

Моделирование процесса изнашивания в трибосопряжениях двигателя лесозаготовительной техники по концентрации продуктов износа в моторном масле

М.А. Рассохин^a, А.В. Юркин^b, А.С. Первалов^c

Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, ул. Мира, 22, Екатеринбург, Россия

^a Rassohin.maxim@mail.ru, ^b yurkin1990@mail.ru, ^c pas_ural@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-9800-9374>,

^b <https://orcid.org/0000-0002-4571-4109>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-5426-2992>

Статья поступила 21.10.2019, принята 16.11.2019

В статье предложен метод определения износа двигателя внутреннего сгорания (ДВС) лесозаготовительных машин при пуске и последующем прогреве в условиях отрицательных температур окружающего воздуха. В настоящее время большинство теоретических исследований направлено на отыскание оптимальной толщины слоя смазки в трибосопряжениях, когда определение износа производится по изменению геометрических размеров трущихся поверхностей. Исследования с использованием подобных методик не позволяют в полном объеме определить суммарный износ механизмов и узлов ДВС, что, в свою очередь, не дает возможности оценить в полной мере влияние эксплуатационных, технологических, а также конструктивных факторов на величину износа всех деталей двигателя. Установлено, что наибольший износ происходит при пуске и прогреве двигателя, особенно в условиях отрицательных температур. Применение всевозможных систем облегчения пуска решает проблему увеличения износа не в полной мере. Для определения рационального режима пуска и прогрева авторами предложена методика определения суммарной величины изнашивания трибосопряжений ДВС в период пуска и прогрева двигателя по содержанию индикаторов износа в картерном масле. Определение массовой доли индикаторов износа проводилось при помощи метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой, в статье приводятся результаты испытаний пробы масла. Рассмотрена структура решения задачи по определению динамики накопления продуктов изнашивания в картерном масле, приведена методика расчета поступления индикаторов износа в систему смазки двигателя, которая учитывает влияние различных факторов на процесс накопления частиц металла в моторном масле. Сведения, полученные в результате теоретических и практических исследований, позволяют выбрать наиболее рациональный режим пуска и прогрева ДВС.

Ключевые слова: двигатель; индикаторы износа; моторное масло; спектральный анализ.

Modeling the process of wear in tribological conjugations of the engine of logging equipment by the concentration of wear products in motor oil

M.A. Rassokhin^a, A.V. Yurkin^b, A.S. Perevalov^c

Ural Institute of State Firefighting Service of Ministry of Russian Emergency Situations Ministry;
22, Mira St., Yekaterinburg, Russia

^a Rassohin.maxim@mail.ru, ^b yurkin1990@mail.ru, ^c pas_ural@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-9800-9374>,

^b <https://orcid.org/0000-0002-4571-4109>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-5426-2992>

Received 21.10.2019, accepted 16.11.2019

The article proposes a method for determining the wear of an internal combustion engine (ICE) of forest machines during start-up and subsequent heating under conditions of negative ambient temperatures. Currently, most theoretical studies are aimed at finding the optimal thickness of the lubricant layer in tribological conjugations, when wear is determined by changing the geometric dimensions of the rubbing surfaces. Studies using such methods do not allow to fully determine the total wear of the engines and components of the internal combustion engine, which, in turn, does not make it possible to fully assess the impact of operational, technological, as well as structural factors on the wear rate of all engine parts. It has been established that the greatest wear occurs during engine start-up and warm-up, especially at low temperatures. The use of various start-up facilitation systems does not fully solve the problem of increased wear. To determine the rational start-up and warm-up mode, the authors proposed a method for determining the total wear value of ICE tribo-joints during the start-up and warm-up period of the engine by the content of wear indicators in crankcase oil. The mass fraction of wear indicators was determined using the method of atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma; the article presents the results of tests of an oil sample. The structure of solving the problem of determining the dynamics of the accumulation of wear products in crankcase oil is considered. The method for calculating the receipt of wear indicators in the engine lubrication system is

presented, which takes into account the influence of various factors on the accumulation of metal particles in engine oil. Information obtained as a result of theoretical and practical research makes it possible to choose the most rational mode for starting and warming up the internal combustion engine.

