



Результаты исследования определения продуктов износа в масле газовых двигателей методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии

Утаев Собир Ачилович

Каршийский государственный университет

Доктор технических наук, доцент

Независимый исследователь, Ташкентский государственный транспортный университет

Email: utaev.s@list.ru тел: +99890-517-05-36

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассматривается применения метода лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии для определения концентрации продуктов износа в составе отработанного масла газового двигателя. Содержание элементов в составе отработанного масла следующей концентрации мг/кг: железо (Fe) 42,2, алюминий (Al) 8, хром (Cr) 3,6, кремний (Si) 12,8. Высокая концентрации Железо (Fe) указывает на износ гильзы цилиндров, распределительный вал, коленчатый вал, шестерни газораспределительного механизма. Крупные частицы износа ($>5-10$ мкм) оседают на дно тары уже через 48–72 часа. Если пробу масла перед нанесением на подложку лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии не перемешать ультразвуком, прибор покажет занижение концентрации по (Fe), (Cr) и (Cu) в 2–5 раза.

Ключевые слова:

алюминий, безразборный контроль, продукты износа, лазер, моторное масло, спектр, эмиссия

Results of a study on the determination of wear products in gas engine oil using laser-induced spark emission spectrometry

ABSTRACT

This article examines the application of laser-based methods to determine the concentration of wear products in used gas engine oil. The elemental content in the used oil is as follows (concentrations in mg/kg): iron (Fe) 42,2, aluminum (Al) 8, chromium (Cr) 3,6, and silicon (Si) 12,8. High iron (Fe) concentrations indicate wear on cylinder liners, the camshaft, the crankshaft, and valve train gears. Gravitational settling (sedimentation): Large wear particles ($>5-10$ μm) settle to the bottom of the container within just 48–72 hours. If the oil sample is not ultrasonically agitated before being applied to the LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) substrate, the instrument will report Fe, Cr, and Cu concentrations that are 2–5 times lower than the actual values.

Key words:

aluminum, non-disassembly monitoring, wear products, laser, engine oil, spectrum, emission



Gaz dvigatellari motor moyi tarkibidagi yeyilish mahsulotlarini lazerli-alangali emission spektrometriya usulida tadqiq qilish

ANNOTATSIYA

Mazkur maqolada lazerli- alangali emission spektrometriya usulida gaz dvigatellari motor moylari tarkibidagi yeyilish mahsulotlarini aniqlash masalasi ko'rilgan. Tahlil natijalariga ko'ra moy tarkibidagi yeyilish mahsulotlari asosan temir (Fe) 42,2, mg/kg, alyuminiy (Al) 8, xrom (Cr) 3,6, kremniy (Si) 12,8. mg/kg va moy tarkibidagi prisadkalar metall elementlaridan tashkil topgan. Temir miqdori yuqoriligi gaz dvigateli silindrlar gilzasi, taqsimlash vali yeyilishini ko'rsatadi. Yirik yeyilish zarrachalari (>5–10 mkm) 48–72 soat ichida idish tubiga cho'kadi. Agar moy namunasi lazer-uchqunli emissiyaviy spektrometriya uchun taglikka surtishdan oldin ultratovush yordamida aralashtirilmasa, qurilma temir (Fe), xrom (Cr) va mis (Cu) elementlari konsentratsiyasini haqiqiy qiymatga nisbatan 2–5 baravar kam ko'rsatadi.

Kalit so'zlar:

alyuminiy, yeyilish mahsuli, lazer, motor moyi, spektr, emissiya

Введение.

При работе газовых двигателей детали цилиндрико-поршневой группы подвергаются воздействию высоких температур и давлений, в результате чего происходит износ деталей. Для определения величины износа применяются интегральные и дифференциальные методы измерений.

Под воздействием высокого радиального давления поршневых колец масляная пленка на стенках цилиндра разрывается, что сопровождается значительным ростом трения и приводит к интенсивному износу цилиндра и поршневых колец [1].

Метод определения степени износа по содержанию продуктов износа в масле основан на лабораторном анализе отработанного масла. Пробу, отобранную из картера газового двигателя после его остановки, тщательно перемешивают и отстаивают [2-4].

