

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРИСПОСОБЛЕННОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ К ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Описаны этапы разработки и апробации методики оценки приспособленности автомобильных двигателей к изменяющимся условиям эксплуатации (на примере режима пуска) с использованием оригинального метода экспресс-анализа условий смазки в подшипниках коленчатых валов. Практическое использование методики позволяет повысить эксплуатационную долговечность автомобильных двигателей за счет снижения пусковых износов.

Ключевые слова: режим пуска, смазочный процесс, снижение пусковых износов, подшипники коленчатого вала

Изменяющиеся в широких пределах условия эксплуатации автомобилей отрицательно влияют на нормальное протекание процессов в системах и агрегатах, что ведет к снижению надежности и эффективности эксплуатации автомобильного транспорта. Сохранение номинальных значений параметров процессов зависит от специфического свойства автомобилей – приспособленности их систем и агрегатов к изменяющимся условиям эксплуатации.

Практика эксплуатации автомобилей свидетельствует о том, что долговечность автомобильных двигателей определяется, как правило, интенсивностью изнашивания незначительного количества подвижных сопряжений, в том числе шатунных и коренных подшипников скольжения коленчатого вала. Ускоренное изнашивание подшипников характерно для условий низкотемпературного пуска, состоящего из стадий запуска и прогрева, отличающегося существенными отклонениями параметров смазочного процесса от номинальных значений.

Несмотря на значительное количество работ и применение их результатов на практике и в нормативных документах, устанавливающих эксплуатационные требования к пусковым качествам автомобильных двигателей (ОСТ 37.001.052, РД 37.001.021 и др.), минимизация изнашивания пар трения двигателя на режимах пуска в эксплуатации не обеспечивается в полной мере, недостаточно сведений, как об оптимальных режимах прогрева, так и об их длительности.

Внедрение мероприятий по обеспечению высокой приспособленности автомобильных двигателей к режиму пуска по параметрам смазочного процесса в подшипниках коленчатого вала сдерживается несовершенством методик оценки приспособленности двигателя к изменяющимся условиям эксплуатации.

Анализ известных методов определения пусковых износов подвижных сопряжений двигателя показал, что основными их недостатками являются большие трудовые и материальные затраты при подготовке двигателей и проведении исследований. В связи с этим, целесообразнее использовать для определения изнашивания двигателя на режиме пуска методику безразборной оценки параметров смазочного процесса в системе подшипников коленчатого вала, описанную в работах [1-3]. В основе данной методики лежит расчетно-экспериментальное определение параметра относительной продолжительности существования смазочного слоя (параметра $P_{жс}$) в так называемом «эквивалентном подшипнике» с обобщенными свойствами всех подшипников системы. Для замера данного параметра используется автоматизированная система оценки смазочного процесса, разработанная на кафедре автомобильного транспорта ГОУ ВПО «Оренбургский государственный университет».

Исходя из вышеизложенного, представляет интерес исследование закономерностей смазочного процесса в подшипниках коленчатого вала в зависимости от значений параметров режима пуска (частоты вращения коленчатого вала при прогреве и начальной температуры двигателя и времени с начала прогрева), а также оценка приспособленности автомобильного двигателя к низкотемпературным условиям эксплуатации по параметрам смазочного процесса в подшипниках скольжения коленчатого вала для обеспечения снижения пусковых износов.

Оценку степени приспособленности автомобильного двигателя к режиму пуска предложено проводить с помощью коэффициента приспособленности $K_{пр}$, известного из положений теории приспособленности автомобилей, как отношение значения параметра $\Pi_{ст}$, получен-

ное в стандартных условиях эксплуатации к значению параметра $P_{нест}$, полученное в нестандартных условиях эксплуатации:

$$K_{np} = \frac{P_{ст}}{P_{нест}}, \quad (1)$$

В качестве сравниваемого параметра P обосновано использование параметра суммарной протяженности металлических контактов $L_{к\Sigma}$ между поверхностями трения подшипников за базовое время с начала прогрева. Обоснование основано на оценке изменения технического состояния подшипников коленчатого вала вследствие изнашивания при переходном смазочном процессе по модели, предложенной в работе [4]. Эта модель устанавливает для некоторого интервала времени функциональную связь между величиной линейного износа поверхностей трения и средним значением параметра относительной продолжительности существования смазочного слоя $P_{жс}$, обуславливающего величину суммарной протяженности металлических контактов. Параметр $P_{жс}$ принимает значение от 0 до 1 в зависимости от вида взаимодействия сопрягаемых поверхностей и его длительности. Значение $P_{жс} = 0$ свидетельствует о том, что в паре трения происходит постоянное контактное взаимодействие поверхностей в условиях сухого или граничного трения; $P_{жс} = 1$ – постоянное бесконтактное взаимодействие поверхностей в условиях жидкостного трения; $0 < P_{жс} < 1$ – последовательное во времени чередование контактного и бесконтактного видов взаимодействий в условиях переходного смазочного процесса.

