

УДК 665.765

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-84-84-100>

## КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ДЛЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**С.В. Пашукевич**

Омский государственный технический университет (ОмГТУ)

г. Омск, Россия

sofia96@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8111-4725>

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Ухудшение состояния моторного масла в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) напрямую связано с попаданием в картер различного рода загрязнителей. В зависимости от типа загрязнения изменяется вид отложений на поверхностях деталей двигателя. Нельзя не отметить тот факт, что на работоспособность моторного масла чрезвычайно влияет процесс окисления, органические кислоты, возникающие в течение него, способствуют появлению коррозии на деталях ДВС. Также невосполнимый ущерб наносят вода, дизельное топливо, охлаждающая жидкость, частицы сажи, асфальтены и т. д.

**Материалы и методы.** В данной работе представлены результаты широкого литературного обзора, направленного на изучение основных типов загрязнителей моторных масел. Приведены классификации по агрегатному состоянию загрязнителей, а также по возможным путям их проникновения в смазочный материал. Наиболее узко в данной статье рассмотрены жидкостные загрязнители. Для демонстрации негативного влияния попадания в моторное масло загрязнений приведены фотографии деталей двигателя внутреннего сгорания с отложениями, находящимися на поверхностях составных частей ДВС.

**Результаты.** Приведена классификация основных загрязнителей моторных масел, указаны последствия, возникающие вследствие попадания инородных соединений в рассматриваемый смазочный материал.

**Заключение.** Установлено воздействие загрязнителей на детали ДВС и смазочного материала. На основе классификации можно судить о причинах попадания и возможных последствиях воздействия загрязнений на работу двигателя.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** моторное масло, двигатель внутреннего сгорания, окисление моторного масла, металлические поверхности, сажа, шлам, охлаждающая жидкость, дизельное топливо, износ, трение

Статья поступила в редакцию 22.11.2021; одобрена после рецензирования 10.02.2022; принята к публикации 28.02.2022.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Пашукевич С.В. Классификация загрязнителей моторных масел для дизельных двигателей // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 1(83). С. 84-100. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-19-1-84-100>

© Пашукевич С.В., 2022

Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-84-100>  
Original article

## CLASSIFICATION OF CONTAMINANTS IN DIESEL ENGINE OILS

**Sofia V. Pashukevich**

Omsk State Technical University,

Omsk, Russia

[sofia96@bk.ru](mailto:sofia96@bk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8111-4725>

### ABSTRACT

**Introduction.** *The deterioration of engine oil in an internal combustion engine (ICE) is directly related to the ingress of various pollutants into the crankcase. Depending on the type of contamination, the type of sediment on engine part surfaces varies. It should be noted that the functioning of the motor oil is extremely affected by the oxidation process, and organic acids produced during the process contribute to corrosion of ICE parts. Water, diesel, cooling fluid, soot particles, asphaltene, etc. also cause irreparable damage.*

**Materials and methods.** *This paper presents the results of an extensive literature review aimed at studying the main types of motor oil pollutants. Classifications are given for the aggregate state of pollutants, as well as for possible ways of their penetration into the lubricant. Liquid pollutants are the most narrowly considered in this article. To demonstrate the negative effect of contaminants entering the engine oil, photographs of internal combustion engine parts with sediments on the surfaces of the internal combustion engine components are presented.*

**Results.** *The classification of the main pollutants of motor oils is given; the consequences arising from the ingress of foreign compounds into the lubricant in question are indicated.*

**Conclusion.** *The effect of contaminants on the parts of the internal combustion engine and the lubricant has been established. On the basis of the classification, it is possible to judge the causes of entry and the possible consequences of the impact of contamination on the operation of the engine.*

**KEYWORDS:** *engine oil, internal combustion engine, engine oil oxidation, metal surfaces, soot, sludge, coolant, diesel fuel, wear, friction*

**The article was submitted 22.11.2021; approved after reviewing 10.02.2022; accepted for publication 28.02.2022.**

**The authors have read and approved the final manuscript.**

**Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods.**

**There is no conflict of interest.**

*For citation: Pashukevich S.V. Classification of contaminants in diesel engine oils. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19 (1): 84-100. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-84-100>*

© Pashukevich S.V., 2022



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

## ВВЕДЕНИЕ

Моторное масло способствует уменьшению трения, предотвращению коррозии деталей двигателя, а также оно отводит тепло, особенно с днища поршня. Загрязнение данного вида смазочного материала происходит и при нормальной работе двигателя внутреннего сгорания. Среди наиболее распространенных загрязнителей – вода, топливо (несгоревшее или частично сгоревшее), охлаждающая жидкость, которые смешиваются с моторным маслом и вызывают в совокупности с высокой температурой его окисление. Конечно, одним из основных загрязнителей смазочных масел, приводящим к ухудшению их состава, соответственно, и снижению качества работоспособности, является топливо. Разбавление масла топливом ускоряет износ компонентов двигателя и снижает рабочие характеристики моторного масла и срок его службы. Загрязненное моторное масло может вызвать отказ компонентов двигателя, поэтому в моторное масло добавляют присадки, чтобы уменьшить окислительное повреждение, вызванное несгоревшим топливом, следами воды, наличием гликолей и других загрязнителей в масле [1, 2].

Моторные масла состоят из двух частей: базового масла (различной природы) и химических присадок для улучшения качества и

свойств масел, включая защитные присадки: 1) присадки для защиты поверхности и антикоррозионные присадки для уменьшения трения, коррозии и снижения контакта с металлом; антикоррозионные присадки для предотвращения ржавления внутренней части двигателя; присадки, очищающие поверхность от отложений и 2) присадки для улучшения работы двигателя за счет стабилизации вязкости масла, чтобы уменьшить изменение вязкости при нагревании [3].

Смазочное масло образует пленку между движущимися поверхностями, которая уменьшает трение. Однако моторное масло – кладь примесей. Они бывают в виде твердых, жидких и газообразных загрязнителей. При неконтролируемом воздействии, особенно в условиях низких температур, в моторном масле эти загрязнители могут накапливаться до чрезмерного уровня. Высокий уровень загрязнения смазочного материала вызывает износ механических компонентов, а также разрушение присадок и базовых масел. Результат – снижение производительности, сокращение срока службы двигателя и ограниченный ресурс моторного масла. Загрязнения смазочного материала уменьшают время достижения маслами своих предельных показателей и ухудшают параметры работы дизельных двигателей [4]. На рисунке 1 указаны основные типы загрязнений.



Рисунок 1 – Основные типы загрязнителей моторного масла

Figure 1 – Main types of engine oil pollutants



Рисунок 2 – Пути попадания твёрдых загрязнителей в моторное масло

Figure 2 – Ways for solid contaminants to enter the engine oil

Возможные пути попадания загрязнений в систему смазки двигателя, а также примеры загрязнителей для каждого типа приведены на рисунке 2.

Производители дизельных двигателей проявляют большую осторожность во время процессов производства и сборки для обеспечения высокого уровня качества. Однако материалы для изготовления отливок, механическая стружка, абразивные материалы, полировальные пасты и даже ворсинки остаются после изготовления и капитального ремонта. Эти загрязнители могут быстро повредить подвижные части двигателя [5, 6, 7].

Внешнее проникновение является основным источником загрязнения твердыми частицами. Частицы в воздухе в виде песка, соли и других минералов попадают через систему воздухоподдачи двигателя и смешиваются с распыленным топливом, которое сжимается, а затем сгорает. Поскольку большинство этих частиц имеет температуры плавления значительно выше температур, достигаемых при сгорании дизельного топлива, в процессе горения они остаются твердыми абразивными частицами. Загрязнение воздуха является основной причиной износа пары «кольцо–цилиндр» [8].

