.

Таким образом, переход топливной системы дизеля транспортного средства из исправного (рабочего) состояния в неисправное (требующее ремонта), может рассматриваться в виде процесса с фиксированным дискретным положением и непрерывным временем переходов, которые можно рассматривать как время эксплуатации.

При этом заранее нельзя определить, в какой момент времени с элементами системы могут происходить отказы, требующие диагностики и ремонтных работ. Такой случайный процесс переходов, с точки зрения математического описания, удобно рассматривать как марковский [6] и иллюстрировать его соответствующим графиком состояния, который представлен на рис.1. Граф состояний построен для конструкции типовой топливной системы дизеля Д 242 (Д 243, Д 245), которые устанавливаются на грузовые автомобили разных модификаций ГАЗ и ЗИЛ.

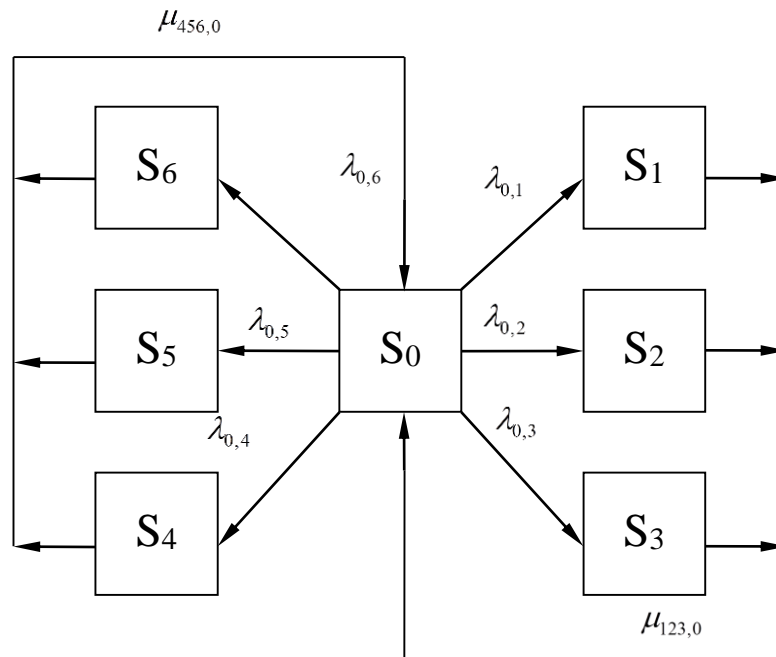


Рис. 1 Граф состояния топливной системы дизеля

Введем следующие обозначения, характеризующие состояние элементов топливной системы:

- S_0 - топливная система исправлена и находится в эксплуатации;
- S_1 - топливная система не исправлена по причине выхода из строя фильтра грубой очистки;
- S_2 - топливная система не исправлена по причине выхода из строя фильтра тонкой очистки;
- S_3 - топливная система не исправлена по причине закоксовывания распылителей форсунок;

S_4 - топливная система не исправлена по причине износа плунжерных пар топливного насоса высокого давления;

S_5 - топливная система не исправлена по причине износа запорной конусной иглы форсунки;

S_6 - топливная система не исправлена по причине разбухания уплотнительных соединений;

Приведенный перечень состояния элементов топливной системы построен на основании публикаций А.С.Полянского [7], посвященных анализу надежности топливной системы дизелей, а так же собственных статистических данных по отказам элементов топливной системы дизелей Д 242, Д 243, Д 245, которые эксплуатируются на грузовых автомобилях ГАЗ и ЗИЛ и тракторах МТЗ 80-82.

Математическое описание перехода элементов топливной системы из исправного состояния S_0 в неисправное состояние S_{1-6} и вновь в исправное состояние S_0 может быть оценено на основании вероятностей всех состояний, которые в общем случае являются функциями времени эксплуатации: $P_0(t) \dots P_6(t)$, где t – время эксплуатации.

Используя правило Колмогорова составим систему дифференциальных уравнений для вероятностных состояний (1).

