

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ И ТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF PARTICULATE CONTAMINATION IN THE COOLANT FOR AUTOMOBILE AND TRACTOR ENGINES

С.Г. ДРАГОМИРОВ¹, д.т.н.
П.И. ЭЙДЕЛЬ²
А.Ю. ГАМАЮНОВ²
М.С. ДРАГОМИРОВ², к.т.н.

¹ Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия
² ООО «НТЦ «АвтоСфера» при Владимирском государственном университете им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», Владимир, Россия, ds33@bk.ru

S.G. DRAGOMIROV¹, DSc in Engineering
P.I. EYDEL²
A.YU. GAMAYUNOV²
M.S. DRAGOMIROV², PhD in Engineering

¹ Vladimir State University, Vladimir, Russia,
² LLC «STC "AutoSphere"» at Vladimir State University", Vladimir, Russia, ds33@bk.ru

В статье описаны результаты исследования физико-химических характеристик твердых частиц загрязнений, присутствующих в охлаждающей жидкости автомобильных и тракторных двигателей. Приведены данные по фракционному, физическому и химическому составу твердых частиц загрязнений. Установлено, что обобщенной причиной появления загрязнений различной природы в системах жидкостного охлаждения двигателей является физико-химическое взаимодействие охлаждающей жидкости (антифриза) с разными элементами и разнородными материалами системы охлаждения. Использование абсолютно чистой охлаждающей жидкости в системах охлаждения автомобильных и тракторных двигателей практически нереально, так как всегда будут существовать эксплуатационные условия, способствующие образованию загрязнений. В составе твердых частиц загрязнений охлаждающей жидкости обнаружен целый ряд химических элементов (в количестве от 1 до 47 % (масс.) каждого элемента): железо Fe, кремний Si, алюминий Al, свинец Pb, олово Sn, цинк Zn, кальций Ca, магний Mg, медь Cu. Кроме этого в твердых загрязнениях присутствуют на уровне менее 1,0 % (масс.) такие химические элементы, как калий K, натрий Na, титан Ti, фосфор P, сера S, хром Cr, молибден Mo, хлор Cl, иридий Ir, никель Ni, марганец Mn и др. Наиболее опасными составляющими загрязнений являются частицы железа Fe и кремния Si, содержащиеся в охлаждающей жидкости в количестве до 47 и 37 % (масс.), соответственно, и обладающие значительной твердостью и угловатостью. Абразивные свойства частиц Fe и Si создают опасность удаления тонкой окисной пленки на внутренней поверхности стенок каналов радиаторов охлаждения, приводя их к преждевременному разрушению. В связи с этим делается вывод, что в составе автомобилей и тракторов должны быть использованы высокоэффективные фильтры охлаждающей жидкости двигателей, удаляющие эти загрязнения из потока.

Ключевые слова: автомобильные и тракторные двигатели, охлаждающая жидкость, загрязнения, твердые частицы, фракционный состав, химический состав.

Для цитирования: Драгомиров С.Г., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю., Драгомиров М.С. Физико-химические характеристики твердых частиц загрязнений в охлаждающей жидкости автомобильных и тракторных двигателей // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 3. С. 53–61. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-3-53-61.

The article describes the results of a study of the physicochemical characteristics of solid particles of contaminants present in the coolant of automobile and tractor engines. The data on the fractional, physical and chemical composition of solid particles of contamination are given. It was established that the generalized reason for the appearance of contaminants of various nature in liquid cooling systems of engines is the physicochemical interaction of the coolant (antifreeze) with different elements and dissimilar materials of the cooling system. The use of absolutely pure coolant in the cooling systems of automobile and tractor engines is practically unrealistic, since there will always be operating conditions that contribute to the formation of contamination. A number of chemical elements (in an amount from 1 to 47 % of each element) were found in the composition of solid particles of coolant contaminants: iron Fe, silicon Si, aluminum Al, lead Pb, tin Sn, zinc Zn, calcium Ca, magnesium Mg, copper Cu. In addition, at a level of less than 1,0 % (wt.), Such chemical elements as potassium K, sodium Na, titanium Ti, phosphorus P, sulfur S, chromium Cr, molybdenum Mo, chlorine Cl, iridium Ir, nickel Ni, manganese Mn, etc. were found. The most dangerous contaminants are particles of iron Fe and silicon Si, contained in the coolant in an amount of up to 47 and 37 %, respectively, and possessing significant hardness and angularity. The abrasive properties of Fe and Si particles create

the danger of removing a thin oxide film on the inner surface of the walls of the cooling radiator channels, leading to their premature destruction. In this regard, it is concluded that high-performance engine coolant filters should be used in automobiles and tractors to remove these contaminants from the flow.

Keywords: automobile and tractor engines, coolant, pollution, solid particles, fractional composition, chemical composition.

Cite as: Dragomirov S.G., Eydel P.I., Gamayunov A.Yu., Dragomirov M.S. Physico-chemical characteristics of particulate contamination in the coolant for automobile and tractor engines. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2021. No 3, pp. 53–61 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-3-53-61.