Сильная ударная волна давления, создаваемая во время сгорания, выталкивает газы через зазоры поршневых колец в картер двигателя. Этот процесс, известный как прорыв, переносит загрязнения в моторное масло. Частицы также могут задерживаться в масляной пленке. Затем они попадают в масляный поддон при следующем ходе поршня. Выхлопные газы попадают в смазочное масло аналогично. Эти выхлопные газы включают несгоревшее топливо, воду, окись азота, сажу и другие частично сгоревшие углеводороды. Более высокие уровни рециркуляции выхлопных газов увеличивают загрязнение смазочного масла твердыми частицами [9, 10].

Одним из путей для внешнего попадания загрязняющих веществ в моторное масло является вентиляция картера, что за счет разрежения может способствовать поступлению большого количества пыли и воды, последние попадают непосредственно в масляный поддон. Кроме того, вода в сочетании с антифризными соединениями, такими как гликоль, может подаваться в масляную полость под давлением через дефектные прокладки головки или иногда через трещину в блоке.

Внутреннее образование загрязнений происходит в результате износа механических

деталей и разрушения смазки. Износ механических компонентов в результате истирания, усталости, адгезии и коррозии приводит к попаданию вредных частиц в масло. Остатки износа находятся в виде частиц твердого металла и оксидов абразивных металлов. Частицы износа, размеры которых не контролируются стандартной фильтрацией, могут накапливаться и сильно загрязнять смазочный материал [11, 12, 13].

Ухудшение качества моторного масла – это потеря важных свойств масла плюс накопление вредных веществ, полученных в ходе эксплуатации автомобильной техники. Эти материалы включают кислоты, шламы, гели и осадки присадок. Эти загрязняющие вещества могут изнашивать движущиеся детали, а также засорять проточные каналы и поверхности теплообмена. Если в масле скапливаются продукты износа и материалы, образующиеся в результате разрушения моторного масла, то в результате увеличивается износ и образуется лавинообразное поступление загрязнений. Процесс изнашивания поверхностей частицами и образование новых частиц, которые, в свою очередь, вызывают больший износ, известен как цепная реакция износа [14].

#### **Попадание дизельного топлива в моторное масло**

Разбавление моторного масла дизельным топливом – явление, которое возникает естественным образом при каждом запуске двигателя. Данная ситуация наиболее часто встречается в дизельных двигателях, поскольку их специфика работы основана на цикле воспламенения от сжатия и, следовательно, эффективность сгорания полностью зависит от температуры двигателя, в частности от температуры камеры сгорания. Теоретически чем холоднее камера сгорания, тем выше степень разбавления моторного масла топливом. Основная проблема, связанная с разбавлением моторного масла топливом в дизельных двигателях, – это снижение вязкости моторного масла, которая потенциально оказывает значительное влияние на ухудшение качества смазочного материала между различными движущимися частями двигателя в условиях высоких нагрузок, а также в условиях низких температур [15].

Обычной причиной разбавления моторного масла топливом является утечка (прорыв) газов между поршневыми кольцами и неплотностями цилиндропоршневой группы. В идеальной системе поршень должен идеально прилегать к стенке цилиндра. Однако ни

один цилиндр не является идеально круглым, ни одна поверхность не является идеально гладкой, и нет идеального уплотнения. На каждом цилиндре двигателя имеется перекрестная штриховка из микроскопических канавок, именно они помогают со смазкой, давая моторному маслу возможность задерживаться на поверхности зеркала цилиндра. В данном случае определенное количество топлива и выхлопных газов будет выходить через уплотнение между поршневыми кольцами и цилиндром.

Мокрая укладка – явление, которое происходит в двигателях с воспламенением от сжатия. В то время как бензиновый двигатель, например, воспламеняет свою топливовоздушную смесь с помощью искры в подходящее время для инициирования сгорания, двигатель с воспламенением от сжатия полагаются исключительно на теплоту воздушного заряда в цилиндре во время процесса впрыска, чтобы инициировать сгорание. Двигатель, который не достиг рабочей температуры, будет иметь более низкую эффективность сгорания, чем «горячий» двигатель. Это связано с природой процесса горения, заряд сжатого воздуха в двигателе при рабочей температуре (или близкой к ней) содержит больше тепла, чем заряд сжатого воздуха двигателя, который значительно ниже рабочей температуры.

В условиях, когда температура в камере сгорания низкая, впрыскиваемое топливо имеет тенденцию воспламеняться на более позднем этапе такта сжатия, чем когда температура в камере сгорания выше. В таких случаях распыляемое форсункой топливо будет иметь тенденцию отлагаться на стенках цилиндра, смывая моторное масло и в конечном итоге проходя через неплотности поршневых колец и попадая в картер [16].

Мокрая укладка и, следовательно, разбавление моторного масла топливом обычно наиболее заметно в условиях низких температур сгорания. Эти события можно разделить на два случая: длительная работа двигателя на холостом ходу и период, в течение которого работающий двигатель еще не прогрелся до рабочей температуры. Первоначальный запуск дизельного двигателя, особенно в холодную погоду, также представляет собой условия, при которых разжижение моторного масла топливом происходит с большей скоростью. Несмотря на то, что для обеспечения возможности сгорания вырабатывается достаточно тепла, стенки цилиндра и общая температура самого цилиндра относительно низкие.

По этой причине обычно не рекомендуется оставлять работать дизельный двигатель на холостом ходу, чтобы довести его до полной рабочей температуры. Фактически дизельный двигатель редко достигает рабочей температуры в течение разумного промежутка времени без привода, двигатель нагревается за гораздо меньшее время, если приложить нагрузку. Это не означает, что дизельный двигатель следует нагружать сразу после запуска, однако нельзя допускать, чтобы он работал на холостом ходу в течение продолжительных периодов времени; от 3 до 5 мин (в зависимости от температуры окружающей среды) работы на холостом ходу обычно достаточно, чтобы давление масла стабилизировалось, а температура двигателя достигла подходящего диапазона перед поездкой в холодных условиях. В теплую погоду вполне достаточно 1–2 мин работы двигателя на холостом ходу перед поездкой.

Попадание топлива в моторное масло стало еще большей проблемой с введением сажевого фильтра, который требует цикла регенерации для периодической очистки фильтра от твердых частиц. Во время цикла регенерации в выхлопной системе требуется значительное количество тепла, чтобы эти частицы сгорели. Следовательно, необходимо впрыскивать топливо в поток выхлопных газов, повышая температуру и создавая условия, в которых эти частицы могут полностью сгореть и выбрасываться из выхлопной трубы.

Поскольку топливо впрыскивается в цилиндр во время такта выпуска, оно следует по пути выходящего потока выхлопных газов и входит в выпускной коллектор в качестве распыленного неочищенного топлива. Поскольку при впрыске этого топлива не происходит возгорания, возникает тенденция отложения на стенках цилиндра, и в процесс вступает ранее описанное условие «мокрой укладки». Ответом на проблемы, с которыми сталкиваются циклы пост-впрыска для регенерации сажевого фильтра, было введение 9-го или 7-го инжектора, в зависимости от числа цилиндров двигателя, чтобы топливо могло впрыскиваться в поток выхлопных газов, предотвращая попадание его в масло. Наиболее серьезные проблемы при разбавлении моторного масла топливом вызывают снижение вязкости и деградация масла. Дизельное топливо в масле увеличивает скорость разложения моторного масла, а также снижает его вязкость. По мере того, как вязкость уменьшается, и масло становится более жидким, а это приводит к потере несущей способности масел, что способствует

повышенным износам деталей двигателей. Моторное масло – это единственный слой защиты между движущимися частями двигателя. Тонкая пленка моторного масла подвергается экстремальному давлению и усилиям, поскольку она создает барьер между двумя движущимися / вращающимися поверхностями. По мере разжижения масла этот барьер может выйти из строя, увеличивая скорость износа. По мере износа компонентов физические допуски между двумя поверхностями увеличиваются [17].