Keywords: engine; wear indicators; engine oil; spectral analysis.

Введение. Производительность труда в лесной промышленности напрямую зависит от технического уровня лесозаготовительной техники. На сегодняшний день, по наблюдениям Центрального научно-исследовательского института механизации и энергетики лесной промышленности (ЦНИИМЭ), в лесной отрасли используется около 20 тыс. единиц техники, произведенной в России. Основными поставщиками лесозаготовительной техники отечественного производства являются ПАО «Абаканский опытно-механический завод», ООО Завод «Алтайлесмаш», ООО фирма «Лес-техком», которые представляют около 30 модернизированных моделей различной техники для заготовки леса. В качестве базовых машин вышеперечисленные производители используют тракторы ЛТК-08, ТЛ-5, АЛМ-01 (модернизированный ТТ-4), Т-147 и др. Как известно, наиболее сложным и, соответственно, дорогим агрегатом любого базового шасси, используемого в составе лесозаготовительных машин, является двигатель внутреннего сгорания (ДВС). Одной из основных целей повышения технического уровня ДВС является увеличение безотказности и ресурса двигателя. Если принять стоимость изготовления двигателя за 100 %, то затраты на техническое обслуживание могут достигать 250, а на ремонт — 650 % [1], следовательно, поддержание надежности двигателя в период эксплуатации может в несколько раз превышать затраты на его изготовление.

Долговечность ДВС напрямую связана с надежностью сложнагруженных трибосопряжений. Именно состояние пар трения в наибольшей степени определяет ресурс автотракторных двигателей. В свою очередь, долговечность трибосопряжений определяется влиянием следующих факторов:

- конструктивные факторы (условия смазки и рациональность пар трения, тепловое состояние деталей двигателя, качество работы системы очистки масла и др.);
- технологические факторы (качество сборки и обкатки, точность и допуск обработки, свойства материалов и т. п.);
- эксплуатационные факторы (режим работы, условия эксплуатации, качество ремонта и обслуживания, уровень подготовки персонала, задействованного в эксплуатации).

Конструктивные факторы являются первичными по отношению к другим и определяются конструктором ДВС. Технологические факторы зависят от качества сборки, уровня подготовки персонала моторостроительного предприятия, оснащенности производства. Влияние на сохранение долговечности, заложенной конструктором и технологом, оказывают эксплуатационные факторы, в свою очередь, зависящие от потребителей ДВС.

В работах [2; 3; 6; 8; 17] отмечается, что наибольший износ пар трения ДВС происходит в момент пуска и последующего прогрева двигателя. Это связано с не-

достатком смазочных материалов в узлах трения, что приводит к увеличению изнашивания деталей двигателя по сравнению с работой в номинальном режиме. Существенное влияние на износы в данный момент оказывают выбранный режим прогрева и тепловое состояние двигателя в момент пуска.

Режим работы ДВС характеризуется развиваемой мощностью, рабочими температурами охлаждающей жидкости и моторного масла, частотой вращения коленчатого вала. Существуют оптимальные значения каждого из этих показателей, при учете которых возможно повысить эффективность использования и долговечность двигателя. Определить рациональные значения возможно, исследуя динамику поступления продуктов износа в моторное масло в зависимости от выбранного режима пуска и прогрева.

Из вышесказанного очевидно, что исследования, направленные на уменьшение износа двигателя при пуске и последующем прогреве, являются актуальными.