Из теории трения, изнашивания и смазки известно, что интенсивность процессов изнашивания наибольшая при контактном взаимодействии поверхностей, относительная продолжительность которых равна $1 - P_{жс}$.

С учетом указанных исходных положений известная математическая модель изменения технического состояния подшипников коленчатого вала вследствие изнашивания при переходном смазочном процессе имеет вид:

$$I_{нсп} = \sum_{i=1}^m I_{нспi} = k \left(\frac{N}{ld} \right)^x \sum_{i=1}^m \frac{\pi d n_i}{60} (1 - P_{жи}), \quad (2)$$

где $I_{нсп}$ – величина линейного износа поверхностей трения, мкм;

d – диаметр шейки вала, мм;

l – опорная длина подшипника;

x – показатель степени, зависящий от вида фрикционных связей, $x \geq 1$;

m – количество интервалов времени;

N_i – внешняя нагрузка, действующая на подшипник на i -ом интервале времени, Н;

k – коэффициент пропорциональности между интенсивностью изнашивания с механическими фрикционными связями и нагрузкой N , приходящей на единицу площади скользящей поверхности (ld);

n_i – частота вращения вала на i -м интервале времени, мин⁻¹.

Анализ модели (2) показывает, что величина линейного износа $I_{нсп}$ пропорциональна значению суммарной протяженности контактов (параметра $L_{к\Sigma}$), определяемого по формуле:

$$L_{к\Sigma} = \sum_{i=1}^m \frac{(1 - P_{жи}) \pi d n_i}{60}. \quad (3)$$

Сделан вывод, что для сравнительного анализа смазочного процесса в подшипниках коленчатого вала при оценке приспособленности автомобильных двигателей к режиму пуска достаточно использовать значение параметра $L_{к\Sigma}$, полученное за базовое время с начала прогрева.

С учетом сомножителя $k \left(\frac{N}{ld} \right)^x$ появляется возможность для сравнительной оценки изменения величин линейного износа подшипников при различных условиях пуска.

Коэффициент K_{np} характеризует приспособленность только к одному конкретному режиму пуска, однако приспособленность двигателя по параметрам смазочного процесса зависит от температурно-скоростного режима прогрева, параметры которого являются детерминировано-случайными величинами. В связи с этим автором предложен обобщенный коэффициент приспособленности $K_{np.об}$, значение которого равно среднему значению коэффициента K_{np} в наиболее вероятном диапазоне температуры и частоты вращения коленчатого вала при прогреве.

Предложенный коэффициент приспособленности автомобильного двигателя к режиму пуска служит количественной мерой оценки способности системы смазки обеспечивать номинальные значения параметров смазочного процесса в подшипниках коленчатого вала с минимальной скоростью изнашивания в условиях пуска.

В основу экспериментальной методики оценки параметров смазочного процесса в подшипниках коленчатого вала при прогреве положена укрупненная модель, содержащая входные (начальная температура двигателя $t_{\text{дв}}$ и частота вращения коленчатого вала n) и выходные (параметр $P_{\text{жс}}$ и определяемая зависимость $L_{\text{к}\Sigma} = f(t_{\text{дв}}, n)$) переменные.

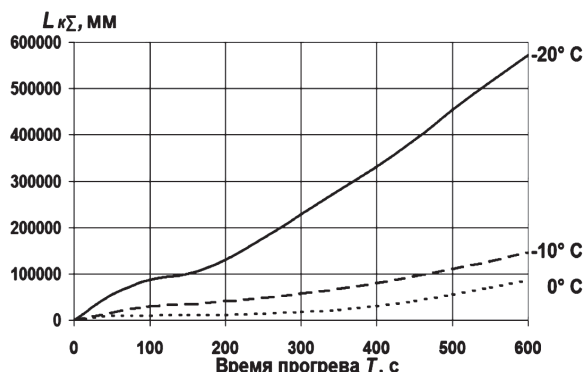
Из предварительно проведенного экспертного анализа было установлено, что большинство водителей прогревают двигатель на скоростных режимах от $n=1500 \text{ мин}^{-1}$ до $n=2500 \text{ мин}^{-1}$ длительностью 5...12 минут. Исходя из этого, были определены условия проведения экспериментальных исследований.