Введение

С момента появления систем жидкостно-го охлаждения автомобильных и тракторных поршневых двигателей в начале XX века, их работу постоянно сопровождала серьезная проблема – загрязнение охлаждающей жидкости (ОЖ) и всей системы в целом. К сожалению, эта проблема до последнего времени оставалась нерешенной в современной науке и практике автоиндустрии, так как применяемые технологии и устройства очистки ОЖ в процессе эксплуатации двигателей не соответствовали современным требованиям.

При этом до настоящего времени очистке ОЖ и поддержанию чистоты системы жидкостного охлаждения в целом уделяется незаслуженно мало внимания, как за рубежом, так и в России.

Между тем, непрерывно возрастающая структурная и конструктивная сложность современных систем жидкостного охлаждения (СЖО) [1, 2] при одновременном повышении требований к их надежности и теплоотводящей функции в процессе непрерывного форсирования автомобильных и тракторных двигателей обуславливают повышенные требования к чистоте ОЖ и всей системы охлаждения.

Анализ данных эксплуатации автотранспортной техники показывает, что от 25 до 40 % неисправностей и отказов двигателей приходится на СЖО [3, 4]. В основном неполадки в системе охлаждения появляются уже после 150–200 тыс. км пробега автомобиля. У тракторных двигателей и двигателей тяжелых грузовиков (а также автобусов), работающих обычно с 70–85 % нагрузкой, из-за более тяжелых условий работы неполадки могут возникнуть уже после 500–700 часов эксплуатации.

К критическим неисправностям СЖО относятся различные течи, разрушение прокладок и сальников, ошибки в срабатывании термостатов и датчиков, а также закупоривание проточных каналов радиаторов, блоков и головок цилиндров.

В процессе эксплуатации двигателей в системе охлаждения и ее элементах наблюда-

ются явления кавитационной эрозии и химической коррозии, появляются отложения на теплопередающих поверхностях (накипь), образуются продукты разложения и выработки антифризов. Все это в комплексе приводит к ухудшению передачи тепла от нагретых деталей двигателя в системе охлаждения, что может вызвать его перегрев и снижение энергетических показателей, а также значительно повышает риск выхода двигателя из строя.

Вышеуказанные проблемы СЖО при эксплуатации автомобильных и тракторных двигателей в значительной степени обусловлены наличием в ОЖ загрязнений различной природы.

Исследования [3, 5, 6] состава загрязнений антифриза выявили, что в них входят:

- продукты химической коррозии и кавитационной эрозии металлов;
- масляные и жировые отложения;
- частицы песка, грязи, силиконовых герметиков;
- продукты разложения антифриза (гели) и отработанных присадок;
- частицы накипи;
- фрагменты разрушившихся уплотнительных элементов.

Принципиально возможны только три пути появления загрязнений в ОЖ, в соответствии с которыми сами источники загрязнений можно классифицировать [7]:

- 1) на производственно-технологические (образуются в процессе производства двигателей);
- 2) на внешние эксплуатационные (поступают в СЖО извне в процессе эксплуатации);
- 3) на внутренние эксплуатационные (образуются в СЖО в процессе работы).

Наши экспериментальные исследования показали, что первый источник, как правило, вносит относительно малую долю загрязнений, так как в процессе производства двигателей предпринимается целый ряд специальных технологических мер, направленных на очистку деталей и узлов двигателей от загрязнений

(металлических опилок и стружки, окалины, грязи, формовочного песка и т.п.). Для этого используется виброочистка блоков цилиндров и головок, мойка деталей с применением поверхностно-активных веществ, продувка каналов и полостей сжатым воздухом и др. В связи с этим этот источник загрязнений СЖО можно обоснованно считать малозначимым.

Второй источник (внешние эксплуатационные загрязнения, попадающие в СЖО в процессе работы) может внести значительную долю загрязнений, величина которой зависит от культуры эксплуатации автомобильной техники. Однако при должной технической культуре внешние загрязнения, попадающие в СЖО при эксплуатации, также можно свести к минимуму.

Третий источник загрязнения системы – образование (генерация) различных загрязнений внутри самой СЖО в процессе эксплуатации двигателя. Обобщенная причина появления загрязнений в СЖО в процессе эксплуатации двигателя – физико-химическое взаимодействие ОЖ с различными разнородными элементами и материалами системы охлаждения [5]. Результатом этого физико-химического взаимодействия является кавитационная эрозия металлов, их химическая коррозия, образование накипи и различных отложений, разложение присадок, разрушение элементов системы и т.п. Это те загрязнения, с которыми достаточно тяжело бороться и которые постоянно генерируются в системе в том или ином количестве.

Применение абсолютно чистой охлаждающей жидкости в СЖО автомобильных и тракторных двигателей практически нереально, потому, что всегда будут существовать производственно-технологические и эксплуатационные условия, способствующие образованию загрязнений.

На сегодняшний день найдено эффективное, простое и надежное решение проблемы очистки ОЖ [8, 9], однако открытым остается вопрос о природе и характере загрязнений, образующихся в СЖО автомобильных и тракторных двигателей.