На основании анализа работ [2–5; 15–16] авторы пришли к выводу, что наиболее оптимальным способом для определения рационального режима пуска и прогрева ДВС по параметрам износа является метод спектрального анализа. Его применение для диагностирования двигателя позволяет производить комплексную оценку работы трибосопряжений в различных условиях, используя в качестве диагностического параметра величину концентрации продуктов износа в пробе моторного масла [7–10; 11–14].

Для выбора рационального режима пуска и прогрева двигателя необходимо получить зависимость изменения концентрации индикаторов износа в пробе масла от условий пуска и последующего прогрева. Более качественная оценка степени изношенности деталей за пуск и прогрев возможна только с учетом следующих особенностей:

- в процессе работы ДВС индикаторы износа постоянно перераспределяются в масляной системе двигателя;
- достаточно сложно точно оценить, какая деталь изнашивается в большем объеме, так как различные группы деталей могут содержать одни и те же металлы. К примеру, алюминий Al может содержаться в составе поршней, коренных и шатунных подшипников, подшипников распределительного вала, топливного насоса;
- в процессе эксплуатации ДВС в связи с недостаточной герметичностью или в процессе угара может меняться объем моторного масла.

Кроме того, изменение объема моторного масла будет происходить при замене отработанного моторного масла новым, а также при компенсации масла, утраченного в процессе угара и утечек.

Решение задачи выбора рационального режима пуска и прогрева двигателя необходимо начать с разработки математической модели накопления продуктов износа в системе смазки ДВС, учитывающей указанные выше особенности.

Методика исследования. Основной трибологической задачей моторных масел считается гарантия надежности всех пар трения в различных условиях эксплуатации. Кроме классической трибологической задачи, моторные масла должны выполнять множество дополнительных функций — препятствовать коррозии и окислительным процессам, уплотнять поршень в цилиндре ДВС, охлаждать поверхности, транспортировать продукты износа, шлам и сажу на фильтрующий элемент масляного фильтра и др.

Учитывая большое количество функций моторного масла, можно сделать вывод, что смазочные материалы, находящиеся в работе, являются носителями комплексной информации о работе двигателя. Исследуя масла, находящиеся в работе, можно определять интенсивность изнашивания пар трения, работоспособность смазочной системы, системы фильтрации воздуха, подачи топлива, находить отклонения в рабочем процессе ДВС и т. д.

Применение стандартного метода многоэлементного анализа использованных и неиспользованных смазочных масел и базовых масел (ASTM D 5185) позволяет производить качественный и количественный анализ моторного масла. Для определения рационального режима пуска и прогрева двигателя по содержанию продуктов износа предлагается учитывать массовую долю индикаторов износа в пробе масла, полученную с помощью метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС). Пример результатов анализа пробы масла представлен в табл. 1. Данные о степени деградации присадок и доле загрязнения являются диагностическими параметрами моторного масла, определяющими его качественное состояние, и при моделировании процесса изнашивания в данной работе не учитывались.

Таблица 1
Результаты, полученные в ходе обработки пробы масла методом ИСП-АЭС

Лабораторный номер 1546/1	Номер пробы 10/1
---------------------------	------------------

Наименование показателя, мг/кг	Метод испытания	Результат анализа пробы
1. Индикатор износа		
Массовая доля железа (Fe)	ASTM D 5185	9
Массовая доля цинка (Zn)	ASTM D 5185	837
Массовая доля хрома (Cr)	ASTM D 5185	0
Массовая доля свинца (Pb)	ASTM D 5185	2
Массовая доля меди (Cu)	ASTM D 5185	4
Массовая доля олова (Sn)	ASTM D 5185	0
Массовая доля алюминия (Al)	ASTM D 5185	6
Массовая доля никеля (Ni)	ASTM D 5185	0
Массовая доля титана (Ti)	ASTM D 5185	0
Массовая доля ванадия (V)	ASTM D 5185	0
Массовая доля марганца (Mn)	ASTM D 5185	0
2. Элементы присадок		
Массовая доля молибдена	ASTM D 5185	1