Все исследования проводились в полевых условиях на автомобильном двигателе 4Ч 7,6/8,0. Моторное масло использовалось полусинтетическое, класса вязкости по SAE 10W40. Нарботка двигателя на момент проведения исследований составляла около 25% от предельного ресурса. Продолжительность прогрева в одном опыте 10 мин. Минимальное необходимое количество повторных опытов на каждом температурно-скоростном режиме по результатам проведенных предварительных испытаний составило три. План полнофакторного эксперимента представлен в таблице 1.

Таблица 1. План эксперимента

	Начальная температура двигателя, °С*				
	-20	-15	-10	-5	0
1500 мин ⁻¹	+	+	+	+	+
2000 мин ⁻¹	+	+	+	+	+
2500 мин ⁻¹	+	+	+	+	+

* – величина отклонения начальной температуры двигателя от центральной точки при исследованиях составлял $\Delta = \pm 2^\circ\text{C}$

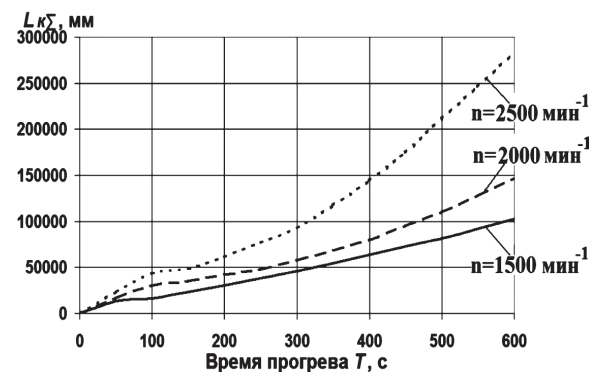


Двигатель находился не менее 24 часов в условиях окружающей среды, что обеспечивало достижение двигателем необходимой начальной температуры. За время прогрева с начала запуска значение параметра $P_{\text{жс}}$ замерялось с помощью автоматизированной системы оценки смазочного процесса [5]. Подвод питающего напряжения осуществлялся от анализатора режимов трения к блоку цилиндров и к носку коленчатого вала посредством установленного на него токосъемника [6]. От анализатора режимов трения информация о замеряемых параметрах поступала на устройство сопряжения с компьютером, отражалась на экране монитора и записывалась в файл с помощью разработанного программного обеспечения [7]. Частота вращения коленчатого вала контролировалась по автомобильному цифровому тахометру ТХ-517 с точностью $\pm 50 \text{ мин}^{-1}$. Температура охлаждающей жидкости двигателя контролировалась с помощью термопары и цифрового тестера MS 829 с погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}$.

По полученным экспериментальным данным параметра $P_{\text{жс}}$ проводился расчет параметра $L_{\text{к}\Sigma}$ по формуле 3. По результатам расчета были получены зависимости параметра $L_{\text{к}\Sigma}$ от времени с начала прогрева T . На рисунке 1 представлена зависимость параметра $L_{\text{к}\Sigma}$ от времени с начала прогрева для частных случаев: при $n=2000 \text{ мин}^{-1}$ для $t_{\text{дв}} = -20, -10$ и 0°C и при $t_{\text{дв}} = -10^\circ\text{C}$ для $n=1500, 2000$ и 2500 мин^{-1} .

Для других температурно-скоростных режимов зависимости суммарной протяженности контакта $L_{\text{к}\Sigma}$ от времени с начала прогрева T носят схожий характер.

Установлены характерные фазы протекания смазочного процесса в системе подшипни-

Рисунок 1. Зависимость суммарной протяженности контакта $L_{\text{к}\Sigma}$ в подшипниках коленчатого вала от времени с начала прогрева T

ков коленчатого вала автомобильного двигателя в зависимости от времени с начала прогрева на холостом ходу при частотах вращения коленчатого вала от 1500 до 2500 мин⁻¹ и предпусковой температуре двигателя от -20 до 0 °С.