#### **Попадание воды в моторное масло**

Вода может существовать в масле в трех состояниях или фазах. Первое состояние, известное как растворенная вода, характеризуется отдельными молекулами воды, рассредоточенными в масле. По этой причине масло может содержать значительную концентрацию растворенной воды без видимых признаков ее присутствия. Как только количество воды превысит максимальный уровень, чтобы она оставалась растворенной, масло насыщается. В этот момент вода переходит во взвешенное состояние и находится в виде микроскопических капель, известных как эмульсия.

Добавление большего количества воды к эмульгированной смеси масло/вода приведет к разделению двух фаз с образованием слоя свободной воды, а также свободного и/или эмульгированного масла.

В системе смазки двумя наиболее вредными фазами являются свободная и эмульгированная вода. В подшипниках, например несжимаемости воды по отношению к нефти, может привести к потере гидродинамической масляной пленки, что, в свою очередь, приводит к чрезмерному износу. Даже один процент воды в масле может сократить срок службы подшипников скольжения на 90%.

С подшипниками качения дело обстоит еще хуже. Мало того, что вода разрушает прочность масляной пленки, но и свободная, и эмульгированная вода при экстремальных температурах и давлениях, возникающих в зоне нагрузки подшипника качения, может привести к мгновенному испарению, вызывающему эрозионный износ.

При определенных условиях молекулы воды могут быть разорваны на составляющие атомы кислорода и водорода в результате высокого давления, создаваемого в зоне контакта деталей подшипника качения. Из-за своего относительно небольшого размера ионы водорода, образующиеся в этом процессе, могут поглощаться поверхностью дорожки качения

подшипника, что приводит к явлению, известному как водородное охрупчивание.

Водородная хрупкость приводит к тому, что материал подшипника становится хрупким и склонным к растрескиванию под поверхностью дорожки качения. Когда эти подповерхностные трещины распространяются на поверхность, это может привести к появлению точечной коррозии и сколов.

Поскольку воздействие свободной и эмульгированной воды более вредно по сравнению с растворенной водой, общее практическое правило заключается в том, чтобы уровень влажности оставался значительно ниже точки насыщения. Для большинства используемых масел это означает от 100 до 300 частей на миллион или меньше в зависимости от типа масла и температуры.

Однако даже на этих уровнях все равно может быть нанесен значительный ущерб. Вообще не бывает слишком мало воды и необходимо приложить все разумные усилия для минимального загрязнения моторного масла водой.

Вода не только оказывает прямое вредное воздействие на компоненты машин, но также играет непосредственную роль в скорости старения смазочных масел. Присутствие воды в смазочном масле может привести к десятикратному увеличению степени окисления, что приведет к преждевременному старению масла, особенно в присутствии каталитических металлов, таких как медь, свинец и олово.

Кроме того, известно, что некоторые типы синтетических масел, такие как сложные эфиры фосфорной кислоты и сложные эфиры двухосновной кислоты, вступают в реакцию с водой, что приводит к разрушению основного компонента и образованию кислот.

Загрязнение влагой может повлиять не только на базовое масло. Некоторые добавки, такие как сернистые присадки и фенольные антиоксиданты, легко гидролизуются водой, что приводит как к гибели присадок, так и к образованию кислотных побочных продуктов.

Эти кислотные побочные продукты могут затем вызвать коррозионный износ, особенно в компонентах, содержащих мягкие металлы, такие как баббит, используемый в подшипниках скольжения, а также в деталях из бронзы и латуни. Другие добавки, например деэмульгирующие агенты, диспергаторы, детергенты и ингибиторы ржавчины, могут вымываться излишней влажностью. Это приводит к образованию и накоплению шлама и отложений, засорению фильтров и плохой деэмульгируемости масла/воды [18].

Небольшая доля воды, которая присутствует в моторном масле, не окажет большого влияния ни на вязкость смазочного материала, ни на коэффициент трения. Когда масло не будет подвергаться эмульгированию, вода не причинит вреда при условии, что она попадет в поддон таким образом, что не сможет попасть во всасывающее устройство насоса.

Опасная точка достигается, когда либо смесь моторного масла и воды становится слишком вязкой, либо скопление свободной воды достигает впускного отверстия насоса [19].

Когда продукты сгорания просачиваются мимо поршней, водяной пар поступает в область картера, следовательно, паровая часть вытекающих газов будет конденсироваться. При первом запуске холодного двигателя воздух в картере нагревается от горячего днища поршня. Из насыщенного паром воздуха будет конденсироваться влага, когда он соприкоснется с холодным маслом, холодными сторонами картера и стенками масляного поддона.

Самое главное, что значительная прямая конденсация воды будет происходить в рабочей части цилиндра до тех пор, пока температура будет ниже 100 °С. Такое отложение, конечно, незначительно сказывается в период теплой погоды, но на него приходится основная часть воды, образующейся при зимней эксплуатации автомобилей.

Как только температура масла поднимется выше 100 °С, при циркуляции масла вода, присутствующая в виде эмульгированной, испаряется. Таким образом, в летних условиях вождения при каждом запуске двигателя будет образовываться некоторое количество воды, и эффект утечки через поршни, конечно, во многом одинаков независимо от температуры атмосферы. Так как температура деталей камеры сгорания двигателя при нормальной работе будет более 150 °С, а температура масла не менее 120 °С, смазка будет отторгать воду быстрее, чем она поступает [20].

Эмульсия более вязкая, чем чистое масло, но не настолько, чтобы мешать нормальной работе, по крайней мере, если количество воды не превышает 6%.

Основная масса воды, которая попадает в масляный поддон, образуется в результате прямой конденсации на внутренних стенках цилиндров. Опускающийся поршень обнажает поверхность железа с масляным покрытием при температуре всего на несколько градусов выше температуры воды в рубашке. При температуре воды 65 °С внутренняя стенка

цилиндра может быть значительно горячее, чем сама вода, но при низких температурах разница очень незначительна. В течение большей части рабочего хода и всего такта выпуска цилиндр заполняется газами, значительную часть которых составляет водяной пар. Во время тактов рабочего хода и выпуска времени достаточно для того, чтобы в цилиндре сконденсировалось заметное количество воды. Образовавшаяся таким образом вода не выходит вместе с выхлопными газами, она остается в цилиндре и попадает в масляный поддон.

Если бы смазка цилиндра или поршня была идеальной, то есть если бы смазка была настолько хорошей, насколько это возможно в идеальном подшипнике без какого-либо металлического контакта между поршневыми кольцами и стенкой цилиндра, вероятно, не имело бы большого значения, существовал ли небольшой процент воды в свободном состоянии или в виде эмульсии. Но быстрота износа поршневых колец является доказательством того, что смазка далека от идеала. Кроме того, в период низкотемпературных условий, когда осаждение воды происходит наиболее быстро, осаждение тяжелых остатков топлива также максимально, и они имеют мощное действие растворителя масляной пленки. Естественное несовершенство смазки плюс растворение масляной пленки означают, что части стенки цилиндра фактически обнажаются при рабочем ходе. При попадании в моторное масло вода будет иметь тенденцию накапливаться в этих открытых местах и смачивать их, что затруднит восстановление масляной пленки. Можно допустить, что эффект разбавителя в виде топлива при смывании масляной пленки со стенок оказывает большее влияние на ускорение износа, чем осаждение небольшого количества задействованной воды, но последним нельзя полностью пренебрегать. Хотя может быть трудно определить точную величину с точки зрения снижения износа поглощающего воду свойства масла, тот факт, что оно должно быть полезным, – неоспорим [21, 22, 23].

#### **Загрязнение моторного масла гликолем**

Гликоль, основной ингредиент антифриза, обычно смешивается с водой в соотношении 50/50 с образованием жидкого «хладагента» для передачи тепла, повышения температуры кипения и понижения температуры замерзания. Когда в состав входят присадки, охлаждающая жидкость может эффективно защищать от коррозии и кавитации [24].