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = \lambda_{0,1}P_0 - \mu_{1,0}P_1 \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_{0,2}P_0 - \mu_{2,0}P_2 \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_{0,3}P_0 - \mu_{3,0}P_3 \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_{0,4}P_0 - \mu_{4,0}P_4 \\ \frac{dP_5}{dt} = \lambda_{0,5}P_0 - \mu_{5,0}P_5 \\ \frac{dP_6}{dt} = \lambda_{0,6}P_0 - \mu_{6,0}P_6 \\ \frac{dP_0}{dt} = \mu_{6,0}P_6 + \mu_{5,0}P_5 + \mu_{4,0}P_4 + \mu_{3,0}P_3 + \mu_{2,0}P_2 + \mu_{1,0}P_1 - (\lambda_{0,1} + \lambda_{0,2} + \lambda_{0,3} + \lambda_{0,4} + \lambda_{0,5} + \lambda_{0,6})P_0 \end{cases} \quad (1)$$

В левой части каждого уравнения стоит вероятность состояния элемента системы, а правая часть содержит столько членов, сколько стрелок связано с этим состоянием. Если стрелка направлена из состояния, соответствующий член имеет знак “минус”, если в состояние – знак “плюс” [6]. Каждый член равен интенсивности перехода λ или μ , соответствующий данной стрелке, умноженной на вероятность того состояния, из которого выходит стрелка.

Уравнение системы (1) называют уравнением Эрланга. Естественными начальными условиями для их решения являются:

$$P_0(0) = 1; P_1(0) = P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = P_5(0) = P_6(0) = 0 \quad (2)$$

т.е перед началом эксплуатации, когда $t = 0$ топливная система исправна ($P_0 = 1$), а вероятность отказа элементов равна нулю ($P_i = 0$).

Принимая левые части уравнений системы (1) равные принятым начальным условиям (2) перепишем систему уравнений (2.1) в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{1,0} P_1 = \lambda_{0,1} P_0 \\ \mu_{2,0} P_2 = \lambda_{0,2} P_0 \\ \mu_{3,0} P_3 = \lambda_{0,3} P_0 \\ \mu_{4,0} P_4 = \lambda_{0,4} P_0 \\ \mu_{5,0} P_1 = \lambda_{0,5} P_0 \\ \mu_{6,0} P_1 = \lambda_{0,6} P_0 \\ (\lambda_{0,1} + \lambda_{0,2} + \lambda_{0,3} + \lambda_{0,4} + \lambda_{0,5} + \lambda_{0,6}) P_0 = \mu_{456} (P_4 + P_5 + P_6) + \mu_{123} (P_1 + P_2 + P_3) \end{array} \right. \quad (3)$$

Решение системы (2.3) выполним следующим образом. Выразим все вероятности $P_1 \dots P_6$ через вероятность P_0 :

$$P_1 = \frac{\lambda_{0,1}}{\mu_{1,0}} P_0, \quad (4)$$

$$P_2 = \frac{\lambda_{0,2}}{\mu_{2,0}} P_0, \quad (5)$$

$$P_3 = \frac{\lambda_{0,3}}{\mu_{3,0}} P_0, \quad (6)$$

$$P_4 = \frac{\lambda_{0,4}}{\mu_{4,0}} P_0, \quad (7)$$

$$P_5 = \frac{\lambda_{0,5}}{\mu_{5,0}} P_0, \quad (8)$$

$$P_6 = \frac{\lambda_{0,6}}{\mu_{6,0}} P_0, \quad (9)$$

Все вероятности $P_1 \dots P_6$ выражены через одну вероятность P_0 . Используя принятые начальные условия (2), когда $P_0 = 1$ при $t = 0$, запишем выражение:

$$P_0 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_6 = 1 \quad (10)$$

Подставив в (10) выражение для P_i , формулы (2.4)-(2.9) получили выражение для определения P_0 :

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{0,1}}{\mu_{1,0}} + \frac{\lambda_{0,2}}{\mu_{2,0}} + \frac{\lambda_{0,3}}{\mu_{3,0}} + \frac{\lambda_{0,4}}{\mu_{4,0}} + \frac{\lambda_{0,5}}{\mu_{5,0}} + \frac{\lambda_{0,6}}{\mu_{6,0}}} \quad (11)$$

Таким образом, применяя математический аппарат теории исследования операций [6] получены выражения для оценки надежности топливной системы P_0 и элементов топливной системы P_i при эксплуатации на различных типах топлива, а так же для оценки изменения показателей надежности при расширении топливной базы средств транспорта.

Вероятность нахождения топливной системы в исправном состоянии P_0 определяется выражением (11).

Вероятность отказа фильтра грубой очистки P_1 определяется выражением (4). Вероятность отказа фильтра тонкой очистки P_2 определяется выражением (5). Вероятность отказа распылителей форсунок P_3 определяется выражением (6). Вероятность отказа плун-

жерных пар топливного насоса высокого давления P_4 определяется выражением (7). Вероятность отказа запорной конусной иглы форсунки P_5 определяется выражением (8). Вероятность выхода из строя уплотнительных материалов P_6 определяется выражением (9).