Первая фаза I – фаза наиболее интенсивного изнашивания и высокой скорости изменения суммарной протяженности контакта в начальный период пуска из-за отсутствия смазки в парах трения. Вторая фаза II – фаза резкого уменьшения интенсивности изнашивания и скорости изменения суммарной протяженности контакта $L_{\kappa\Sigma}$ из-за возрастания давления масла и поступления его к парам трения. Третья фаза III – фаза монотонного возрастания скорости изменения суммарной протяженности контакта $L_{\kappa\Sigma}$ из-за снижения вязкости масла по мере его прогрева. Четвертая фаза IV – фаза постоянной скорости изменения суммарной протяженности контакта $L_{\kappa\Sigma}$ из-за стабилизации смазочного процесса, зазоров, температурного режима.

Сравнение зависимостей параметра $L_{\kappa\Sigma}$ и скорости его изменения от T экспериментально подтверждает теоретическую связь между параметром $L_{\kappa\Sigma}$ и износом пар трения при переходном смазочном процессе.

Полученные опытные значения суммарной протяженности контакта $L_{\kappa\Sigma}$ от начальной температуры двигателя $t_{об}$ при различных частотах вращения коленчатого вала n при прогреве представлены на рисунке 2.

На основе положительного результата проверки однородности дисперсии опытных точек по критерию Кохрена получены математические модели параметра $L_{\kappa\Sigma}$ для каждого из скоростных режимов:

$$\begin{aligned} L_{\kappa\Sigma 1500} &= 33664e^{-0,0881t_{об}}; \\ L_{\kappa\Sigma 2000} &= 76678e^{-0,0772t_{об}}; \\ L_{\kappa\Sigma 2500} &= 127406e^{-0,0747t_{об}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Произведена проверка адекватности математических моделей с помощью F -критерия Фишера.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что в условиях пуска суммарная протяженность контактов в подшипниках уменьшается в среднем в 3,2...3,3 раза при понижении частоты вращения вала с 2500 мин⁻¹ до 1500 мин⁻¹ на всем рассмотренном температурном диапазоне.

Практическое использование результатов исследования направлено на повышение долговечности автомобильных двигателей.

Разработана методика оценки степени приспособленности автомобильных двигателей к режиму пуска на основе экспресс-анализа смазочного процесса в подшипниках скольжения коленчатого вала при запуске и прогреве двигателя с помощью оригинального измерительно-вычислительного комплекса.

Количественной мерой оценки является коэффициент приспособленности, характеризующий степень увеличения скорости изнашивания подшипников коленчатого вала при изменяющихся температурных и скоростных условия пуска по сравнению с базовыми условиями пуска (предпусковая температура двигателя 0° С и частота вращения 1500 мин⁻¹), которые обеспечивают наименьшее изнашивание подшипников.

Алгоритм оценки степени приспособленности представлен на рисунке 3.

Принимая для $n=1500$ мин⁻¹ и $t_{об} = 0^\circ\text{C}$ значение оценочного параметра $L_{\kappa\Sigma}$ базовым, получены зависимости коэффициента приспособленности $K_{пр}$ двигателя 4Ч 7,6/8,0 к темпера-

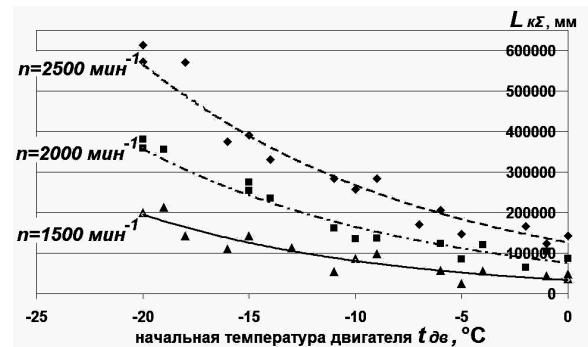


Рисунок 2. Зависимости $L_{\kappa\Sigma}$ от начальной температуры двигателя $t_{об}$ при различных частотах вращения коленчатого вала n при прогреве

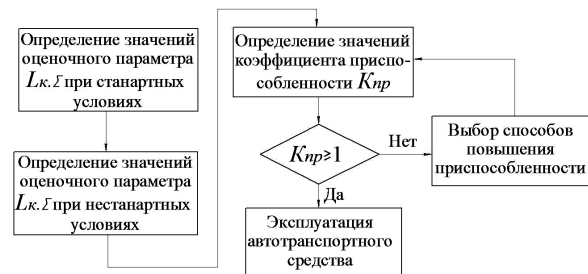


Рисунок 3. Алгоритм оценки степени приспособленности автомобильного двигателя к режиму пуска по параметрам смазочного процесса в подшипниках коленчатого вала

турно-скоростным режимам пуска, представленные на рисунке 4.