В состав антифризов, используемых в качестве охлаждающих жидкостей, входит широкий ассортимент металлоорганических и органических добавок. Они используются для защиты металлов в системе охлаждения от коррозии/кавитации, контроля накипи, предотвращения пенообразования и поддержания pH. Общие примеры добавок включают различные фосфаты, борат натрия, молибдат, силикат натрия, себацинат калия и нитрат натрия. Как и присадки в моторном масле, эти присадки будут способствовать изменению концентрации элементов натрия, бора, калия, кремния и фосфора в охлаждающей жидкости.

Гликоль может попадать в моторные масла и другие смазочные масла различными способами, такими как дефектные или изношенные уплотнения, «выдутые» прокладки головки блока цилиндров, неправильно затянутые болты с головкой, термически деформированные или треснувшие головки цилиндров (от низкого уровня охлаждающей жидкости до заедания термостата), треснувший блок или головка блока цилиндров от замерзшей охлаждающей жидкости, неправильно обработанные поверхности головки и блока цилиндров, коррозионное повреждение гильз цилиндров, кавитационная эрозия/коррозия гильз цилиндров, электрохимическая эрозия, повреждение или корродирование сердечников охладителя, отказ уплотнения водяного насоса и засорение сливного отверстия.

Фактически, по оценкам крупного производителя дизельных двигателей, 53% всех серьезных отказов двигателей происходят из-за утечек охлаждающей жидкости. Для многих дизельных двигателей и двигателей, работающих на природном газе, самый высокий риск загрязнения возникает, когда двигатель не заведен. В таких случаях охлаждение двигателя при периодической работе может привести к внутренним утечкам, связанным с термической ползучестью, например в головках цилиндров, где существует риск рецессии или смещения уплотнительных прокладок. Более высокое гидростатическое давление охлаждающей жидкости по отношению к системе смазочного масла увеличивает риск, когда двигатель не работает. Это может привести к попаданию охлаждающей жидкости в смазку [25, 26].

Другой распространенный источник утечки в двигателях с мокрыми гильзами цилиндров связан с химико-механической перфорацией гильз, вызванной паровой кавитацией. Это происходит, когда гильзы сильно вибрируют



(со стороны нагрузки) в ритме движения поршня, сжатия и сгорания. Это движение заставляет часть волн давления создавать области отрицательного давления, в которых образуются пузырьки пара (полости). При горении в камере сгорания пузырьки пара лопаются со скоростью звука, вызывая струи жидкости и высочайшее поверхностное давление. Такая локализованная энергия может буквально взорвать небольшие дыры в защитной оксидной пленке на стенке гильзы, как это происходит в паровой кавитации в гидравлических насосах.

Повреждение может быть дополнительно вызвано химическим воздействием на металл, обнаженный во время этой кавитации. Со временем это может привести к перфорации хвостовика и утечке охлаждающей жидкости. Режим разрушения распространяется за счет комбинации механического (локализованная кавитация) и химического (коррозия обнаженного основного металла) воздействия [27].

Было обнаружено, что некоторые добавки, такие как молибдат и нитрит натрия, резко замедляют развитие кавитационной коррозии. Если защитная оксидная пленка расслаивается под действием энергии кавитации, добавка преобразует барьерную пленку, чтобы остановить дальнейшее её распространение. Однако для обеспечения качества важна концентрация этих добавок, вводимых в охлаждающую смесь. Недостаточное содержание может привести к ускоренной точечной коррозии, в то время как избыточная концентрация может вызвать гелеобразование охлаждающей жидкости, коррозию припоя на основе свинца и другие проблемы.

Негативные моменты, связанные с попаданием охлаждающей жидкости в моторное масло, заключаются в следующих моментах: постоянная утечка охлаждающей жидкости постепенно приводит к высокой концентрации гликоля в смазочном материале; период интенсивной эксплуатации, во время которой моторное масло становится очень горячим и вызывает разложение гликоля, а затем полимеризацию с образованием лаковых соединений, которые остаются растворенными в горячем смазочном материале; при выключении двигателя масло охлаждается, и лаковая пленка проявляется на поверхностях деталей двигателя [28 - 30].

Ключевым элементом являются продукты разложения или окисления гликоля, а не сам гликоль. Гликоль, попав в картер, разлагается до гликолевой, глиоксалевой кислоты, а

также глиоксаля. Этиленгликоль, попав в картер, может деградировать до любого из ряда низких органических альдегидов, кислот или диацидов. Кроме того, в дополнение к полимеризации в лаковые соединения эти продукты разложения очень агрессивны к сплавам, содержащим медь и свинец.

Нерастворимые в масле продукты разложения гликоля очень агрессивны к подшипникам даже при низкой концентрации [31].

#### **Потеря дисперсности и засорение фильтра**

Кислоты и вода, образующиеся в масле картера в результате загрязнения охлаждающей жидкостью, часто нарушают диспергируемость сажи даже при низком её содержании. Как только сажа начинает оседать на фильтре, может возникнуть цепная реакция, при этом возникают следующие отказы: потеря противоизносной защиты, липкий осадок на поверхностях клапанной площадки и углеродистые отложения на кольцевых канавках, посадочных площадках днища поршня, компонентах клапанного механизма и масляных каналах к подшипникам и т. д. Затем цепная реакция обретает новую жизнь, поскольку детергенты и диспергаторы, поступающие со свежим моторным маслом, могут мобилизовать шлам и отложения. Затем, через несколько минут после замены масла и фильтра, новый фильтр может снова засориться [32, 33]. Ниже (рисунок 3) приводится краткое изложение этой реакции.

#### **Образование сажи в картере двигателя**

Сажа – это микроскопическая углеродистая частица, являющаяся продуктом неполного сгорания углеводородов (в данном случае дизельного топлива). Сажа состоит из углерода, золы и ненасыщенных (несгоревших) углеводородов. Ненасыщенные углеводороды по существу представляют собой ацетилен и полициклические ароматические углеводороды. Эти компоненты обладают особенно высоким уровнем кислотности и летучести [34 - 36]. Измерения показали, что сажа обычно содержит 90% углерода, 4% кислорода и 3% водорода, а остальное состоит из азота, серы и следов металлов. Было измерено, что отдельные или первичные частицы сажи от сжигания дизельного топлива составляют приблизительно 40 нм. Из-за коллоидных свойств сажи частицы агломерируются максимум примерно до 500 нм, при этом средний размер агломерата сажи составляет 200 нм. Частицы сажи, как правило, более распространены в дизельных двигателях, чем в бензиновых двигателях, из-за