Основным источником механических потерь в двигателе внутреннего сгорания является цилиндропоршневая группа [1,5-7]. Согласно литературным данным, на ее долю приходится до 70% всех потерь на трение [1,8,9].

В лабораторных условиях определяют содержание продуктов износа, а также органических и неорганических химических веществ. Лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия не требует разборки двигателя.

Существует множество способов известно несколько методов спектрального анализа состава веществ, а также большое разнообразие приборов и установок для этого [2-4]. Лазерные методы позволяющих изучать статические, динамические, вибрационные и другие деформационные процессы, но все они сочетают в себе такие основные преимущества, как: бесконтактное и одновременное получение информации [2].

Материалы и методы.

Исследования базируется на существующие методы исследования, использованы теоретические, стандартные методики определения продуктов износа в масле и методы математической статистики.

Лазерная спектроскопия в маслах газовых двигателей работают эффективнее и точнее, чем в обычных дизельных. Поскольку прозрачность масла из-за низкого содержания сажи падает гораздо медленнее, лазерный луч без труда просвечивает пробу и точно фиксирует реальный размер механических загрязнений и продуктов износа [2-4].

Процентная концентрация продуктов износа и других нерастворимых в нем загрязняющих примесей, по времени работы t определяется в виде:



$$X = X_0 e^{-\frac{Q\varphi+Q_d}{v}\tau} + \frac{100a}{v(Q\varphi+Q_d)} (1 - e^{-\frac{Q\varphi+Q_d}{v}\tau}), \quad (1)$$

где: X_0 – начальная концентрация продуктов износа в масле при $\tau=0$;

e – основание натурального логарифма;

Q – скорость расхода масла через фильтр;

φ – коэффициент отсева фильтра;

Q_d – скорость долива масла;

v – количества масла в смазочной системе двигателя;

a – скорость поступления продуктов износа в масло.

Однако, в нашем случае при работе газового двигателя отсутствует, долив масла. Для определения содержания продуктов износа в масле в %, можно использовать выражение:

$$x = \left\{ 1 - \left[1 - \frac{(Q_y - a)\tau}{G} \right]^{\frac{a}{Q_y - a}} \right\} 100 \quad (2)$$

Скорость изнашивания двигателя может контролироваться по значению a .

При лазерном анализе содержания продуктов износа в масле используется физические измерения для пересчета полученного сигнала в концентрации элементов:

$$C = \frac{D}{\varepsilon \cdot l} \quad (3)$$

где: C – концентрация продуктов износа в масле;

D – оптическая плотность масла;

ε – молярный коэффициент поглощения;

l – длина волны.

Для определения массового содержания продуктов износа используется дифференциальное уравнение баланса масса продуктов. Уравнение учитывает изменение концентрации продуктов износа. При этом надо учесть долив свежего масла, фильтрации масла и количества угара масла:

$$\frac{dM(t)}{dt} = \vartheta_{\text{изн}} - \vartheta_{\text{ф}} - \vartheta_{\text{уг}}, \quad (4)$$

Если принимать как концентрацию продуктов износа, при этом надо учитывать объем масляной системы двигателя и уравнение будет в следующем виде:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{\vartheta_{\text{изн}}}{V} - C(t) \cdot \left(\frac{q_{\text{уг}} + q_{\text{ф}}}{V} \right), \quad (5)$$

где: $\vartheta_{\text{изн}}$ – абсолютная скорость генерирования частиц износа в масле. мг/ч;

$\vartheta_{\text{ф}}$ – скорость накопления продуктов износа в масляном фильтре;

$\vartheta_{\text{уг}}$ – расход частиц с угаром;

$q_{\text{уг}}$ – расход масла на угар, л/ч.

Для оценки интенсивности износа по состоянию масла можно использовать расчетную формулу:

$$\Delta\vartheta_{\text{изн}} = \frac{C_{\text{тек}} \cdot V_{\text{тек}} - C_{\text{пр}} \cdot V_{\text{пр}} + C_{\text{тек}} \cdot V_{\text{дол}}}{\Delta t} \quad (6)$$

где: $C_{\text{тек}}$ и $C_{\text{пр}}$ – текущая и предыдущая концентрация продуктов износа, мг/кг;

$V_{\text{тек}}$ и $V_{\text{пр}}$ – объем масла в поддоне при взятии пробы и предыдущую пробу, л.