Математические модели коэффициента приспособленности K_{np} от начальной температуры двигателя $t_{об}$ имеют экспоненциальный вид:

$$\begin{aligned} K_{np1500} &= e^{0,088t_{об}}; \\ K_{np2000} &= 0,439e^{0,0772t_{об}}; \\ K_{np2500} &= 0,264e^{0,0747t_{об}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Математические модели коэффициента приспособленности K_{np} от частоты вращения коленчатого вала n при различных температурах двигателя $t_{об}$ имеют полиномиальный вид:

$$\begin{aligned} K_{np-20^{\circ}C} &= 9 \cdot 10^{-8} n^2 - 0,0005n + 0,6709; \\ K_{np-15^{\circ}C} &= 2 \cdot 10^{-7} n^2 - 0,0008n + 1,1207; \\ K_{np-10^{\circ}C} &= 3 \cdot 10^{-7} n^2 - 0,0014n + 1,8569; \\ K_{np-5^{\circ}C} &= 5 \cdot 10^{-7} n^2 - 0,0023n + 3,0558; \\ K_{np0^{\circ}C} &= 8 \cdot 10^{-7} n^2 - 0,0038n + 4,9999. \end{aligned} \quad (6)$$

Полученные зависимости указывают на нелинейное изменение коэффициента приспособленности двигателя к режиму пуска по параметрам смазочного процесса – с увеличением температуры двигателя и понижением частоты вращения коленчатого вала значение коэффициента приспособленности увеличивается более интенсивно.

Для исследуемого температурно-скоростного диапазона $t_{об} = -20^{\circ} \dots 0^{\circ}C$ и $n = 1500 \dots 2500 \text{ мин}^{-1}$ обобщенный коэффициент приспособленности двигателя $K_{np, об} = 7,6/8,0$ в базовой комплектации составляет $K_{np, об} = 0,29$. Данный результат указывает на достаточно низкую степень приспособленности исследуемого двигателя к режиму пуска при отрицательных температурах.

Предложено требование к эксплуатационным свойствам автомобильных двигателей – в условиях пуска система смазки должна обеспечивать высокую сохранность номинальных значений параметров смазочного процесса в подшипниках коленчатого вала. Двигатели легковых автомобилей ВАЗ рекомендуется прогревать при частоте вращения коленчатого вала $n=1500 \text{ мин}^{-1}$. Это обеспечит при однократном пуске двигателя в условиях Оренбургской области уменьшение интенсивности изнашивания подшипников в 6,3...8,2 раза в диапазоне температур от -20 до $0^{\circ}C$, а доля дисковых износов подшипников в общем эксплуатационном износе снизится в 3,3 раза по сравнению с режимом $n=2000 \text{ мин}^{-1}$ и 7,3 раза по сравнению с режимом $n=2500 \text{ мин}^{-1}$.

Установлено также, что прогрев на режиме $n=1500 \text{ мин}^{-1}$ по сравнению с режимом $n=2000 \text{ мин}^{-1}$ снизит затраты на эксплуатацию на 312,5 руб./год, а по сравнению с $n=2500 \text{ мин}^{-1}$ – на 3192,5 руб./год за счет повышения ресурса двигателя.

Полученные результаты и предложенная методика оценки приспособленности к режиму пуска [8] позволяют повысить эффективность эксплуатации автомобильных двигателей. Источником эффективности является увеличение ресурса двигателя вследствие снижения пусковых износов подшипников скольжения коленчатого вала за счет повышения приспособленности двигателя к режиму пуска и введения нового эксплуатационного требования к автомобильным двигателям, устанавливающего малоизносный режим прогрева.