В полученных выше выражениях используются два параметра:

- интенсивность отказа i - го элемента системы λ_{ii} ;
- интенсивность восстановления i - го элемента системы μ_{ii} .

Данные величины собираются и обрабатываются методом математической статистики во время эксперимента и являются статистическими.

Большая статистика по отказам элементов топливной системы дизелей при эксплуатации на дизельных топливах приведена в работах А.С.Полянского [7].

Согласно ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения», статистическая оценка для интенсивности отказов определяется как:

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{t_{0i}}, \quad (12)$$

где t_0 - среднестатистическое время эксплуатации до выхода из строя (i - го элемента топливной системы).

Интенсивность восстановления определяется как:

$$\mu_{ii} = \frac{1}{t_{bi}} \quad (13)$$

где t_{bi} - среднестатистическое время восстановления рабочего состояния i - го элемента топливной системы.

Применяя разработанный статистический аппарат и имея статистические данные по времени наработки до отказа и времени восстановления рабочего состояния, можно рассчитать вероятность выхода из строя каждого элемента топливной системы и вероятность безотказной работы топливной системы в целом на различных типах топлива и по результатам моделирования внести коррективы в руководство по техническому обслуживанию.

Выполним оценку надежности элементов топливной системы дизелей Д 242, Д 243, Д 245, которые эксплуатировались на грузовых автомобилях на дизельном топливе и на биодизеле.

Среднестатистическое время выхода из строя элементов топливной системы определяли как по выполненным публикациям различных авторов, так и с помощью метода экспертных оценок, методика которого изложена в [8].

Время восстановления элементов топливной системы соответствовало времени, которое указано в руководстве по эксплуатации на данный тип автомобиля [9], а так же в технических картах на техническое обслуживание и ремонт.

В процессе обработки статистических данных рассчитывали среднеквадратичное отклонение σ значений и коэффициент вариации V . При больших значениях коэффициента вариации осуществляется поиск точек выброса и уточняли статистические данные.

Согласно графика состояний топливной системы, который представлен на рис.1, определили следующие интенсивности:

- интенсивность отказа и восстановления фильтра грубой очистки:

$$\lambda_{0,1} = \frac{1}{t_{0,1}} ; \mu_{1,0} = \frac{1}{kt_{b1}} \quad (14)$$

- интенсивность отказа и восстановления фильтра тонкой очистки:

$$\lambda_{0,21} = \frac{1}{t_{0,2}}; \mu_{2,0} = \frac{1}{kt_{b2}} \quad (15)$$

- интенсивность отказа и восстановления распылителей форсунок:

$$\lambda_{0,3} = \frac{1}{t_{0,3}}; \mu_{3,0} = \frac{1}{kt_{b3}} \quad (16)$$

- интенсивность отказа и восстановления плунжерных пар топливного насоса высокого давления:

$$\lambda_{0,4} = \frac{1}{t_{0,4}}; \mu_{4,0} = \frac{1}{kt_{b4}} \quad (17)$$

- интенсивность отказа и восстановления запорной конусной иглы:

$$\lambda_{0,5} = \frac{1}{t_{0,5}}; \mu_{5,0} = \frac{1}{kt_{b5}} \quad (18)$$

- интенсивность отказа и восстановления уплотнительных материалов:

$$\lambda_{0,6} = \frac{1}{t_{0,6}}; \mu_{6,0} = \frac{1}{kt_{b6}} \quad (19)$$

При определении интенсивности восстановления μ_{ii} используется весовой коэффициент $k=10$. Данный коэффициент учитывает увеличение времени восстановления по причине одновременно выполняемых работ по трем и более элементам.

Результаты статистической обработки и расчета интенсивности отказа λ_{ii} и интенсивности восстановления μ_{ii} при эксплуатации дизелей грузовых автомобилей на дизельном топливе приведены в таблице 1, а при эксплуатации на смесевом топливе (ДТ + МЭРМ) в таблице 2. В таблице указаны величины среднеквадратического отклонения σ времени отказа и времени восстановления элементов топливной системы, а так же значения коэффициентов вариации V .

Используя статистически полученные значения интенсивностей отказа λ_{ii} и интенсивности восстановления μ_{ii} , которые приведены в таблице 1 и 2 можно рассчитать вероятность безотказной работы топливной системы P_0 и вероятность отказа каждого элемента системы $P_1 \dots P_6$. Результаты расчета вероятностей при эксплуатации дизельного двигателя на дизельном и смесевом топливах сведены в таблицу 3.