Выявление характера загрязнений и определение природы их происхождения являются важной информацией для создания эффективной технологии предотвращения загрязнений или очистки ОЖ в процессе эксплуатации двигателей.

Цель исследований

Физико-химический анализ твердых частиц загрязнений, присутствующих в охлаждающей жидкости автомобильных и тракторных двигателей, на основе которого возможно определение направления разработки эффективной технологии предотвращения загрязнений или очистки ОЖ в процессе эксплуатации двигателей.

Материалы и методы

Объектом исследования являются твердые частицы загрязнений, задержанные гидроциклонным фильтром-сепаратором [6, 8] в системах охлаждения поршневых двигателей при эксплуатации автотранспортных средств и сельскохозяйственной техники.

Отбор загрязнений охлаждающей жидкости проводился из гидроциклонных фильтров-сепараторов, установленных в системах охлаждения двигателей городских и междугородних автобусов MAN, Mercedes и Setra, находящихся в эксплуатации в крупнейшем автотранспортном предприятии г. Владимира – ООО «Биг-АвтоТранс», двигателей сельскохозяйственной техники (комбайны) Агропредприятия СПК «Суздальские Зори» (Владимирская область, с. Павловское), а также двигателей автомобилей КАМАЗ коммунальных служб г. Владимира.

Конструкция гидроциклонного фильтра-сепаратора обеспечивает улавливание загрязнений в специальном грязесборнике, в котором они собираются на резиновой прокладке крышки [6]. Именно эти загрязнения из грязесборника, уловленные фильтром-сепаратором, и подвергались анализу.

Поскольку первичные загрязнения, удаленные из фильтра-сепаратора, представляют собой мазеобразную вязкую массу (рис. 1, а), была разработана специальная технология выделения твердых частиц загрязнений в сухом виде.

Указанная мазеобразная масса помещалась в емкость объемом около 2 л и заливалась чистой водой. После перемешивания загрязнений в воде, емкость оставлялась примерно на сутки для отстаивания загрязнений. Через сутки на дне емкости полностью осаждались все частицы загрязнений. Чистая вода над загрязнениями удалялась с помощью пластикового шприца большого объема. Оставшийся осадок (частицы песка, герметиков, металлов и др.) выпаривался в тигле в лабораторной электрической печи до полного удаления влаги,

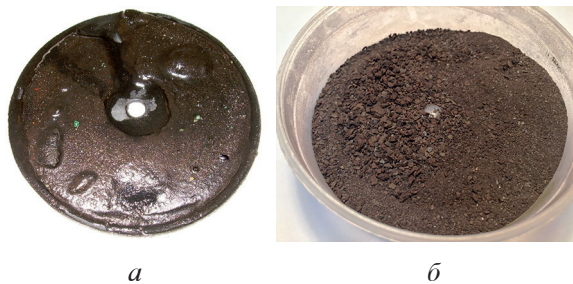


Рис. 1. Внешний вид загрязнений, удаленных из гидроциклонного фильтра-сепаратора в виде мазеообразных отложений на прокладке фильтра (а) и подготовленных для физико-химического анализа сухих загрязнений (б)

Fig. 1. The contaminants removed from the hydrocyclone filter-separator in the form of greasy deposits on the filter gasket (a), and prepared for physicochemical analysis of dry contaminants (b)

для получения сухих фракций твердых частиц загрязнений (рис. 1, б).

При визуальном исследовании мелкие частицы железа Fe сначала отбирались из общей массы загрязнений с помощью магнита, а затем размагничивались с помощью специального устройства для предотвращения слипания мелких железных частиц.

Далее велось комплексное исследование сухих твердых частиц загрязнений:

- определялся фракционный состав загрязнений с помощью комплекта лабораторных сит;
- визуально изучались твердые частицы загрязнений с применением USB-микроскопа;
- проводился химический анализ состава твердых частиц загрязнений с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра последовательного анализа.

Для определения фракционного состава твердых частиц загрязнений использовался комплект лабораторных калиброванных сит (7 штук) производства ООО «Вибротехник» (г. Санкт-Петербург) (рис. 2). Все сита имеют диаметр 128 мм и высоту 37,5 мм. Просеивающая поверхность сетки – нормальной точности в соответствии с ГОСТ 6613–86 (ТУ-14-4-167-91). Размер ячеек калиброванных сит составляет от 50 до 1500 мкм. Подобная методика определения фракционного состава пылей, измельченных материалов и т.п. является общепринятой [10].

При исследовании твердые частицы загрязнений разделялись на фракции путем их просеивания через колонну из указанных калиброванных сит. Твердые частицы в зависимости



Рис. 2. Комплект лабораторных калиброванных сит

Fig. 2. Set of laboratory calibrated sieves

от своего размера проходили определенные сита и задерживались на тех ситах, размер ячеек которых был меньше размера частиц. В зависимости от этого частицы условно подразделялись на группы в диапазонах: менее 50, 50–100, 100–250, 250–450, 450–700, 700–1000, 1000–1500 мкм, более 1500 мкм.