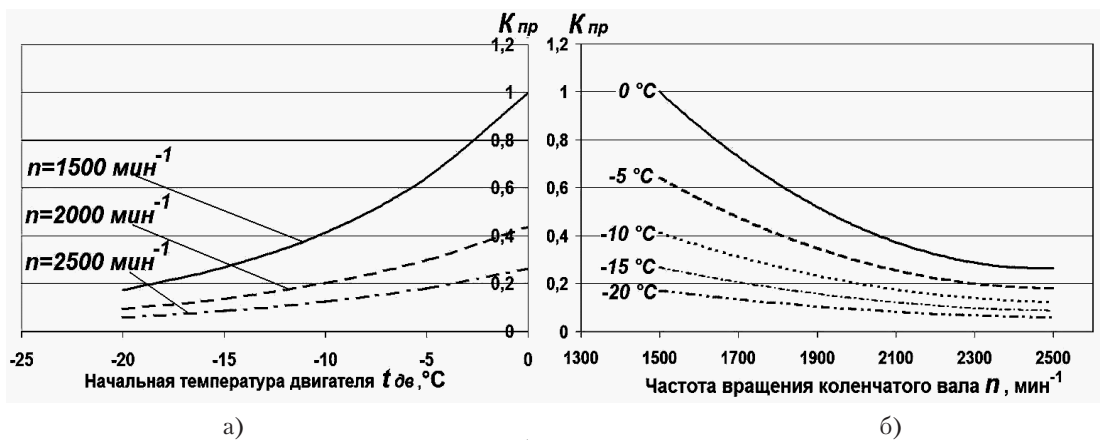


Рисунок 4. Зависимости коэффициента приспособленности K_{np} от: а) начальной температуры двигателя на различных частотах вращения коленчатого вала при прогреве; б) частоты вращения коленчатого вала при прогреве при различных начальных температурах двигателя

Список использованной литературы:

- 1 Калимуллин, Р.Ф. Расчетная оценка условий смазки коренных подшипников автомобильных двигателей /Р.Ф. Калимуллин, Н.Н. Якунин//Вестник Оренбургского государственного университета, 2000. – №1. – С. 54 – 58.
- 2 Калимуллин, Р.Ф. Метод оценки трибологического состояния подвижных сопряжений автомобильных двигателей/Р.Ф. Калимуллин, Н.Н. Якунин, И.В. Тюняев//Вестник Оренбургского государственного университета, 2005. – №12 (Приложение «Прогрессивные технологии в транспортных системах»). – С.50 – 55.
- 3 Калимуллин, Р.Ф. Совершенствование методики оценки качества приработки подшипников коленчатых валов автомобильных двигателей/Р.Ф. Калимуллин, А.П. Фот, Н.Н. Якунин//Вестник Оренбургского государственного университета, 2006. – №9. – С.335 – 342.
- 4 Бондаренко, В.А. Повышение долговечности транспортных машин: учебное пособие для вузов / В.А. Бондаренко, К.В. Щурин, Н.Н. Якунин и др.; под ред. В.А. Бондаренко. – М.: Машиностроение, 1999. – 144 с.
- 5 Патент RU№66046 U1, МПК G 01 M 13/04. Устройство для контроля состояния подшипников / Р.Ф. Калимуллин, С.Ю. Коваленко, С.Б. Цибизов, М.Р. Янучков (РФ). – №2007112656/22. – Заявлено 04.04.2007 – Решение о выдаче патента от 04.04.2007 г. – Оpubл. 27.08.2007г., Бюл. №24. – 3 с.: ил.
- 6 Патент RU№70414 U1, МПК H 01 R 39/64. Ртутный токосъемник/Р.Ф. Калимуллин, С.Ю. Коваленко, С.Б. Цибизов, М.Р. Янучков (РФ). – №2007136773/22. – Заявлено 03.10.2007 – Решение о выдаче патента от 03.10.2007 г. – Оpubл. 20.01.2008 г., Бюл. №2. – 2 с.: ил.
- 7 Свид. об отрасл. рег. разработки №7845 «Программное обеспечение для автоматизированной системы оценки смазочного процесса»/Р.Ф. Калимуллин, С.Ю. Коваленко, С.Б. Цибизов, М.Р. Янучков.; заявитель и обладатель ГОУ ВПО «Оренбургский государственный университет». – №50200700519; зарегист. 12.03.2007. – 3 с.
- 8 Якунин, Н.Н. Оценка приспособленности автомобильных двигателей к режимам пуска и прогрева по параметрам смазочного процесса в подшипниках коленчатого вала / Н.Н. Якунин, Р.Ф. Калимуллин, С.Ю. Коваленко//Транспорт Урала. – 2008. – №2. – С. 110 – 114.