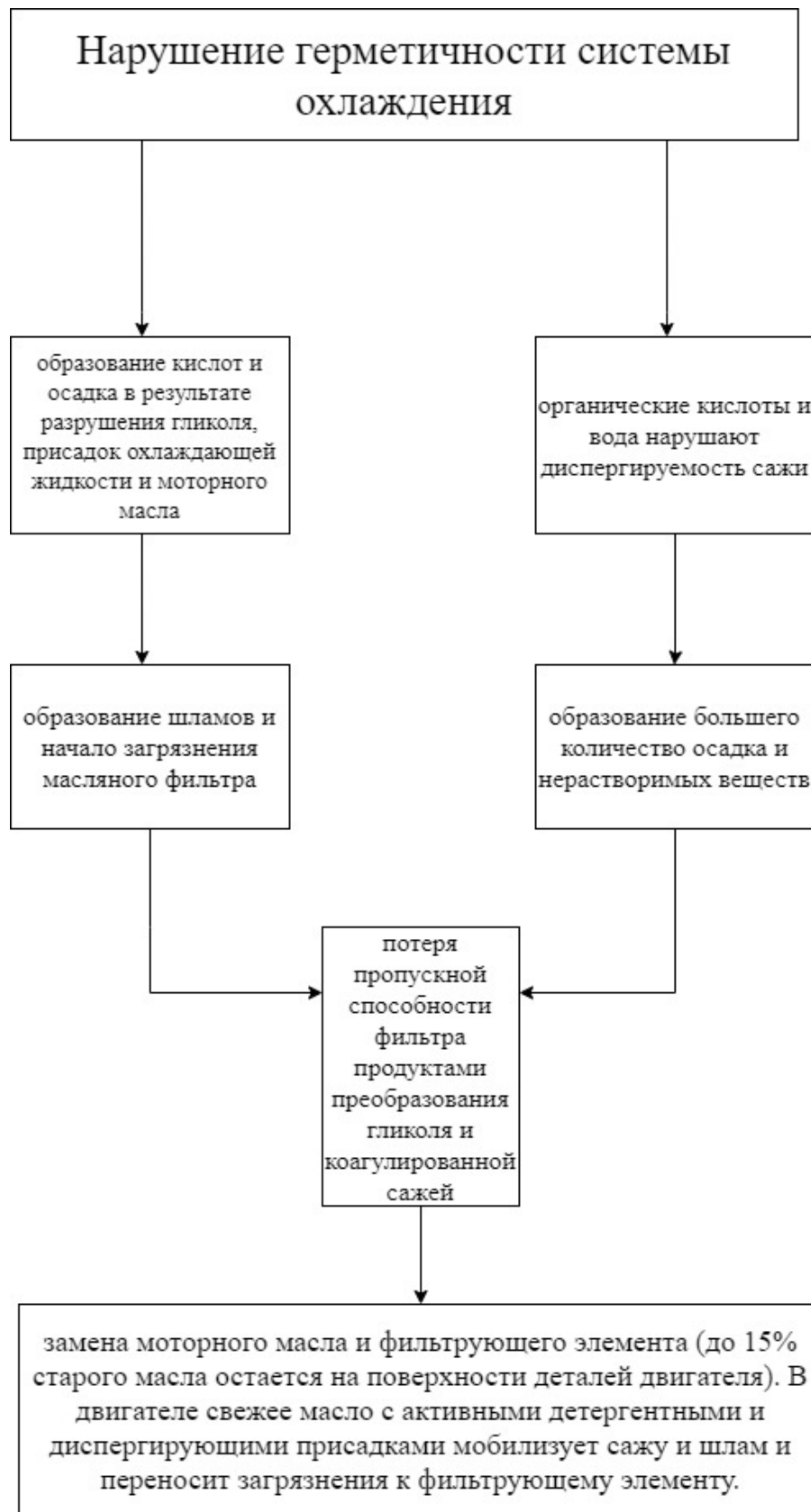


Рисунок 3 – Последствия нарушения герметичности системы охлаждения

Figure 3 – Consequences of a leakage in cooling system

различий в механизмах сгорания. Дизельные двигатели работают при более высоком соотношении воздуха и топлива, но в качестве топлива используются более тяжёлые фракции углеводородов, что, как правило, и приводит к более высокому уровню образования сажи в двигателе. Большинство современных дизельных двигателей работает с использованием прямого впрыска топлива, которое закручивается в камере сгорания для содействия смешиванию топлива и воздуха с образованием однородной рабочей смеси. Возгорание начинается вблизи точки впрыска и происходит очень быстро в виде диффузионного пламени. В этот момент воздух и топливо хорошо перемешиваются, но особенно на переходных режимах смесь очень богата топливом, что приводит к образованию очень высокого уровня сажи. После диффузионного горения этот процесс проходит через остальную часть камеры сгорания путем пиролизного горения, в результате которого медленно сжигается большая часть оставшегося топлива. Это медленное сжигание приводит к образованию большего количества твердых частиц (сажи) и несгоревших углеводородов в конце процесса горения. В процессе горения образуются и разрушаются частицы сажи. Они создаются описанным выше процессом и разрушаются окислением. Окисление – это механизм, который возникает, когда сажа или предшественники сажи вступают в контакт с различными видами окислителей. Когда это происходит, углеводороды, попавшие в сажу, выгорают, и размер частиц уменьшается. Во время стадии процесса диффузионного горения частицы сажи, образующиеся на начальной стадии процесса горения, вступают в контакт с гораздо большим объемом воздуха по сравнению с топливом, и большая часть частиц сажи окисляется. Требуется дальнейшее окисление, чтобы уменьшить количество сажи, окончательно израсходованной. Когда выпускной клапан открывается, продукты сгорания выбрасываются в выхлопную систему, которая содержит больше видов окислителей. Окислительные каталитические нейтрализаторы используются для дальнейшего уменьшения количества сажи, выбрасываемой из выхлопной трубы. Большая часть образующейся сажи окисляется до выхлопа. Возможно, именно поэтому большинство частиц сажи поглощается смазкой и относительно мало расходуется [37, 38].

Концентрация образующихся частиц сажи увеличивается с увеличением соотношения воздуха и топлива. Когда соотношение возду-

ха к топливу приближается к стехиометрическому (14,5 для дизельного топлива), скорость образования сажи резко возрастает. Это связано с тем, что вблизи стехиометрического соотношения в цикле недостаточно времени и кислорода для полного сжигания всего топлива; кроме того, будет низкая доля окисляющих веществ для окисления сажи. Как правило, при значениях 20-процентного обеднения топлива стехиометрически и выше, которые используются в настоящее время, в процессе сгорания образуется чрезмерное количество сажи. Избыток воздуха необходим для повышения эффективности дизельного цикла и снижения выбросов углеводородов. Исследования показали, что сажа, содержащаяся в смазке двигателя, и сажа, выбрасываемая из выхлопной трубы, сильно отличаются. Это может быть частично связано с процессами окисления, через которые проходят продукты сгорания. Как упоминалось выше, сажа, содержащаяся в смазочных материалах, имеет очень высокое содержание углерода и низкое содержание кислорода. Частицы сажи, как правило, считаются чрезвычайно твердыми по отдельности и гораздо более мягкими при агломерации. Сажа, взятая из двигателя, работающего с EGR, немного тяжелее, чем сажа из двигателя без EGR. Это увеличение твердости, возможно, связано с процессом вторичного нагрева и окисления, который испытывают частицы.

Из сажи, образующейся в двигателе, только 29% попадает в атмосферу через выхлопную трубу, а остальная часть оседает на стенках цилиндра и головке поршня. Из сажи, которая остается в двигателе (в основном в смазке), 3% приходится на выбросы газов, остальное происходит в результате соскабливания поршневыми кольцами отложений сажи в цилиндре, которые затем попадают в масляный поддон. Затем она перемещается по двигателю, где сажу можно ввести в контакты подвижных компонентов. Внутри клапанного механизма имеется множество подвижных компонентов, все различной геометрии и движения. Существуют контакты скольжения, качения-скольжения и возвратно-поступательного движения, некоторые из них конформны. Из-за различных движений и нагрузок на каждой границе раздела будут очевидны разные режимы смазки. Это дополнительно усложняется механизмами нанесения смазки, которые варьируются от контактов, где используется положительное смазывание, до тех, где смазка достигает контакта косвенно за счет смазки разбрызгиванием. В некоторых случаях контакты мало смазывают-

ся из-за их расположения, и могут возникнуть проблемы с масляным голоданием; присутствие сажи еще больше усугубит это.