Из проведенных расчетов следует, что при эксплуатации дизелей грузовых автомобилей на смесевом топливе, вероятность безотказной работы топливной системы уменьшается с значения 0,85 до 0,76. анализируя изменения вероятностей отказов каждого из элементов системы, можно установить причины снижения вероятностей безотказной работы топливной системы.

В первую очередь увеличивается в два раза вероятность отказа фильтра грубой очистки P_1 и в четыре раза вероятность отказа фильтра тонкой очистки P_2 . Связано это с тем, что в метиловых эфирах рапсового масла содержится остаток глицерина и воскоподобных веществ, которые остаются в топливе в результате технологического процесса производства. Данный факт отмечается в работах различных исследователей [10, 11].

Кроме этого в метиловых эфирах рапсового масла содержится остаточный метанол,

Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів
 Technical service of agriculture, forestry and transport systems

наличие которого разрешено ДСТУ 6081:2009 (содержание остаточного метанола до 0,2%). Учитывая то, что метанол является активным растворителем, происходит разрушение структуры смол, которыми пропитан бумажный топливный фильтр.

Таблица 1

Значения интенсивности отказа и восстановления элементов топливной системы дизелей Д 242, Д 243, Д 245 при эксплуатации на дизельном топливе

Элементы топливной системы	Среднее значение времени $t_0; t_b; \text{ч}$	Средне-статистическое отклонение $t_i; \sigma$	Коэффициент вариации $V, \%$	Интенсивность отказа λ_{ii}	Интенсивность восстановления μ_{ii}
Фильтр грубой очистки (отказ)	50	6	12	0,02	-
Фильтр грубой очистки (восстановление)	0,2	0,016	8	-	0,5
Фильтр тонкой очистки (отказ)	1000	150	15	0,001	-
Фильтр тонкой очистки (восстановление)	3	0,18	6	-	0,033
Распылители форсунок (отказ)	1000	180	18	0,001	-
Распылители форсунок (восстановление)	3	0,15	5	-	0,033
Плунжерные пары (отказ)	3000	510	17	0,00033	-
Плунжерные пары (восстановление)	7	0,42	6	-	0,0142
Конусная игла форсунки (отказ)	3000	570	19	0,00033	-
Конусная игла форсунки (восстановление)	7	0,49	7	-	0,0142
Уплотнительные материалы (отказ)	3000	450	15	0,00033	-
Уплотнительные материалы (восстановление)	7	0,49	7	-	0,0142

Изложенные выше недостатки требуют внесения изменений в руководство по эксплуатации, в раздел “Техническое обслуживание топливной системы”.

На 30% увеличивается вероятность отказа распылителей форсунок по причине закоксовывания сопловых отверстий. Данный факт установлен в работе [12]. Причина закоксовывания – наличие в топливе глицерина и воскоподобных веществ, которые содержатся в растительном масле. Так же на 52% увеличивается вероятность выхода из строя резинотехнических изделий P_6 , это манжеты, уплотнительные кольца, шланги. Причина – остаточный метанол в топливе, который приводит к разбуханию топливной резины, что так же требует изменения сроков технического обслуживания.

Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів
 Technical service of agriculture, forestry and transport systems

Таблица 2

Значения интенсивности отказа и восстановления элементов топливной системы дизелей Д 242, Д 243, Д 245 при эксплуатации на смесевом топливе

Элементы топливной системы	Среднее значение времени $t_0; t_b$; ч	Средне статистическое отклонение $t_i; \sigma$	Коэффициент вариации V, %	Интенсивность отказа λ_{ii}	Интенсивность восстановления μ_{ii}
Фильтр грубой очистки (отказ)	25	3,75	15	0,04	-
Фильтр грубой очистки (восстановление)	0,2	0,014	7	-	0,5
Фильтр тонкой очистки (отказ)	250	45	18	0,004	-
Фильтр тонкой очистки (восстановление)	3	0,24	8	-	0,033
Распылители форсунок (отказ)	750	142	19	0,0013	-
Распылители форсунок (восстановление)	3	0,18	6	-	0,033
Плунжерные пары (отказ)	4000	760	19	0,00025	-
Плунжерные пары (восстановление)	7	0,56	8	-	0,0142
Конусная игла форсунки (отказ)	4000	760	19	0,00025	-
Конусная игла форсунки (восстановление)	7	0,49	7	-	0,0142
Уплотнительные материалы (отказ)	2000	320	16	0,0005	-
Уплотнительные материалы (восстановление)	7	0,56	8	-	0,0142

Положительным при эксплуатации на метиловых эфирах рапсового масла является уменьшение вероятности отказа плунжерных пар P_4 , и конусной иглы форсунки P_5 на 26%. В данном случае глицерин и воскоподобные вещества в топливе улучшают смазывающие свойства топлива по сравнению с дизельным топливом. Это снижает износ, а следовательно увеличивает износ плунжерных пар и конусной иглы форсунки с 96 тыс. км пробега (3000 часов эксплуатации), до 128 тыс. км пробега (4000 часов).