После сортировки твердых частиц загрязнений с помощью комплекта лабораторных калиброванных сит каждая фракция взвешивалась на электронных весах производства ЗАО «Вессервис» (г. Санкт-Петербург). Весы обеспечивали взвешивание порций частиц до 300 с погрешностью $\pm 0,01$.

Каждая фракция твердых частиц загрязнений при этом помещалась в различные пластиковые емкости для изучения с помощью USB-микроскопа «Микрон-500».

Микроскоп «Микрон-500» (рис. 3) обладает максимальным 500-кратным увеличением, что вполне достаточно для решаемых задач. Проведенная работа по отладке программного обеспечения микроскопа позволила производить оптические измерения размеров объектов наблюдения.

Каждая из выделенных фракций эксплуатационных загрязнений подвергалась химическому анализу с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра последовательного анализа ARL ADVANT[®]X (производитель Thermo Scientific (США), № 38436-08 в Государственном реестре средств измерений). Эти исследования проводились в Центре «Функциональные наноматериалы» кафедры «Литейные процессы и конструкционные материалы» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых.

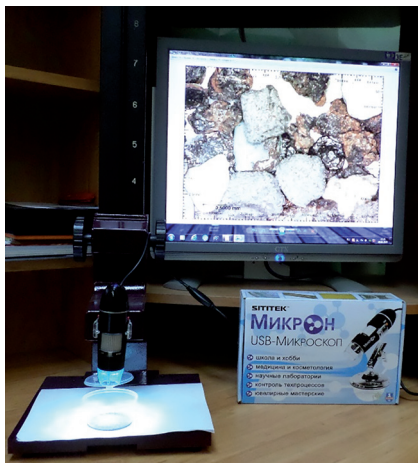


Рис. 3. USB-микроскоп «Микрон-500»

Fig. 3. Micron-500 USB microscope

Рентгенофлуоресцентный спектрометр последовательного анализа ARL ADVANT[®]X с технологией IntelliPower™ (рис. 4) позволяет решать различные аналитические задачи. Прибор позволяет определять до 84 элементов периодической таблицы Д.И. Менделеева в различных пробах: твердых или жидких, проводящих или непроводящих. У прибора довольно широкий диапазон решаемых задач:

- мониторинг следов элементов в маслах и полимерах;
- анализ основных элементов и примесей в цементе, горных породах и т.п.;
- полный анализ стекла, металлов, руды, огнеупоров, геологических материалов и др.



Рис. 4. Рентгенофлуоресцентный спектрометр последовательного анализа ARL ADVANT[®]X

Fig. 4. ARL ADVANT[®]X X-ray fluorescence spectrometer for sequential analysis

Весь описанный научный инструментарий использовался при исследовании физико-химических характеристик твердых частиц за-

грязнений охлаждающей жидкости двигателей автомобильной и тракторной техники, полученных в условиях реальной эксплуатации.

Результаты и обсуждение

Фракционный анализ типичной порции твердых частиц загрязнений, полученной из конкретного фильтра-сепаратора ОЖ двигателя автобуса, показал, что более 85 % всех загрязнений имеет размер от 50 до 1000 мкм (рис. 5).

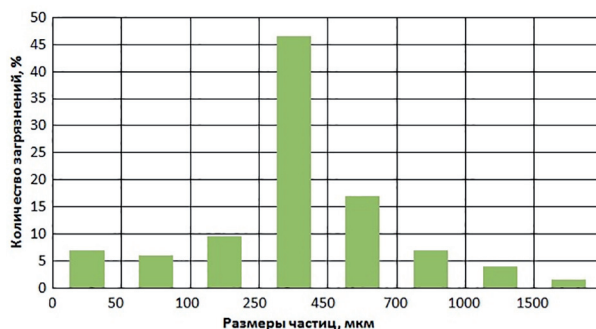


Рис. 5. Распределение твердых частиц загрязнений охлаждающей жидкости по фракциям в типичной порции загрязнений, полученной из фильтра-сепаратора (размер фракций дан в пределах от 0 до 50 мкм, от 50 до 100 мкм и т.д.)

Fig. 5. Distribution of solid particles of coolant contaminants by fractions in a typical portion of contaminants obtained from the filter-separator (the size of the fractions is given in the range from 0 to 50 microns, from 50 to 100 microns, etc.)

Следует отметить, что при этом твердые частицы с размером 250–450 мкм имеют наибольшую долю (более 45 % по массе) среди всех частиц загрязнений различных размеров.

Фракция 450–700 мкм составляет около 17 % (масс.) среди общей массы загрязнений. Относительное количество загрязнений остальных фракций не превышает 10 %.

Очевидно, что наиболее опасными составляющими загрязнений являются частицы железа Fe и кремния Si, так как они обладают абразивными свойствами и могут способствовать удалению тонкой окисной пленки на внутренней поверхности стенок каналов радиаторов охлаждения, приводя их к коррозии и преждевременному разрушению. Распределение частиц Fe и Si по фракциям в типичной порции загрязнений, полученной из фильтра-сепаратора ОЖ двигателя автобуса, показано на рис. 6, а внешний вид частиц Fe при увеличении 150x – на рис. 7.