$V_{\text{дол}}$ – объем свежего масла, л.

Δt – продолжительность работы двигателя во время контроля моторного масла.

Для количественного определения и анализа состава продуктов износа и загрязнений в масле могут применяться различные методы. Их можно разделить на две группы:

- определение химических элементов (металлов) в составе частиц износа и феррография
- контроль размеров и вида частиц, определяемых видом износа [10]. Для теоретической оценки содержания продуктов износа посвящён ряд исследований, в работе [10,11] предложено уравнение:



$$K = K_0 e^{\frac{At}{Q_0}} + \frac{g}{A} \left(1 - e^{\frac{At}{Q_0}}\right) \quad (7)$$

где: K_0 и K — начальная и текущая концентрации продуктов износа в смазочном масле, г/т; Q_0 — ёмкость масляной системы; g — интенсивность поступления продуктов износа, г/ч; A — предельное значение продуктов износа в масле г/ч; t — время эксплуатации агрегата после долива масла, ч.

Для обработки результатов исследования применяется методы математической статистики. Для определения стандартного отклонения (S), характеризующее случайную погрешность единичного выстрела лазера используем следующую формулу:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (8)$$

где: n — количество выборки

Значение стандартного отклонения от среднего значения рассчитываем по формуле:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

Расчет случайной погрешности для доверительной вероятности $P = 95 \%$, коэффициент Стьюдента равен $t = 2,262$. При этом погрешность измерения можно определить из выражения:

$$\Delta x = t \cdot S_{\bar{x}} \quad (10)$$

Результаты и их обсуждение

Для оценки интенсивности износа после остановки работающего газового двигателя были отобраны пробы масла. Полученные пробы анализировали в лабораторных условиях по стандартной методике для определения содержания продуктов износа. Содержание металлических частиц обычно характеризуют показателем содержания железа. Число повторных измерений состоит из 5-10 проб по стандарту ASTM D5185, ASTM D 6595.

При анализе масел на содержание продуктов износа в масле использовано метод лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС) с твердотельным импульсным лазером (Nd: YAG). Номинальная значения длины волны составляет $\lambda = 1064$ нм. Длительность импульса составляет 5-10 нс. Мощность (энергия) импульса составляет 50-150 мДж. Частота повторение импульсов 1-10 Гц. Диаметр пятна фокусирования составляет 50-200 мкм.

Для обеспечения точности определения металлических частиц железа, алюминия, меди, хрома и кремния в составе масла использовался режим двойного импульса, так как, метод считается эффективным для анализа моторных масел, максимального чувствительности частиц металлов. Длина волны 1064 нм, частота импульсов 5 Гц, время задержки регистрации 1.0-2,5 мкс.

С учетом влияния основных физико-химических свойств анализируемого масла на интенсивность лазерной искры калибровка осуществлена методом имитация реального износа. Достоверность результатов соответствует критерии оценки качества калибровки и составляет $R^2 = 0,999$ что, условия для дисперсных частиц не менее 0,095 обеспечивается.

Крупные частицы износа (>5-10 мкм) оседают на дно тары уже через 48-72 часа хранения [12]. Если пробу масла перед нанесением на подложку лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии не перемешать ультразвуком, прибор покажет занижение концентрации по (Fe), (Cr) и (Cu) в 2-5 раз.

Рекомендуемый срок хранения: оптимально проводить лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС) -анализ в течение 7-10 дней с момента отбора пробы. Пониженные температуры ($-20 - 0^\circ \text{C}$) считается идеальным для долгосрочного хранения [12]. Перед лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС)- анализом такую пробу необходимо полностью прогреть до температуры ($+40^\circ \text{C}$) и тщательно перемешать для восстановления гомогенности. По мере увеличения продолжительности работы двигателя количество механических примесей и нерастворимых продуктов возрастает табл.1.

Таблица 1.