Результаты расчета вероятностей элементов топливной системы дизелей при эксплуатации на дизельном топливе и смесевом топливе (ДТ+МЭРМ)

Вероятность P_i	Дизельное топливо (ДТ)	Смесевое топливо (ДТ + МЭРМ)
Вероятность безотказной работы топливной системы, P_0 (формула (11))	0,85	0,76
Вероятность отказа фильтра грубой очистки, P_1 (формула (4))	0,04	0,08
Вероятность отказа фильтра тонкой очистки, P_2 (формула (5))	0,03	0,121
Вероятность отказа распылителей форсунок, P_3 (формула (6))	0,03	0,039
Вероятность отказа плунжерных пар насоса высокого давления, P_4 (формула (7))	0,023	0,017
Вероятность отказа конусной иглы форсунки, P_5 (формула (8))	0,023	0,017
Вероятность отказа уплотнительных материалов, P_6 (формула (9))	0,023	0,035

Разработанный математический аппарат оценки надежности топливной системы средств транспорта и элементов топливной системы будет применен для оценки возможности использования этиловых эфиров растительных масел, где вместо этанола используется этиловый спирт и в качестве катализатора – алкил-бензол-сульфоокислота и запатентованная технология, обеспечивающая снижение содержания глицерина в топливе до нуля. Это позволит разработать рекомендации по изменению сроков технического обслуживания элементов топливной системы дизеля.

Опыт эксплуатации дизельных двигателей грузовых автомобилей и тракторов на метиловых эфирах рапсового масла показал, что целесообразно применять смесевые составы, т.е смесь дизельного топлива (ДТ) и метиловых эфиров рапсового масла (МЭРМ). Это связано, в первую очередь, с трудностями запуска дизеля при низких температурах, в плохой прокачиваемости и фильтруемости более вязкого биотоплива через фильтры тонкой очистки, в закоксованности отверстий распылителей форсунок.

Для устранения перечисленных недостатков многие исследователи [13, 14] предлагают для эксплуатации в летний и зимний период применять смесевые составы дизельного топлива и МЭРМ.

В данной работе, с целью устранения ряда недостатков МЭРМ, таких как агрессивное воздействие на резинотехнические изделия, а так же на фильтры тонкой очистки, предлагается использовать новый вид биотоплива – этиловые эфира растительных масел, например, рапсового ЭЭРМ.

Для нахождения оптимального состава смесевое топлива (ДТ + ЭЭРМ) необходимо

обосновать и получить комплексный критерий оптимизации. При достижении максимального значения критерия будет достигаться максимальный крутящий момент на валу дизеля $M_{\dot{\omega}}$, при минимальном часовом расходе топлива $G_{\dot{}}^{\dot{}}$, минимальные выбросы вредных веществ в атмосферу \dot{Y} и минимальная вязкость топлива ν , которая влияет на прокачиваемость через фильтр тонкой очистки, а следовательно и на надежность топливной системы.

В соответствии с второй теоремой подобия и моделирования (π -теорема), всякое уравнение физического процесса, записанное в определенной системе единиц измерения, может быть представлено в виде функциональной зависимости между критериями.

Согласно работ [15,16] выражения для критериев могут быть получены различными способами: методом подобия, методом анализа размерностей или общих физических соображений. В данной работе используется метод анализа размерностей, который позволяет сохранить физический смысл изучаемых процессов.

В соответствии с правилами получения критериев подобия метод анализа размерностей, учитывая исследуемый физический процесс, в качестве единицы измерения выбраны: длина L , м; масса m , кг; время t , с.

Базисными переменными в этой системе единиц измерения будут использоваться следующие физические параметры процесса:

- часовой расход топлива дизеля, $G_{\dot{}}^{\dot{}}$, $\dot{\omega}^3/\dot{n}$;
- количество выброшенных вредных веществ в атмосферу \dot{Y} , $\dot{\omega}\dot{a}/\dot{\omega}^3$;
- кинематическая вязкость топлива ν , $\dot{\omega}^2/\dot{n}$.