Было предложено три различных механизма износа из-за загрязнения сажей. Раундс [39] постулировал, что химическая адсорбция противоизносных компонентов смазки сажей снижает способность смазки защищать поверхности. Другие исследователи предположили, что износ сажей мог произойти из-за недостатка смазки в контакте. Это когда сажа агломерируется до размеров, превышающих толщину масляной пленки, и блокирует попадание смазки в контакт. Последний предложенный механизм предполагает, что изнашивание поверхностей происходит в результате частичного истирания, при котором сажа действует как третье тело. В качестве агломератов сажа до-

статочно мягкая, но в виде отдельных частиц сажа считается достаточно твердой, чтобы изнашивать металлические поверхности.

Контроль отложений в двигателе является фундаментальной необходимостью для обеспечения длительного срока службы и эффективности работы двигателя. Образование отложений зависит от конструкции двигателя, условий эксплуатации, технического обслуживания, типа топлива и сгорания, а также от характеристик масла. Отложения влияют на мощность двигателя и его производительность, износ, шум, плавность, экономичность, срок службы и стоимость обслуживания [40, 41]. Наглядно усугубляющее воздействие загрязненных моторных масел на детали двигателя можно продемонстрировать с помощью рисунков 4 и 5.

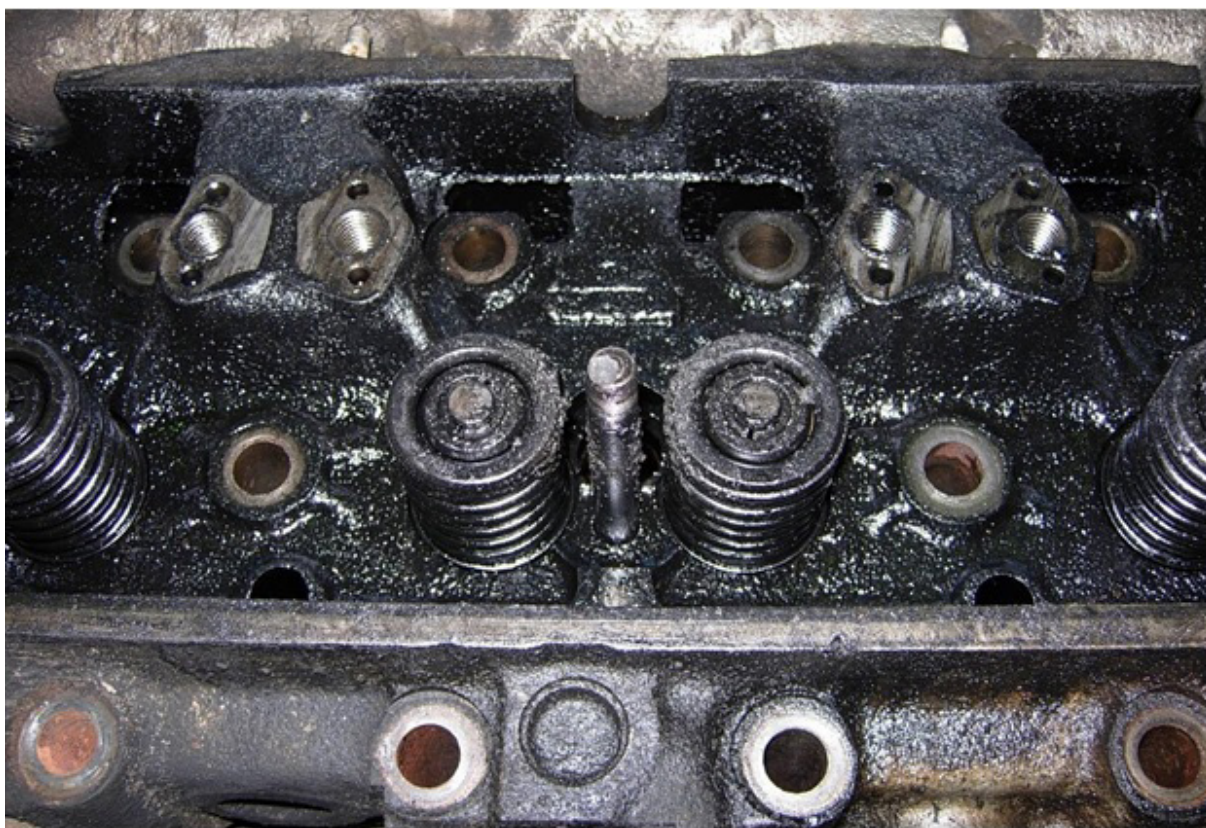


Рисунок 4 – Отложения на поверхностях головок блока цилиндров

Figure 4 – Sediments on cylinder head surfaces

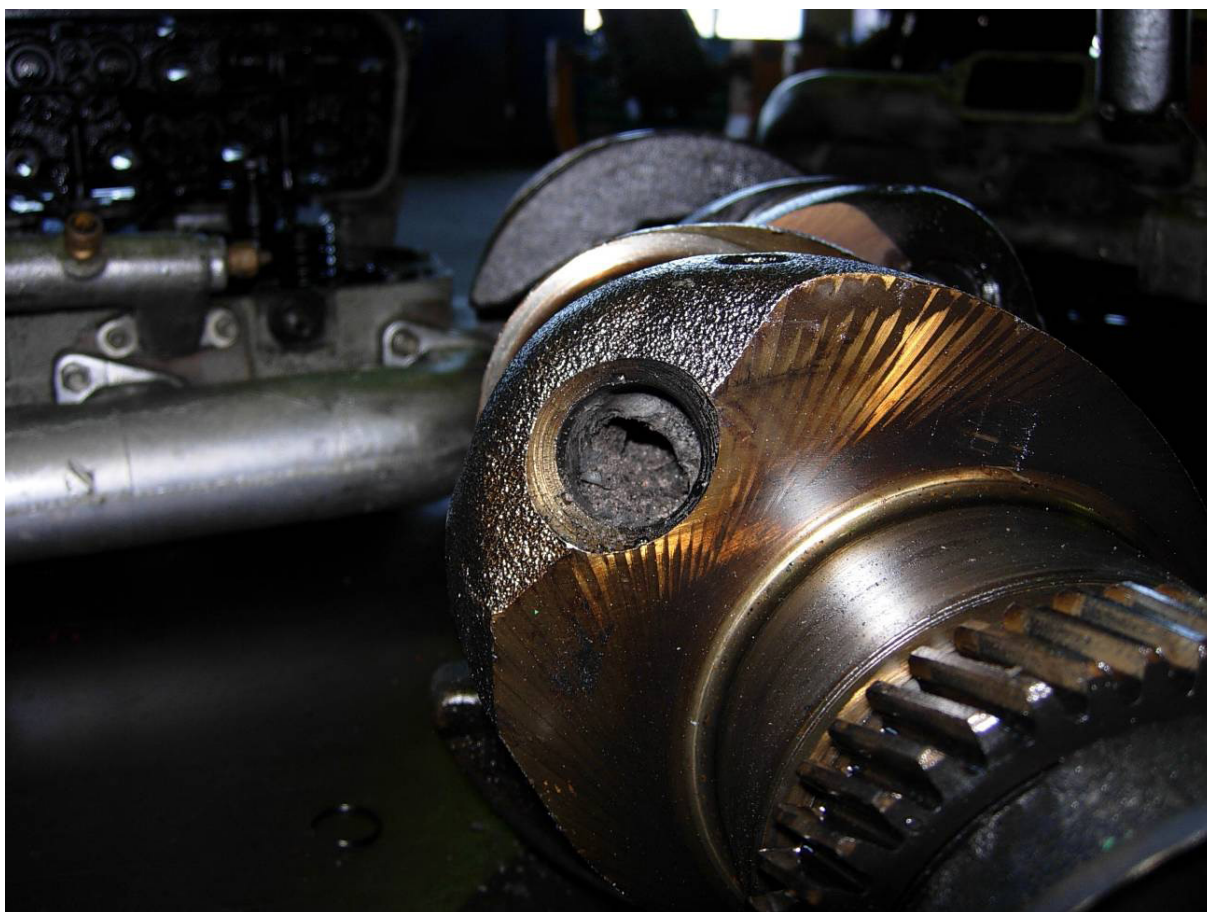


Рисунок 5 – Отложения в ловушке коленчатого вала двигателя

Figure 5 – Deposits trapped in the engine crankshaft

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе приведена классификация загрязнений моторного масла дизельных двигателей по агрегатному состоянию.