Результаты анализа зависимости размер частиц продуктов износа в масле от продолжительности работы двигателя

Продолжительность работы мото-ч.	Размеры частиц продуктов износа в масле, мкм	
	крупные	мелкие
100	29	16
200	52	30
300	68	42
400	79	56
500	82	62

Для оптимизации расчета погрешности лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии измерений применялся объединение последовательных выборок в единый массив.

Объединенный массив данных ($n = 10$); Среднее значение ($\bar{x}$): 51,60 мкм;

Стандартное отклонение составляет (SD): 22.13 мкм

Стандартная ошибка среднего (SEM): 7.00 мкм; Критерий Стьюдента: 2,262

Доверительная погрешность (Δx): $2.262 \times 7.00 = 15.83$ мкм

Для частиц погрешность измерения вычисляли методом математической статистики с использованием критерии Стьюдента доверительной границы $P = 95 \%$.

По результатам расчетов средней размер частиц составляет $\bar{x} = 51,6$ мкм.

Стандартное отклонение составляет: $S = 22,13$

Значение стандартного отклонения от среднего значения рассчитываем по формуле:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \approx 6,997 \text{ мкм}$$

Расчет случайной погрешности. Для доверительной вероятности $P = 95 \%$, коэффициент Стьюдента равен $t = 2,262$. При этом погрешность измерения составляет:

$$\Delta x = t \cdot S_{\bar{x}} = 2,62 \cdot 6,997 \approx 15,83 \text{ мкм.}$$

Анализ продуктов износа в моторном масле с помощью лазерных технологий базируется преимущественно на методе лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии (ЛИЭС). Это экспресс-метод, позволяющий без проба подготовки за секунды определить элементный состав микрочастиц металлов в масле. Концентрация продуктов износа зависит от продолжительности работы масла рис.1.

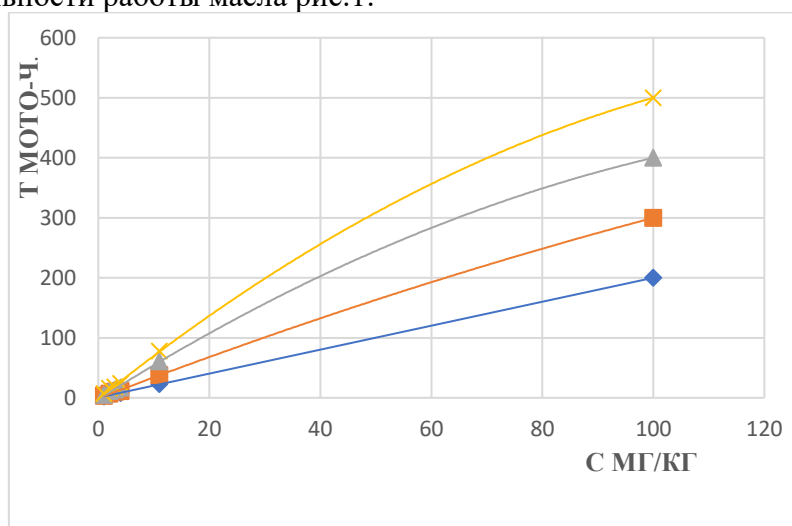


Рис.1. Зависимость концентрации продуктов износа в масле от продолжительности работы двигателя; Fe, — Si, — Al, — Cr —

Металлы износа (индикаторы поломок): Железо (Fe) указывает на износ гильзы цилиндров и распределительного вала; медь (Cu) - на деградацию вкладышей и подшипников, алюминий (Al)- на износ поршней, Cr-износ поршневых колец, содержание Si атмосферная пыль, кварцевые частицы.



В составе продуктов износа основная масса состоит из железа и способствует увеличению общей массы. Результаты анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Результаты анализа лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии масла газового двигателя

Элементы	Длина волны, λ , нм.	Относительная интенсивность I_i / I_c	Концентрация (ср.знач)	Абс. случ. погр. Δx
Железо, Fe	259.94	0.3050	42,2	3
Алюминий, Al	396.15	0.0721	8	0,60
Хром, Cr	425.43	0.0252	3,6	0,267
Кремней, Si	288.16	0.0917	12,8	0,98

С экономической точки зрения в отличие от других, метод лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии для анализа продуктов износа в составе моторных масел считается эффективным по снижению материальных затрат, сокращение времени анализа на 10-50 раз, рост технической готовности на 3-5%, полная автоматизация процесса и отсутствие и сокращением затрат на обслуживающего персонала. Анализ масла по методике лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии по стандарту ASTM D 6595 элементный состав (24 элемента), ppm. составляет 200 000 сум базовый, до 500 000 сум, за расширенную экспертизу.