В качестве базисного выходного параметра будет использоваться крутящий момент, развиваемый дизелем $M_{\dot{\omega}}$, $\dot{I} \cdot \dot{\omega} = \dot{\omega}\dot{a}\dot{\omega}^2/\dot{n}^2$.

Для получения критерия подобия необходимо проверить отсутствие корреляционной связи между базисными переменными: $G_{\dot{}}^{\dot{}}$, \dot{Y} , ν .

О независимости выбранных переменных свидетельствует не равенство нулю базисного определителя, составленного из степеней размерностей указанных величин.

$$D_0 = \begin{matrix} G_{\dot{}}^{\dot{}} \\ \dot{Y} \\ \nu \end{matrix} \begin{vmatrix} L & m & t \\ 3 & 0 & -1 \\ -3 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & -1 \end{vmatrix} = -1$$

С базисными параметрами связывают оставшийся параметр $M_{\dot{\omega}}$, который входит в описание процесса, получив безразмерный параметр подобия. Критерий подобия записывается в виде произведения всех базисных параметров, которые имеют свою степень. Для определения величины степеней всех базисных переменных параметров необходимо знать значения следующих определителей:

$$D_{G_{\dot{}}^{\dot{}}} = \begin{matrix} M_{\dot{\omega}} \\ \dot{Y} \\ \nu \end{matrix} \begin{vmatrix} L & m & t \\ 2 & 1 & -2 \\ -3 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & -1 \end{vmatrix} = -1$$

$$D_{\dot{Y}} = M_{\dot{\epsilon}\delta} \begin{vmatrix} G_{\dot{v}} & L & m & t \\ 3 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & -2 \\ v \end{vmatrix} = -1$$

$$D_v = \dot{Y} \begin{vmatrix} G_{\dot{v}} & L & m & t \\ 3 & 0 & -1 \\ -3 & 1 & 0 \\ M_{\dot{\epsilon}\delta} \end{vmatrix} = -1$$

Величины определителей показывают, что базисные параметры входят в формулу в степени -1 , а параметр $M_{\dot{\epsilon}\delta}$ в первой степени.

По правилам записи формул, получаем:

$$K = M_{кр} \cdot G_{\dot{v}}^{-1} \cdot \dot{\epsilon}^{-1} \cdot v^{-1} = \frac{M_{кр}}{G_{\dot{v}} \cdot \dot{\epsilon} \cdot v} \quad (20)$$

В целях первичной проверки правильности получения критерия проведем проверку размерности. Подставив в критерий вместо физических величин их размерность, получаем, что критерий K безразмерный.

Вторым этапом проверки является определение физического смысла критерия. Максимальное значение критерий K будет принимать при условии наличия максимального крутящего момента на валу дизеля при одновременных минимальных значениях часового расхода топлива, выброса вредных веществ в атмосферу и минимальной вязкости топлива, что не вызывает трудности в прокачиваемости топлива через топливную систему.

Минимальное значение критерий K принимает при малом значении крутящего момента, высоком значении часового расхода топлива, одновременно больших выбросах вредных веществ в атмосферу с отработавшими газами и большей вязкости топлива, которая приводит к сокращению сроков замены фильтров грубой и тонкой очистки.

Как следует из приведенных распределений, полученный критерий K соответствует физическому смыслу исследуемого процесса и может выступать в качестве количественной величины (меры), как критерий оптимизации при выборе смесевых видов топлива для эксплуатации средств транспорта, а так же при выборе видов топлива в процессе расширения топливной базы.

Выводы

1. Используя основные положения теории исследования операций, выполнен структурный анализ надежности топливной системы дизеля средств транспорта. Получены математические выражения для определения вероятности безотказной работы топливной системы и вероятности отказа ее элементов при эксплуатации на разных видах топлива.

2. На основании статистических данных об отказах элементов топливной системы при эксплуатации на разных видах топлива (дизельное топлива и метиловые эфиры рапсового масла), а так же полученных математических выражений, выполнено математическое моделирование надежности элементов топливной системы. Установлено, что при эксплуатации на метиловых эфирах рапсового масла надежность топливной системы снижается с величины 0,85 до 0,76. На основании поэлементного анализа вероятностей отказа установлено, что на снижение надежности системы влияют сокращение сроков замены фильтров грубой и тонкой очистки в 2-4 раза, сокращение сроков очистки распылителей форсунок на 30% и замены резинотехнических изделий на 52%. Одновременно установлено увеличение

надежности плунжерных пар топливного насоса высокого давления и конусной иглы форсунки на 26%.