(Mo)		
Массовая доля бора (B)	ASTM D 5185	6
Массовая доля магния (Mg)	ASTM D 5185	11
Массовая доля кальция (Ca)	ASTM D 5185	2 289
Массовая доля фосфора (P)	ASTM D 5185	712
3. Загрязнение		
Массовая доля натрия (Na)	ASTM D 5185	2
Массовая доля калия (K)	ASTM D 5185	2
Массовая доля кремния (Si)	ASTM D 5185	8

В первом пункте табл. 1 указаны значения массовой доли индикаторов износа, полученные в результате исследования одной пробы. Для определения динамики накопления ферромагнитных частиц в картерном масле необходимо провести ряд пусков и прогревов ДВС с отбором проб после каждого цикла. Определение наиболее рационального режима пуска и прогрева станет возможным после построения модели изнашивания трибосопряжений двигателя, в зависимости от начальной температуры масла и условий прогрева.

Методика решения задачи по определению динамики концентрации продуктов изнашивания в моторном масле указана на рис. 1.

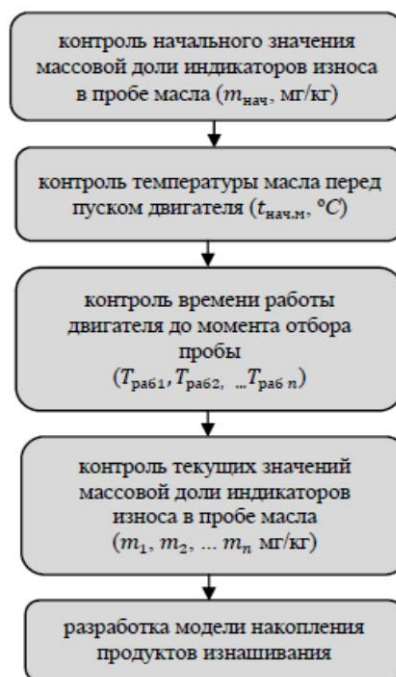


Рис. 1. Структура решения задачи

Начальное значение массовой доли продуктов износа $m_{нач}$ определяется по результатам анализа пробы, отобранной после смены масла, до пуска двигателя. Далее измеряется температура масла перед пуском ДВС $t_{нач.м.}$, осуществляются пуск и прогрев, при этом учитывается частота вращения коленчатого вала в период прогрева. После прогрева масла до рабочей температуры $t_{раб}$ двигатель глушится, из картера берется проба масла для анализа, затем производится долив моторного масла до положенного значения. В дальнейшем, после того, как температура масла достигнет

начального значения, цикл повторяется. В ходе эксперимента прогрев двигателя осуществляется в различных режимах, изменяется и начальная температура масла. После обработки проб моторного масла методом ИСП-АЭС полученные значения используются для математического моделирования процесса изнашивания ДВС при пуске и прогреве.

В связи с тем, что отбор проб осуществляется из картера двигателя, а также для более качественной оценки концентрации продуктов износа в масле необходимо учитывать маслообмен, происходящий в системе смазки ДВС.

В процессе работы двигателя происходит износ трущихся деталей, оторвавшиеся от поверхностей трибосопряжений частицы металла попадают в смазочный материал. В дальнейшем частицы износа циркулируют по системе смазки, частично оседая на деталях смазочной системы и фильтрующих элементах системы очистки.

Динамика изменения концентрации продуктов износа в картере двигателя будет зависеть от скорости поступления частиц износа в масляную систему, эффективности работы системы очистки и других факторов (рис. 2).