Данные на рис. 6 показывают, что наибольшую долю кремния Si (левые столбцы) содержат фракции загрязнений с размерами до 250 мкм: в этих фракциях содержание Si составляет 30–35 % (по массе). Далее, по мере укрупнения фракций, относительное количество частиц Si снижается примерно до 15–22 % в каждой фракции.

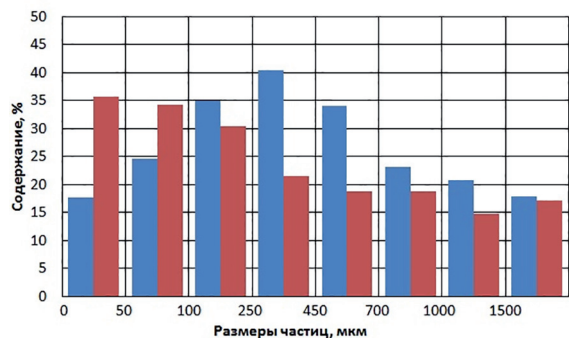


Рис. 6. Типичное распределение частиц железа Fe и кремния Si по фракциям в составе твердых частиц загрязнений

Fig. 6. Typical distribution of iron particles Fe and silicon Si by fractions in the composition of solid particles of impurities

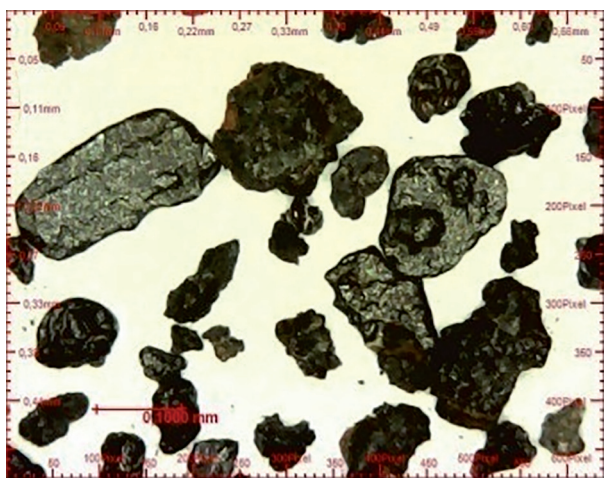


Рис. 7. Внешний вид мелких частиц железа Fe при увеличении 150x

Fig. 7. Fe small iron particles at a magnification of 150x

По частицам железа Fe (правые столбцы) наблюдается несколько иная картина. Наибольшее относительное содержание частиц Fe наблюдается (рис. 6) во фракции с размерами от 250–450 мкм – около 40 % (по массе). Во фракциях 100–250 мкм и 450–700 мкм – примерно около 35 % в каждой. В остальных фракциях содержание частиц Fe находится в пределах 18–23 %.

Визуальный анализ твердых частиц загрязнений с помощью микроскопа «Микрон-500» позволил установить их разнообразную форму и примерные размеры. Фотографии типичных частиц загрязнений приведены на рис. 8.

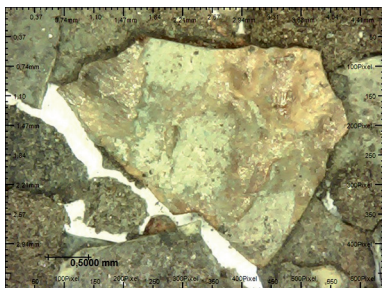
Как показывает анализ приведенных микрофотографий, твердые частицы загрязнений охлаждающей жидкости автомобильных двигателей имеют самую разнообразную форму – от округлой до угловатой. В частности, встречается чешуйчатая форма частиц, овальная (округлая) и с острыми гранями. Кроме этого, наблюдаются продолговатые нитеобразные частицы загрязнений в мелких фракциях. Материалом всех этих частиц является кремний, железо, алюминий, свинец и др.

При этом следует отметить, что округлые частицы (их величина, как правило, меньше 450 мкм) менее опасны для элементов системы охлаждения. Твердые частицы с острыми углами между гранями, напротив, более опасны, так как могут вызывать повышенный износ в процессах трения или удалять окисную пленку с алюминиевых деталей, приводя к усилению их коррозии и разрушению [11]. В этом отношении, как уже указывалось, наибольшую опасность представляют частицы железа Fe (рис. 6 и 7) и частицы кремния Si, которые обладают значительной твердостью и угловатостью одновременно.

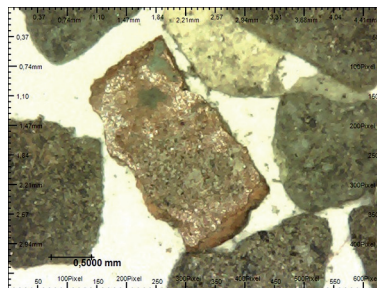
Сравнительный анализ химического состава твердых частиц загрязнений показал, что у различных объектов исследований (двигателей грузовых автомобилей, автобусов, комбайнов) нет большого различия в химическом составе твердых частиц загрязнений охлаждающей жидкости (за редким исключением), что свидетельствует о некоторых внутренних закономерностях образования загрязнений в близких условиях у сходных объектов.