Литература

1. Карнаух М. В. Розширення паливної бази автомобільного транспорту шляхом застосування етилових ефірів жирних кислот рослинних олій [Текст] / М. В. Карнаух // Вестн. ХНАДУ. – 2010. – Вып. 49. – С. 47-51. – Библиогр.: 7 назв. – укр.
2. Быченин А. П. Повышение ресурса плунжерных пар топливного насоса высокого давления тракторных дизелей применением смесового минерально-растительного топлива [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.20.03 / А. П. Быченин. – Пенза, 2007. – 17 с. : ил. – Библиогр.: с. 16-17.
3. Вороновский И. Б. Исследование износа плунжерных пар тнвд распределительного типа двигателя МТА [Электронный ресурс] / И. Б. Вороновский // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2015. – Вып. 156. – С. 385-389. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2015_156_59
4. Вороновский И. Б. Моделирование надежности и износа топливной системы дизельного двигателя МТА [Текст] / И. Б. Вороновский // Пр. Тавр. держ. агротехнол. ун-ту. – 2013. – Вып. 13, т. 5. – С. 119-125. – Библиогр.: 5 назв. – рус.
5. Кюрчев С. В. Надійність паливної системи ДВЗ, працюючих на різних видах палива [Электронный ресурс] / С. В. Кюрчев, В. Б. Юдовинский, В. А. Коломоець // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2014. – Вып. 148. – С. 314-321. – Режим доступа : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2014_148_52.
6. Вентцель Е. С. Исследование операций [Текст] / Е. С. Вентцель. – М. : Сов. радио, 1972. – 552 с.
7. Полянский А. С. Формирование свойств надежности автотракторных двигателей в гарантийный и послегарантийный периоды эксплуатации [Текст] : дис... д-ра техн. наук: 05.22.20 / Полянский Александр Сергеевич ; Харьковский национальный автомобильно-дорожный ун-т. – Х., 2003. – 381 л.: рис. – Библиогр.: с. 325-355.
8. Орлов А.И. Экспертные оценки [Текст] / А.И. Орлов // Заводская лаборатория. – 1996. – Т.62. №.1. – С.54-60.
9. Автомобиль ЗИЛ 5301 "Бычок" и его модификации : руководство по эксплуатации, ремонту и техн. обслуживанию [Текст]. – М. : Атлас-Пресс, 2005. – 303 с.: ил
10. Войтов В. А. Особливості експлуатації паливної апаратури дизелів сільськогосподарського призначення при застосуванні біологічного палива [Текст] / В. А. Войтов, М. С. Даценко, М. В. Карнаух, С. П. Сорокін // Науковий вісник НУБіП України. – 2010. – № 144. – С. 29–32.
11. Войтов В.А. Дослідження особливостей фільтрації біодизеля через паперові фільтри тонкої очистки дизельних двигунів [Текст] / В.А. Войтов, М.С. Даценко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2010. – Вып. 40, част. I. – С. 282-286.
12. Войтов В. А. Особливості експлуатації паливної апаратури дизелів сільськогосподарського призначення при застосуванні біологічного палива / В. А. Войтов, М. С. Даценко, М. В. Карнаух, С. П. Сорокін // Науковий вісник НУБіП України. – 2010. – № 144. – С. 29 – 32.
13. Левтеров А.М. Вивчення впливу моторних властивостей біопалива на енергоекологічні характеристики дизельного двигуна [Текст] / А.М. Левтеров, В.П. Марохівський, В.Д. Савицький // Автомобильный транспорт. – 2012. – Вып. 31. – С. 57-61.

14. Шевченко О. Б. Властивості сумішевих дизельних палив [Текст] / О. Б. Шевченко // Наукоємні технології. –2013. –№ 1 (17). – С. 50-52
15. Бевз С.В. Узагальнення подібних явищ і процесів при моделюванні технічних об'єктів [Текст] / С.В. Бевз // Наука і підприємництво : зб. матеріалів міжн. Симпозіуму. – Вінниця-Львів, 1998.
16. Бевз С. В. Системи відносних одиниць у критеріальних моделях задач оптимізації [Текст] / С. В. Бевз, В. В. Логвиненко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2001. –№ 6. – С. 168-173.

Karnaukh N.V. Theoretical study on reliability of fuel system of diesel transport means by fuel base expansion

The paper presents a structural analysis on how reliable is the diesel fuel system of the transport means. It results in a mathematical expression to identify the probability of reliable work of the fuel system and the probability of its elements' fault by operation using different kinds of fuel. The analysis formulates a criterion to optimize the mixed composition of fuel which allows to define percentage of bio-diesel in the mix using the conditions of minimizing fuel consumption, emissions of foul gases to the atmosphere and increasing torsional moment of the crankshaft.