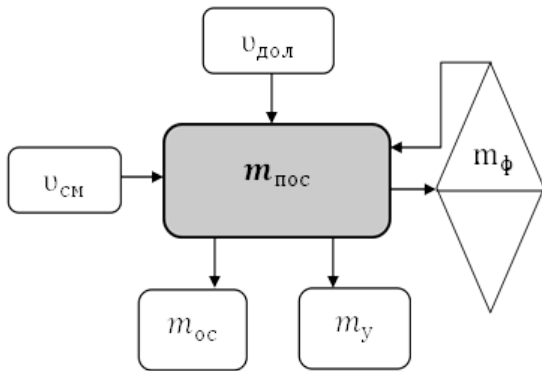


Рис. 2. Схема маслообмена в картере ДВС: $u_{сн}$ — масло, поступившее в результате смены; $u_{дол}$ — масло, поступившее в результате доливки; $m_{пос}$ — массовая доля частиц износа, поступивших в моторное масло; $m_{ос}$ — масса частиц износа, потерянных в результате осаждения на стенки элементов масляной системы; $m_{у}$ — масса частиц износа, потерянная в результате угара или утечки масла; $m_{ф}$ — масса частиц износа, осаждаемая в системе очистки масла

Масса m частиц металла, поступивших в систему смазки в результате износа трибосопряжений за период проведения одного эксперимента, рассчитывается по формуле, мг:

$$m = m_k + m_{ос} + m_{у} + m_{ф}, \quad (1)$$

где m_k — масса частиц износа, находящихся в масле на период контроля, мг.

Масса частиц износа, находящихся в моторном масле в момент отбора пробы, мг:

$$m_k = K_n (M_{мот.л} - M_{мот.у} T_{раб}), \quad (2)$$

где K — суммарная массовая доля индикаторов износа в пробе масла на момент отбора пробы, мг/кг; n — номер отобранной пробы; $M_{мот.л}$ — масса моторного

масла, залитого в систему смазки двигателя перед экспериментом, кг; $M_{мот.у}$ — масса моторного масла, потерянного на угар и течь через неплотности системы смазки, кг/мин; $T_{раб}$ — время работы двигателя с момента пуска до момента отбора пробы, мин.

Определение массы металла, осевшего на элементы системы смазки, принимается как 5 % от общей массы частиц износа [15].

Масса частиц износа, потерянная в результате утечек масла или угара, рассчитывается по формуле, мг:

$$m_{у} = K_n (M_{мот.у} T_{раб}). \quad (3)$$

Массу частиц отфильтрованного металла можно определить по следующей формуле:

$$m_{ф} = \sum_{i=0}^n \left(\frac{m_{ф}^{(i)}}{\sum_{i=0}^n K_{ср}^{(i)}} \right) \frac{[K_n + K_j \frac{(M_{мот.л} - M_{мот.у})}{M_{мот.л}}]}{2}. \quad (4)$$

В работе [15] отмечается, что основная масса частиц износа (до 80 %), поступивших в систему очистки масла, имеет размер до 10 мкм; степень фильтрации фильтра грубой очистки, применяемого на стендовом двигателе ЯМЗ-236Б, составляет 56 мкм.

Формулы (1) – (4) позволяют с достаточной точностью определить массу частиц металла, поступающих в период проведения эксперимента. Для дальнейшего определения процесса износа деталей ДВС и выбора наиболее рационального режима пуска и прогрева необходимо учесть данные о динамике накопления ферромагнитных частиц в картерном масле.

Оценка динамики концентрации продуктов износа в моторном масле между отборами проб возможна с помощью следующих формул.

Динамика приращения частиц износа в моторном масле, мг/мин:

$$A = \frac{m_i^E - m_{пд}}{T_{i+1} - T_i}, \quad (5)$$

где m_i^E — массовая доля частиц износа до долива масла, мг/кг; $m_{пд}$ — массовая доля частиц износа после долива масла, мг/кг; T_{i+1} — время работы двигателя на предыдущий период контроля, мин; T_i — время работы двигателя до следующего периода контроля, мин.