Обобщенные данные по относительному химическому составу твердых частиц загрязнений, содержащихся в охлаждающей жидкости различных двигателей (грузовых автомобилей, автобусов, комбайнов), приведены в таблице.

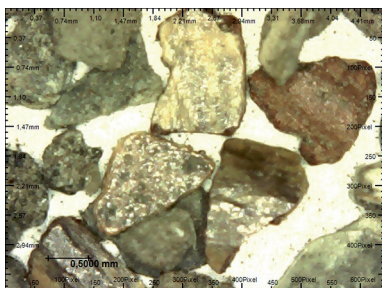
Нельзя не заметить значительного количества частиц железа Fe среди загрязнений – от 13,7 до 47,1 %. Особенно много частиц Fe в группах 450–700, 250–450, 100–250 и 50–100 мкм. То есть это довольно крупные частицы размером 50–700 мкм. Природа их появления в антифризе – кавитационные



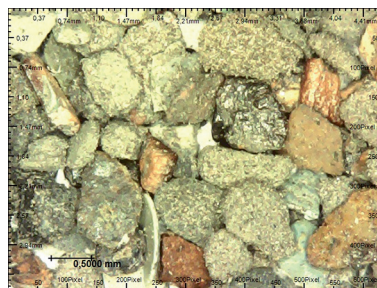
Группа: ≥ 1500 мкм. Zoom: 3x.
 Увеличение: 130x. Масса фракции: 0,73 г



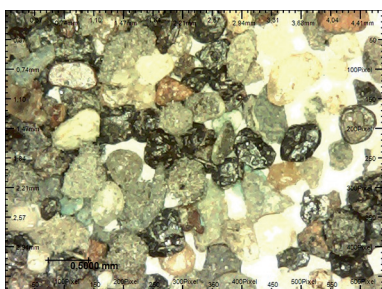
Группа: 1000–1500 мкм. Zoom: 3x.
 Увеличение: 130x. Масса фракции: 1,85 г



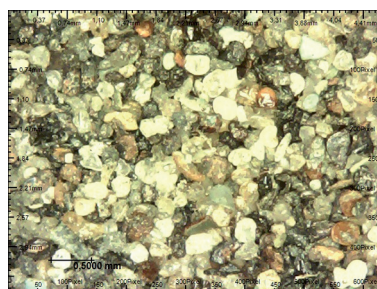
Группа: 700–1000 мкм. Zoom: 3x.
 Увеличение: 130x. Масса фракции: 3,44 г



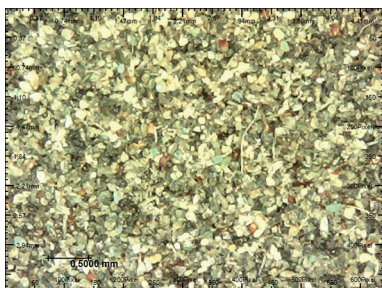
Группа: 450–700 мкм. Zoom: 3x.
 Увеличение: 130x. Масса фракции: 8,02 г



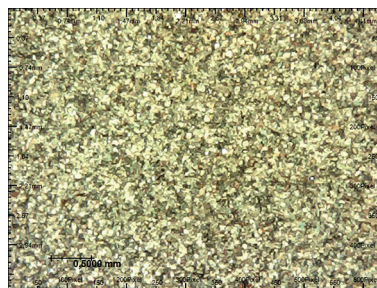
Группа: 250–450 мкм. Zoom: 3x.
 Увеличение: 130x. Масса фракции: 21,57 г



Группа: 100–250 мкм. Zoom: 3x.
 Увеличение: 130x. Масса фракции: 4,5 г



Группа: 50–100 мкм. Zoom: 3x.
 Увеличение: 130x. Масса фракции: 3,1 г



Группа: < 50 мкм. Zoom: 3x.
 Увеличение: 130x. Масса фракции: 3,4 г

Рис. 8. Микрофотографии различных фракций (по группам) твердых частиц загрязнений охлаждающей жидкости, полученных в процессе эксплуатации автобусов

Fig. 8. Micrographs of various fractions (by groups) of solid particles of coolant contaminants obtained during the operation of buses

и коррозионные разрушения гильз цилиндров двигателей и других деталей из черных металлов [5].

Кроме этого обращает на себя внимание значительное количество кремния Si (песка) в общей массе загрязнений – от 14,4 до 36,7 %.

Наличие песка в антифризе может быть объяснено как производственно-технологическими причинами его попадания в рубашку двигателя (при его изготовлении), так и внесением песка в охлаждающую жидкость вследствие невысокой культуры эксплуатации техники.