2. Рассмотрены пути попадания загрязнений в моторные масла дизельных двигателей.

3. Приведены результаты воздействия загрязнений на состояние дизельных двигателей и рассмотрены механизмы воздействия жидких загрязнений на детали двигателей.

4. При возникновении шлама, вода и охлаждающая жидкость являются существенным фактором, в целом любое состояние, которое способствует проникновению и удержанию воды в моторном масле, способствует образованию шлама.

5. Работавшее масло из двигателя внутреннего сгорания поршневого типа представляет собой смесь продуктов сильного окисления углеводородов. Изменения в масле

особенно характерны для дизельных двигателей, где масло после эксплуатации содержит такие продукты глубокой окислительной конверсии, как нагар и смолистые вещества. Изменение температуры масла в картере в пределах всего 80–145 °С уже дает начальную степень окисления. Если объем системы смазки двигателя уменьшается, то концентрация продуктов окисления в масле увеличивается.

6. При окислении и старении смазочного материала образуются кислые побочные продукты в результате химического разложения базовой основы и присадок в присутствии воздуха и тепла. Высокая концентрация кислотных соединений в смазочном материале может привести к коррозии деталей машин из-за загрязненного масла, нарушению работы фильтров из-за образования лака и шлама. Это приводит к образованию отложений на большинстве поверхностей двигателя, включая такие, которые могут вызвать залипание поршневых колец в их канавках.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Al S. O. A., Salehi F. M., Farooq U., Morina A., Neville A. Chemical and physical assessment of engine oils degradation and additive depletion by soot. *Tribology International*. 2021. 160. 107054. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107054>
2. Rostek E., Babiak M. The experimental analysis of engine oil degradation utilizing selected thermoanalytical methods. *Transportation Research Procedia*. vol. 40. 2019. pp. 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.014>
3. Heredia-Cancino J. A., Ramezani M., Álvarez-Ramos M. E. Effect of degradation on tribological performance of engine lubricants at elevated temperatures. *Tribology International*. 2018. 124: 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.04.015>
4. Mohanty S., Hazra S., Paul S. Intelligent prediction of engine failure through computational image analysis of wear particle. *Engineering Failure Analysis*. 2020. vol. 116. pp. 104731. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104731>
5. Deulgaonkar V. R., Ingolikar N., Borkar A., Ghute S., Awate N. Failure analysis of diesel engine piston in transport utility vehicles. *Engineering Failure Analysis*. 2021. 120: 105008, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105008>.
6. Notay R. S., Priest M., Fox M. F. The influence of lubricant degradation on measured piston ring film thickness in a fired gasoline reciprocating engine. *Tribology International*. 2019. 129: 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.07.002>
7. Sun Z., Wang Y., Yuan Ch. Influence of oil deposition on the measurement accuracy of a calorimetric flow sensor. *Measurement*. 2021. 185: 110052. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110052>.
8. Bagi S., Sharma V., Aswath P. B. Role of dispersant on soot-induced wear in Cummins ISB engine test. *Carbon*. 2018. 136: 395-408. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.066>.
9. Raposo H., Farinha J.T, Fonseca I., Galar D..Predicting condition based on oil analysis – A case study. *Tribology International*. 2019. 135: 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.041>.
10. Vaitkunaite G., Espejo C., Wang Ch., Thiébaud B., Charrin C., Neville A., Morina A.. MoS<sub>2</sub> tribofilm distribution from low viscosity lubricants and its effect on friction. *Tribology International*. 2020. 151: 106531. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106531>.
11. Baskov V., Ignatov A., Polotnyanshikov V. Assessing the influence of operating factors on the properties of engine oil and the environmental safety of internal combustion engine. *Transportation Research Procedia*. 2020. 50: 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.005>.
12. Esfe M. H., Esfandeh S., Arani A. A. A. Proposing a modified engine oil to reduce cold engine start damages and increase safety in high temperature operating conditions. *Powder Technology*. 2019. 355: 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.009>.
13. Wang Y., Chen Yu, Liang X., Tan P., Deng S. Impacts of lubricating oil and its formulations on diesel engine particle characteristics. *Combustion and Flame*. 2021. 225: 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.10.047>.
14. Vrcek A., Hultqvist T., Baubet Y., Björling M., Marklund P., Larsson R. Micro-pitting and wear assessment of engine oils operating under boundary lubrication conditions. *Tribology International*. 2019. 129: 338-346. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.032>.
15. Laad M., Jatti V. K. S. Titanium oxide nanoparticles as additives in engine oil, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 2018. 30: 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2016.01.008>.
16. Li D., Kong N., Zhang B., Zhang Bo, Li R., Zhang Q. Comparative study on the effects of oil viscosity on typical coatings for automotive engine components under simulated lubrication conditions. *Diamond and Related Materials*. 2021. 112: 108226. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108226>.
17. Zhang W., Zhang Z., Ma X., Awad O. I., Shuai Y.Li, S, Xu H. Impact of injector tip deposits on gasoline direct injection engine combustion, fuel economy and emissions. *Applied Energy*. 2020. 262 : 114538. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114538>.
18. Tormos B., Pla B., Bastidas S., Ramírez L., Pérez T. Fuel economy optimization from the interaction between engine oil and driving conditions. *Tribology International*. 2019. 138: 263-270. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.05.042>.
19. Slavchov R. I., Salamanca M., Russo D., Salama I., Mosbach S., Clarke S. M., Kraft M., Lapkin A. A., Filip S.V. The role of NO<sub>2</sub> and NO in the mechanism of hydrocarbon degradation leading to carbonaceous deposits in engines. *Fuel*. 2020. 267:117218. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117218>.
20. Burke R.D., Madamedon M., Williams R. Newly identified effects of injector nozzle fouling in diesel engines. *Fuel*. 2020. 278:118336. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118336>.
21. Olabi A.G., Maizak D., Wilberforce T. Review of the regulations and techniques to eliminate toxic emissions from diesel engine cars. *Science of The Total Environment*. 2020. 748: 141249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141249>.
22. Qian Y., Li Z., Yu L., Wang X., Lu X. Review of the state-of-the-art of particulate matter emissions from modern gasoline fueled engines. *Applied Energy*. 2019. 238: 1269-1298. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.179>.
23. Sujesh G., Ramesh S. Modeling and control of diesel engines: A systematic review. *Alexandria Engineering Journal*. 2018. 57: 4033-4048. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.02.011>.
24. Kozina A., Radica G., Nižetić S. Analysis of methods towards reduction of harmful pollutants from diesel engines. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 262: 121105. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121105>.
25. Ferraro G., Fratini E., Rausa R., Baglioni P. Impact of oil aging and composition on the morphology and structure of diesel soot. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018. 512: 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.10.033>.

26. Xu H.T., Luo Z.Q., Wang N., Qu Z.G., Chen J., An L. Experimental study of the selective catalytic reduction after-treatment for the exhaust emission of a diesel engine. *Applied Thermal Engineering*. 2019. 147: 198-204. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.067>.

27. Haas F. M., Won S. H., Dryer F. L., Pera C. Lube oil chemistry influences on autoignition as measured in an ignition quality tester. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2019. 37:4645-4654. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.165>.

28. Kalghatgi G. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? *Applied Energy*. 2018. 225: 965-974. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.076>.

29. Abián M., Martín C., Nogueras P., Sánchez-Valdepeñas J., Rodríguez-Fernández J., Lapuerta M., Alzueta M. U. Interaction of diesel engine soot with NO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> at diesel exhaust conditions. Effect of fuel and engine operation mode. *Fuel*. 2018. 212: 455-461. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.025>.