Массовая доля частиц износа в моторном масле до момента долива:

$$m_i^E = \frac{m_i^n M_{мот.л} - M_{мот.д} m_{пд}}{M_{мот.л} - M_{мот.д}}, \quad (6)$$

где $M_{мот.л}$ — масса залитого перед экспериментом моторного масла, кг; $M_{мот.д}$ — масса моторного масла, доливаемого в ходе эксперимента, кг; массовая доля частиц износа в моторном масле после долива:

$$m_i^n = m_{i+1}^E - A(T_{i+1} - T_i), \quad (7)$$

где m_{i+1}^E — массовая доля продуктов износа до долива масла.

Предложенная методика расчета количества продуктов износа, поступающих в моторное масло, позволяет оценить интенсивность изнашивания деталей двигателя. При определении рационального режима пуска и про-

грева целесообразно иметь диаграмму, отражающую динамику изменения концентрации продуктов износа в картерном масле в зависимости от начальной температуры двигателя при пуске, времени прогрева и вращения коленчатого вала в процессе разогрева двигателя.

Наряду с режимом пуска и прогрева, на степень износа деталей оказывают влияние физико-химические свойства моторного масла. Производитель рекомендует несколько видов смазочных материалов с различной вязкостью. В связи с этим существует практический интерес к определению динамики изнашивания в условиях применения масел, имеющих различный класс вязкости.

Углубление исследования предполагает изучение динамики износа конкретных деталей. Такая возможность имеется в связи с различием материалов, применяемых при изготовлении конкретных деталей. Многие изделия, применяемые в конструкции двигателя, изготовлены из одного металла, но могут иметь различные покрытия. В качестве примера в табл. 2 приведены индикаторы износа, характеризующие степень износа конкретных деталей ДВС.

Таблица 2

Частицы износа, характеризующие изнашивание конкретных деталей

Элементы износа	Деталь, содержащая данные металлы
Железо (Fe)	Шестерни распределителя, коленчатый вал, поршневые кольца, гильзы цилиндров, цепи привода, звездочки
Алюминий (Al)	Вкладыши коленчатого вала, поршни, подшипники распределительного вала
Медь (Cu)	Подшипники распределительного вала, втулки (топливного насоса, масляного насоса и распределителя зажигания)
Хром (Cr)	Поршневые кольца
Свинец (Pb)	Вкладыши коленчатого вала
Олово (Sn)	Поршни

Анализ поступления продуктов износа различных элементов дает возможность определения динамики износа конкретной детали или механизма. В дальнейшем, по результатам поэлементного контроля, возможна разработка меры по повышению надежности узлов трения и эффективности системы смазки ДВС.

Выводы.

1. Используя моторное масло в качестве носителя информации об интенсивности изнашивания трибосопряжений двигателя и опираясь на полученные по результатам расчетов данные о динамике роста продуктов износа в моторном масле, можно определить наиболее рациональный режим пуска и прогрева двигателя лесозаготовительной машины. В результате появляется возможность повысить долговечность деталей двигателя и, как следствие, снизить затраты на ремонт и техническое обслуживание автотракторного парка.

2. Определив динамику суммарных износов двигателя в процессе пуска и прогрева, можно обозначить оптимальное время прогрева, при достижении которого возможна работа ДВС под нагрузкой без увеличения износа пар трения. Снижение времени прогрева приведет, в свою очередь, к экономии топлива и уве-

личению времени полезной работы лесозаготовительной машины.

3. Дальнейшее изучение характера износа отдельных деталей позволит провести анализ эффективности работы системы смазки в отношении большинства трибосопряжений.