**Обобщенные данные по относительному химическому составу твердых частиц загрязнений,
содержащихся в антифризе**

*Table. Generalized data on the relative chemical composition of solid particles
of contaminants contained in antifreeze*

| Размер частиц по фракциям, мкм | Доля отдельных химических элементов, % (масс.) | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| | Fe | Pb | Si | Sn | Zn | Al | Ca | Cu | Mg |
| ≥1500 | 15,9–20,0 | 14,0–18,0 | 14,4–19,9 | 6,0–14,1 | 8,6–18,0 | 7,4–9,6 | 2,4–5,9 | 5,5–10,8 | 1,8–2,5 |
| 1000–1500 | 20,2–21,5 | 16,1–27,8 | 10,5–19,3 | 9,8–11,1 | 7,4–12,2 | 3,3–7,8 | 2,1–6,7 | 5,3–8,1 | 0,96–3,1 |
| 700–1000 | 21,2–25,4 | 12,7–15,7 | 18,1–19,4 | 2,5–8,7 | 7,2–10,6 | 7,7–12,8 | 5,5–6,2 | 5,1–9,1 | 2,4–2,9 |
| 450–700 | 29,8–38,3 | 9,6–12,1 | 17,6–20,1 | 1,6–2,2 | 5,2–12,1 | 7,4–8,7 | 5,3–5,7 | 4,5–8,8 | 2,4–3,0 |
| 250–450 | 33,8–47,1 | 7,7–12,1 | 19,1–24,0 | 0,9–1,3 | 3,4–11,9 | 5,7–6,9 | 3,4–4,2 | 3,3–7,3 | 2,0–2,5 |
| 100–250 | 25,7–44,2 | 7,9–9,5 | 29,8–31,1 | 0,6–0,8 | 2,5–5,9 | 5,1–7,7 | 3,1–9,2 | 2,8–4,5 | 1,4–2,7 |
| 50–100 | 16,0–33,2 | 5,5–7,1 | 31,7–36,7 | 0,3–0,4 | 2,9–3,4 | 7,0–8,8 | 8,1–17,1 | 2,8–3,5 | 2,8–4,1 |
| ≤50 | 13,7–21,8 | 5,0–5,8 | 35,2–36,4 | 0,2–0,3 | 2,9–3,2 | 8,4–9,3 | 13,2–19,3 | 3,2–3,7 | 4,0–4,3 |

Наличие частиц алюминия Al является следствием кавитационной эрозии и химической коррозии деталей двигателя из алюминиевых сплавов [5].

Появление в загрязнениях частиц свинца Pb и олова Sn объясняется содержанием этих элементов в припое, которым пропаиваются радиаторы двигателя и отопителя салона. Таким же путем может попадать и цинк Zn в состав загрязнений.

Частицы кальция Ca и магния Mg входят в состав накипи, отлагающейся на стенках системы охлаждения двигателя при использовании некачественного антифриза. Также Ca и Mg могут использоваться в моющее-диспергирующих присадках в антифризах.

Присутствие частиц меди Cu может объясняться ее содержанием как в припое, используемом при сборке радиаторов, так и в других элементах двигателя.

Кроме указанных в таблице химических элементов, в твердых загрязнениях присутствуют на уровне менее 1,0 % (по массе) такие химические элементы, как калий K, натрий Na, титан Ti, фосфор P, сера S, хром Cr, молибден Mo, хлор Cl, иридий Ir, никель Ni, марганец Mn и др. Незначительное содержание этих элементов можно считать фоновым. Это объясняется присутствием этих химических элементов в присадках к антифризам, в сталях и сплавах, из которых изготовлены отдельные элементы двигателя и его системы охлаждения.

Обобщенно анализируя состав загрязнений, можно отметить, что наиболее опасными и присутствующими в значительных количествах являются частицы железа Fe и кремния

Si. То есть, по сути, антифриз представляет собой своеобразный раствор абразива, действующего на внутреннюю поверхность различных радиаторов, сальник насоса, крыльчатку, клапан термостата и др. Это воздействие может быть весьма опасным и приводить к выходу элементов двигателя из строя.

Заключение

1. Обобщенной причиной появления загрязнений различной природы в СЖО является физико-химическое взаимодействие ОЖ (антифриза) с разными элементами и разнородными материалами системы охлаждения. Использование абсолютно чистой охлаждающей жидкости в СЖО автомобильных и тракторных двигателей практически нереально, так как всегда будут существовать эксплуатационные условия, способствующие образованию загрязнений.

2. В составе твердых частиц загрязнений охлаждающей жидкости обнаружен целый ряд химических элементов (в количестве от 1 до 47 % (масс.) каждого элемента): железо Fe, кремний Si, алюминий Al, свинец Pb, олово Sn, цинк Zn, кальций Ca, магний Mg, медь Cu. Кроме этого в твердых загрязнениях присутствуют на уровне менее 1,0 % (масс.) такие химические элементы, как калий K, натрий Na, титан Ti, фосфор P, сера S, хром Cr, молибден Mo, хлор Cl, иридий Ir, никель Ni, марганец Mn и др.