Выводы.

1. Содержание элементов в составе отработанного масла следующей концентрации мг/кг: железо (Fe) 42,2, алюминий (Al) 8, хром (Cr) 3,6, кремний (Si) 12,8. Высокая концентрации Железо (Fe) указывает на износ гильзы цилиндров, распределительный вал, коленчатый вал, шестерни газораспределительного механизма.

2. Рекомендуется пробу масла перед нанесением на подложку лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии перемешать ультразвуком, прибор покажет занижение концентрации по (Fe), (Cr) и (Cu) в 2–5 раз.

3. Перед лазерно-искровой эмиссионной спектроскопией ЛИС-анализом пробу необходимо полностью прогреть до температуры (+40° C) и тщательно перемешать для восстановления гомогенности.

4. С экономической точки зрения в отличие от других, метод лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии для анализа продуктов износа в составе моторных масел газовых двигателей считается эффективным по снижению материальных затрат, сокращение времени анализа.

Список литературы

- Акинин Д.В., Прохоров В. Ю., Токарева О.В. Особенности методики измерения износа с использованием активации поверхности; /Современные проблемы теории машин. – 2023. – № 15. с. 54–57, doi.org/10.26160/2307-342X-2023-15-54-59
- Дунаев А.В., Тарасенко В.Е., Жешко А.А. Спектральный анализ масел как основа углубленной диагностики узлов машин. /Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2020;(54): с. 69–76.
- Bernhard Rossegger. Lubricating Oil Consumption Measurement on Large Gas Engines / Bernhard Rossegger, Albrecht Leis, Martin Vareka, Maykl Engelmayyer, Andreas Wimmer // Lubricants 2022, 10 (3), 40; doi.org/10.3390/lubricants10030040
- Michal Holubek, Martin Pexa, Jindrich Pavlu¹, Jakub Cedík, Katerina Vesela, Peter Kuchar Analysis of the Influence of Fuel on Oil Charge and Engine Wear [Manufacturing Technology 2019, 19\(1\)](#): 64 70 DOI: 10.21062/p/245.2019/a/1213-2489/MT/19/1/64
- Прохоров В.Ю., Шамарин Ю.А., Краснов Н.Д. Исследование процесса износа гильз блока цилиндров дизельного двигателя // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2017, том 2. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. — С. 238–240.



6. Полюшкин Н.Г. Основы теории трения, износа и смазки: учебное пособие / Н.Г. Полюшкин; Красноярский государственный аграрный университет. - Красноярск, 2013. - 192
7. Равин Александр Александрович Диагностическое обеспечение судового энергетического оборудования: проблемы и решения /диссертация ... доктора технических наук: 05.08.05 Санкт-Петербург 2015
8. Сергеев К. О. Анализ масла на содержание продуктов износа как метод диагностирования технического состояния судового редуктора. /Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технологии. 2020. № 1. С. 13–21. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-13-21.
9. Субаев М. И. и др. Исследование изменения геометрических размеров металлизированной втулки цилиндра при испытаниях на прочность. /Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 07 (61). С. 81–87. doi.org/10.23670/IRJ.2017.61.087.
10. Utaev S.A. Results of the analysis of the continuous introduction of additives into the lubrication system of an engine running on gaseous fuel // Tractors and Agricultural Machinery. Moscow. – 2023 90(3). 265–272 pp. doi.org/10.17816/0321-4443-321243. (In Russ.)
11. Utaev SA. Results of the study of wear products and contamination percentage of engine oils of diesel and gas engines. Tractors and Agricultural Machinery. 2024;91(6):801–807. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-633588> (In Russ.)
12. <https://oxmaint.com/article/oil-analysis-predictive-maintenance>