Литература

1. Суркин В.И., Курчатова Б.В. Смазка тракторных дизелей: моногр. Челябинск: Изд-во ЧГАУ, 2009. 226 с.
2. Рассохин М.А., Сащенко В.Н., Пушкарев А.Г., Пастухов К.В. Применение метода спектрального анализа картерного масла для определения рациональных режимов пуска и прогрева двигателей лесозаготовительных машин // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 1(41). С. 107–111.
3. Первалов А.С., Рассохин М.А., Жилин М.А., Сащенко В.Н. Повышение готовности пожарных автомобилей за счет внедрения методов диагностирования двигателей по анализу параметров картерного масла // Техносферная безопасность. 2015. № 4(9). С. 50–54.
4. Рассохин М.А., Сащенко В.Н., Пушкарев А.Г., Пастухов К.В. Определение износов деталей двигателя внутреннего сгорания методом безразборного контроля // Надежность и долговечность машин и механизмов: сб. материалов X Всерос. науч.-практ. конф. / Иван. пожар.-спасательная акад. ГПС МЧС России. Иваново, 2019. С. 156–160.
5. Рассохин М.А., Елесина Ю.К., Пастухов К.В., Сащенко В.Н., Юркин А.В. Определение рациональных режимов пуска и прогрева двигателей внутреннего сгорания методом безразборного контроля величины износа трибосопряжений // Промышленная безопасность и охрана труда: практика, обучение, инновации: сб. материалов междунар. заочной науч.-практ. конф. Минск, 2019. С. 70–72.
6. Федюнин П.И., Матяш С., Байкалов К.В., Речкин С., Вальков В.А. Проблемы тепловой подготовки автотракторных двигателей в условиях отрицательных температур // Сиб. вестн. сельскохоз. науки. 2007. № 8(176). С. 95–101.
7. Yasin Mohd Hafzil Mat. Study of Diesel-biodiesel Fuel Properties and Wavelet Analysis on Cyclic Variations in a Diesel Engine // Energy procedia. 2017. Vol. 110. P. 498–503.
8. Охотников Б.Л., Бердышев И.В. Проблемы, связанные с эксплуатацией ДВС при низкой температуре окружающего воздуха, и пути их преодоления // Автотранспортное предприятие. 2011. № 4. С. 46–48.
9. Zhan Honglei. The spectral analysis of fuel oils using terahertz radiation and chemometric methods // Journal of physics. 2016. № 39. P. 42–57.
10. Ревякин М.М. Реализация назначенного ресурса двигателя путем контроля условий эксплуатации по параметру удельного химмотологического показателя моторного масла // Агротехника и энергообеспечение. 2017. № 2(15). С. 62–67.
11. Hao Y. Guang Construction and Simplification of the Calibration Model for Spectral Analysis of Fuel Oil Properties Based on Mutual Information Method // Journal of physics. 2012. № 1. P. 175–178.
12. Владимиров Д.И., Никоноров А.Н. Диагностирование дизелей по соотношению концентраций продуктов изнашивания в работавшем моторном масле // Евразийский научный журнал. 2016. № 10. С. 294–296.
13. Овчаренко С.М., Минаков В.А. Моделирование формирования концентрации продуктов износа в моторном масле дизеля с учетом внешних факторов // Проблемы машиноведения: материалы II междунар. науч.-техн. конф. Омский гос. техн. ун-т. Омск, 2018. С. 98–103.
14. Mello Paola A., Pereira Juliana S.F., Mesko Marcia F., Mesko Juliano S. Barin, Erico Flores M.M. Sample preparation methods for subsequent determination of metals and non-metals

in crude oil – A review // *Analytica Chimica Acta*. 2012. Vol. 746. P. 15–36.

15. Matusiewicz H., Barnes R. Evaluation of a controlled-temperature furnace atomizer as a sampling device for inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry // *Spectrochim. Acta. B*. 1985. Vol. 40. № 1–2. P. 29–39.

16. Weinreb K. Diagnostics of an induction-motor rotor by the spectral analysis of stator currents // *Thermal engineering*. 2013. № 14. P. 1006–1023.