Key words: bio-diesel, fault probability, fuel mix, fuel system modeling, optimization criterion, reliability, similarity theory.

References

1. Karnauh M. V. Rozshirennja palivnoi bazi avtomobil'nogo transportu shljahom zastosuvannja etilovih efiriv zhirnih kislot roslinnych olij, Vestn. HNADU, 2010, No. 49. pp. 47-51.
2. Bychenin A. P. Povyshenie resursa plunzhernyh par toplivnogo nasosa vysokogo davlenija traktornyh dizelej primeneniem smesevogo mineral'no-rastitel'nogo topliva : avtoref. dis. kand. tehn. nauk : 05.20.03, Penza, 2007.
3. Voronovskij I. B. Issledovanie iznosa plunzhernyh par tnvd raspredelitel'nogo tipa dvigatelja MTA. Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu sil's'kogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka, 2015, No. 156, pp. 385-389. Available at : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2015_156_59
4. Voronovskij I. B. Modelirovanie nadezhnosti i iznosa toplivnoj sistemy dizel'nogo dvigatelja MTA. Pr. Tavr. derzh. agrotehnol. un-tu, 2013, No.13, vol. 5, pp. 119-125.
5. Kjurchev S. V., Judovinskij V. B., Kolomoyec' V. A. Nadijnist' palivnoi sistemi DVZ, pracjujuchih na riznih vidah paliva. Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu sil's'kogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka, 2014, No. 148, pp. 314-321. – Available at : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2014_148_52.
6. Ventcel' E. S. Issledovanie operacij. Moscow: Sov. radio, 1972.
7. Poljanskij A. S. Formirovanie svojstv nadezhnosti avtotraktornyh dvigatelej v garantijnyj i poslegarantijnyj periody jekspluatacii : dis... d-ra tehn. nauk: 05.22.20; Har'kovskij nacional'nyj avtomobil'no-dorozhnyj un-t, Kharkiv, 2003.
8. Orlov A.I. Jekspertnye ocenki. Zavodskaja laboratorija, 1996, vol. 62. No.1, pp. 54-60.
9. Avtomobil' ZIL 5301 "Bychok" i ego modifikacii : rukovodstvo po jekspluatacii, remontu i tehn. Obsluzhivaniju. Moscow : Atlas-Press, 2005.
10. Vojtov V. A., Dacenko M. S., Karnauh M. V., Sorokin S. P. Osoblivosti ekspluatacii palivnoi aparaturi dizeliv sil's'kogospodars'kogo priznachennja pri zastosuvanni biologičnogo paliva. Naukovij visnik NUBiP Ukraïni, 2010, No. 144, pp. 29–32.
11. Vojtov V.A., Dacenko M.S. Doslidzhennja osoblivostej fil'tracii biodizelja cherez paperovi fil'tri tonkoï ochistki dizel'nih dviguniv. Konstrujuvannja, virobništvo ta ekspluatacija sil's'kogospodars'kih mashin, 2010, No. 40, vol. I, pp. 282-286.
12. Vojtov V. A., Dacenko M. S., Karnauh M. V., Sorokin S. P. Osoblivosti ekspluatacii palivnoi aparaturi dizeliv sil's'kogospodars'kogo priznachennja pri zastosuvanni biologičnogo paliva. Naukovij visnik NUBiP Ukraïni, 2010, No.144, pp. 29–32.
13. Levterov A.M., Marahovs'kij V.P., Savic'kij V.D. Vivchennja vplivu motornih vlastivostej biopaliva na energoekologični harakteristiki dizel'nogo dviguna. Avtomobil'nyj transport, 2012, No. 31, pp. 57-61.
14. Shevchenko O. B. Vlastivosti sumishevih dizel'nih paliv. Naukoyemni tehnologii,

2013, No. 1 (17), pp. 50-52

15. Bevz S.V. Uzagal'nennja podobnih javishh i procesiv pri modeljuvanni tehnicnih ob'yektiv. Nauka i pidpriemnictvo : zb. materialiv mizhn. simpoziumu. Vinnicja-L'viv, 1998.

16. Bevz S. V. Sistemi vidnosnih odinic' u kriterial'nih modeljah zadach optimizacii. Visnik Vinnic'kogo politehnicnogo institutu, 2001, No. 6, pp.168-173.