3. Наиболее опасными составляющими загрязнений являются частицы железа Fe и кремния Si (содержащиеся в ОЖ в количестве до 47 и 37 % (масс.) соответственно) и обладающие значительной твердостью и угловатостью. Абразивные свойства частиц Fe и Si создают

опасность удаления тонкой окисной пленки на внутренней поверхности стенок каналов радиаторов охлаждения, приводя их к коррозии и преждевременному разрушению.

В связи с этим в составе автомобилей и тракторов должны быть использованы высокоэффективные фильтры охлаждающей жидкости двигателей, удаляющие эти загрязнения из потока.

Литература

1. Иванов И.Е., Шатров М.Г., Кричевская Т.Ю. Системы охлаждения поршневых ДВС: монография. М.: МАДИ, 2015. 168 с.
2. Якубович А.И., Кухаренок Г.М., Тарасенко В.Н. Системы охлаждения тракторных и автомобильных двигателей. Конструкция, теория, проектирование. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2014. 473 с.
3. Руководство по продуктам для системы охлаждения. Cummins Filtration. 2009. 8 с.
4. Engine cooling. Behr Hella Service GmbH. 2008. 52 pp.
5. Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю. Природа и характеристики загрязнений в системах охлаждения автотранспортных двигателей // East European Science Journal. 2019. № 5 (45), part 1. Pp. 49–54.
6. Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю. Высокоэффективная фильтрация охлаждающей жидкости – перспективное направление совершенствования автотранспортных двигателей // 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса: сб. трудов Международной н.-т. конф. 31 января 2019. М.: МАДИ, 2019. С. 488–501.
7. Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю., Селиванов Н.М. Высокоэффективная фильтрация охлаждающей жидкости – новое перспективное направление совершенствования транспортных двигателей // Разработка и производство двигателей и других агрегатов и систем с применением информационных технологий: сборник. М.: Издат. Дом «Научная библиотека», 2015. С. 12–14.
8. Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю., Селиванов Н.М.: патент РФ на изобретение № 2625891. Гидроциклонное устройство для очистки от твердых частиц загрязнений охлаждающей жидкости поршневых двигателей. 2017. 10 с.
9. Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю. Анализ современного уровня развития технологии и техники фильтрации охлаждающей жидкости автомобильных и тракторных двигателей // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 4. С. 12–20.
10. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. М.: Химия, 1987. 264 с.
11. http://www.expert-oil.com/articles/articles_48.html.

References

1. Ivanov I.E., Shatrov M.G., Krichevskaya T.Yu. Sistemy okhlazhdeniya porshnevyykh DVS [Cooling system for piston internal combustion engine], Moscow, MADI Publ., 2015, 168 p.
2. Yakubovich A.I., Kukharenek G.M., Tarasenko V.N. Sistemy okhlazhdeniya traktornykh i avtomobil'nykh dvigateley. Konstruktsiya, teoriya, proyektirovaniye [The cooling system of tractor and automobile engines. Construction, theory, design], Moscow, INFRA-M Publ., 2014, 473 p.
3. The product guide for the cooling system, Cummins Filtration, 2009, 8 p.
4. Engine cooling, Behr Hella Service GmbH., 2008, 52 p.
5. Dragomirov S.G., Dragomirov M.S., Eydel P.Ig., Gamayunov A.Yu. Nature and characteristics of pollutants in cooling systems of motor vehicles, East European Science Journal, 2019, No 5 (45), part 1, pp. 49–54.
6. Dragomirov S.G., Dragomirov M.S., Eydel P.Ig., Gamayunov A.Yu. Highly Effective coolant filtration – a promising direction for improving motor vehicles engines. 8th Lucanin's readings. Problems and prospects of development of the motor transport complex: proceedings of the International scientific conference on Jan. 31, 2019, Moscow, MADI Publ., 2019, pp. 488–501.
7. Dragomirov S.G., Dragomirov M.S., Eydel P.Ig., Gamayunov A.Yu., Selivanov N.M. High-efficiency filtration of cooling liquid – a new perspective direction for improving transport engines // Development and production of engines and other aggregates and systems with the use of information technologies: collection. Scientific Library, 2015. p. 12–14.
8. Dragomirov S.G., Dragomirov M.S., Eydel P.Ig., Gamayunov A.Yu., Selivanov N.M. Patent RU 2625891, 2017.
9. Dragomirov S.G., Dragomirov M.S., Eydel P.Ig., Gamayunov A.Yu. Analysis of the current level of development of technology and technology of filtration of the cooling liquid of automobile and tractor engines. Tractors and agricultural machinery. 2020. No 4. pp. 12–20.
10. Kouzov P.A. Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyley i izmel'chennykh materialov [Fundamentals of analysis of the dispersed composition of industrial dust and crushed materials]. Moscow: Khimiya Publ., 1987. 264 p.
11. http://www.expert-oil.com/articles/articles_48.html.

Данное исследование выполнено в рамках реализации инновационного проекта «Разработка, изготовление и испытания опытного образца фильтра охлаждающей жидкости на основе моделирования гидравлических и сепарационных процессов» (договор № 2914ГСИ/45450) программы «СТАРТ».