References

1. Surkin V.I., Kurchatov B.V. Lubrication of tractor diesel engines: monogr. Chelyabinsk: Izd-vo CHGAU, 2009. 226 p.

2. Rassokhin M.A., Sashchenko V.N., Pushkarev A.G., Pastuhov K.V. Application of the method of spectral analysis of crankcase oil to determine the rational modes of start-up and warm-up of engines of forest machines // *Systems. Methods. Technologies*. 2019. № 1(41). P. 107–111.

3. Perevalov A.S., Rassokhin M.A., Zhilin M.A., Sashchenko V.N. Improving the readiness of fire trucks through the introduction of methods for diagnosing engines to analyze the parameters of crankcase oil // *Technosphere Safety. XXI Century*. 2015. № 4(9). P. 50–54.

4. Rassokhin M.A., Sashchenko V.N., Pushkarev A.G., Pastuhov K.V. Determination of the wear parts of an internal combustion engine method cip control: sb. materialov X Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. / Ivan. pozhar.-spasatel'naya akad. GPS MCHS Rossii. Ivanovo, 2019. P. 156–160.

5. Rassokhin M.A., Elesina Yu.K., Pastuhov K.V., Sashchenko V.N., Yurkin A.V. The definition of rational modes start-up and warming internal combustion engines by the method of in-place control the magnitude of wear of friction units // *Promyshlennaya bezopasnost' i ohrana truda: praktika, obuchenie, innovacii: sb. materialov mezhdunar. zaochnoj nauch.-prakticheskoy konf. Minsk*, 2019. P. 70–72.

6. Fedyunin P.I., Matyash S., Bajkalov K.V., Rechkin S., Val'kov V.A. Problems of thermal preparation of automotive engines under low temperature conditions // *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2007. № 8(176). P. 95–101.

7. Yasin Mohd Hafizil Mat. Study of Diesel-biodiesel Fuel Properties and Wavelet Analysis on Cyclic Variations in a Diesel Engine // *Energy procedia*. 2017. Vol. 110. P. 498–503.

8. Ohotnikov B.L., Berdyshev I.V. Problems associated with the operation of the internal combustion engine at low ambient temperatures, and ways of their overcoming // «Autotransportnoie predpriyatie» ATP («Motor Company»). 2011. № 4. P. 46–48.

9. Zhan Honglei. The spectral analysis of fuel oils using terahertz radiation and chemometric methods // *Journal of physics*. 2016. № 39. P. 42–57.

10. Revyakin M.M. Realization of the engine's designated resource by controlling the operating conditions by the parameter of the specific chemotologic indicator of engine oil // *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2017. № 2(15). P. 62–67.

11. Hao Y. Guang. Construction and Simplification of the Calibration Model for Spectral Analysis of Fuel Oil Properties Based on Mutual Information Method // *Journal of physics*. 2012. № 1. P. 175–178.

12. Vladimirov D.I., Nikonorov A.N. Diagnosis of diesel engines by the ratio of concentrations of wear products in the working engine oil // *Eurasian science journal*. 2016. № 10. P. 294–296.

13. Ovcharenko S.M., Minakov V.A. Modeling of the formation of the concentration of wear products in diesel engine oil taking into account external factors / In the collection: *Problems of mechanical engineering // Problemy mashinovedeniya: materialy II mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. Omskij gos. tekhn. un-t. Omsk*, 2018. P. 98–103.

14. Mello Paola A., Pereira Juliana S.F., Mesko Marcia F., Mesko Juliano S. Barin, Erico Flores M.M. Sample preparation methods for subsequent determination of metals and non-metals in crude oil – A review // *Analytica Chimica Acta*. 2012. Vol. 746. P. 15–36.

15. Matusiewicz H., Barnes R. Evaluation of a controlled-temperature furnace atomizer as a sampling device for inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry // *Spectrochim. Acta. B*. 1985. Vol. 40. № 1–2. P. 29–39.

16. Weinreb K. Diagnostics of an induction-motor rotor by the spectral analysis of stator currents // *Thermal engineering*. 2013. № 14. P. 1006–1023.