30. Deulgaonkar V. R., Pawar K., Kudle P., Raverkar A., Raut A. Failure analysis of fuel pumps used for diesel engines in transport utility vehicles. *Engineering Failure Analysis*. 2019. 105: 1262-1272. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.048>.

31. Venkatachalam G., Kumaravel A. Experimental Investigations on the Failure of Diesel Engine Piston. *Materials Today: Proceedings*. 2019. vol. 16. pp. 1196-1203. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.214>.

32. Hu C., You G., Liu J., Du Sh., Zhao X., Wu S. Study on the mechanisms of the lubricating oil antioxidants: Experimental and molecular simulation. *Journal of Molecular Liquids*. 2021. 324:115099. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115099>.

33. Agocs A., Nagy A. L., Tabakov Z., Perger J., Rohde-Brandenburger J., Schandl M., Besser Ch., Dörr N. Comprehensive assessment of oil degradation patterns in petrol and diesel engines observed in a field test with passenger cars – Conventional oil analysis and fuel dilution. *Tribology International*. 2021. 161:107079. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107079>.

34. Rossegger B., Eder M., Vareka M., Engelmayer M., Wimmer A. A novel method for lubrication oil consumption measurement for wholistic tribological assessments of internal combustion engines. *Tribology International*. 2021. 162: 107141. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107141>.

35. Temizer I., Cihan O. Experimental and numerical evaluation of combustion analysis of a DI diesel engine. *Energy Reports*. 2021. 7: 5549-5561. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.192>.

36. Korneev S.V., Permyakov V.B., Bakulina V.D., Yarmovich Y.V., Pashukevich S.V. Influence of high temperatures on changes in the performance characteristics of motor oils when diluted with fuel. *AIP Conference Proceedings: "Oil and Gas Engineering, OGE 2020"* 2020: 020010. <https://doi.org/10.1063/5.0026994>

37. Остриков В.В., Афоничев Д.Н., Оробинский В.И., Балабанов В.И. Удаление продуктов старения

из работающих моторных масел без их слива из картеров двигателей машин // Химия и технология топлив и масел. 2020. № 3. С. 18-21.

38. Утаев С.А. Закономерности накопления загрязняющих примесей моторных масел в процессе эксплуатации двигателей // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 2. С. 207-214.

39. Зазуля А.Н., Белов С.А. Изменение свойств моторного масла во время эксплуатации в дизельном двигателе // Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов. 2020. № 1. С. 5-8.

40. Остриков В.В., Сазонов С.Н., Афоничев Д.Н., Козлов В.Г. Изменение вязкости моторного масла как показатель технического состояния двигателя внутреннего сгорания и свойств смазочного материала // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2019. Т. 12. № 3. С. 54-61.

41. Бусин И.В., Остриков В.В., Корнев А.Ю. Технология очистки работающего моторного масла от продуктов старения // Наука в центральной России. 2015. № 3 (15). С. 82-87.

42. Корнеев С.В., Пашукевич С.В. Влияние воды на изменение показателей качества моторного масла // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18. № 4 (80). С. 406-415.

## REFERENCES

1. Al S. O. A., Salehi F. M., Farooq U., Morina A., Neville A. Chemical and physical assessment of engine oils degradation and additive depletion by soot. *Tribology International*. 2021. 160: 107054. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107054>

2. Rostek E., Babiak M. The experimental analysis of engine oil degradation utilizing selected thermoanalytical methods. *Transportation Research Procedia*. 40. 2019: 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.014>

3. Heredia-Cancino J. A., Ramezani M., Álvarez-Ramos M. E. Effect of degradation on tribological performance of engine lubricants at elevated temperatures. *Tribology International*. 2018. 124: 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.04.015>

4. Mohanty S., Hazra S., Paul S. Intelligent prediction of engine failure through computational image analysis of wear particle. *Engineering Failure Analysis*. 2020. vol. 116. pp. 104731. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104731>

5. Deulgaonkar V. R., Ingolikar N., Borkar A., Ghute S., Awate N. Failure analysis of diesel engine piston in transport utility vehicles. *Engineering Failure Analysis*. 2021. 120: 105008, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105008>.

6. Notay R. S., Priest M., Fox M. F. The influence of lubricant degradation on measured piston ring film thickness in a fired gasoline reciprocating engine. *Tribology International*. 2019. 129: 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.07.002>

7. Sun Z., Wang Y., Yuan Ch. Influence of oil deposition on the measurement accuracy of a calorimetric

flow sensor. *Measurement*. 2021. 185: 110052. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110052>.

8. Bagi S., Sharma V., Aswath P. B. Role of dispersant on soot-induced wear in Cummins ISB engine test. *Carbon*. 2018. 136: 395-408. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.066>.

9. Raposo H., Farinha J.T, Fonseca I., Galar D..Predicting condition based on oil analysis – A case study. *Tribology International*. 2019. 135: 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.041>.

10. Vaitkunaite G., Espejo C., Wang Ch., Thiébaud B., Charrin C., Neville A., Morina A.. MoS<sub>2</sub> tribofilm distribution from low viscosity lubricants and its effect on friction. *Tribology International*. 2020. 151: 106531. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106531>.

11. Baskov V., Ignatov A., Polotnyanshikov V. Assessing the influence of operating factors on the properties of engine oil and the environmental safety of internal combustion engine. *Transportation Research Procedia*. 2020. 50: 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.005>.

12. Esfe M. H., Esfandeh S., Arani A. A. A. Proposing a modified engine oil to reduce cold engine start damages and increase safety in high temperature operating conditions. *Powder Technology*. 2019. 355: 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.009>.

13. Wang Y., Chen Yu, Liang X., Tan P., Deng S. Impacts of lubricating oil and its formulations on diesel engine particle characteristics. *Combustion and Flame*. 2021. 225: 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.10.047>.

14. Vrcek A., Hultqvist T., Baubet Y., Björling M., Marklund P., Larsson R. Micro-pitting and wear assessment of engine oils operating under boundary lubrication conditions. *Tribology International*. 2019. 129: 338-346. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.032>.

15. Laad M., Jatti V. K. S. Titanium oxide nanoparticles as additives in engine oil, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 2018. 30: 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2016.01.008>.

16. Li D., Kong N., Zhang B., Zhang Bo, Li R., Zhang Q. Comparative study on the effects of oil viscosity on typical coatings for automotive engine components under simulated lubrication conditions. *Diamond and Related Materials*. 2021. 112: 108226. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108226>.

17. Zhang W., Zhang Z., Ma X., Awad O. I., Shuai Y.Li, S, Xu H. Impact of injector tip deposits on gasoline direct injection engine combustion, fuel economy and emissions. *Applied Energy*. 2020. 262 : 114538. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114538>.

18. Tormos B., Pla B., Bastidas S., Ramírez L., Pérez T. Fuel economy optimization from the interaction between engine oil and driving conditions. *Tribology International*. 2019. 138: 263-270. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.05.042>.

19. Slavchov R. I., Salamanca M., Russo D., Salama I., Mosbach S., Clarke S. M., Kraft M., Lapkin A. A., Filip S.V. The role of NO<sub>2</sub> and NO in the mechanism of hydrocarbon degradation leading to carbonaceous deposits in engines. *Fuel*. 2020. 267:117218. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117218>.

20. Burke R.D., Madamedon M., Williams R. Newly identified effects of injector nozzle fouling in diesel engines. *Fuel*. 2020. 278:118336. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118336>.

21. Olabi A.G., Maizak D., Wilberforce T. Review of the regulations and techniques to eliminate toxic emissions from diesel engine cars. *Science of The Total Environment*. 2020. 748: 141249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141249>.

22. Qian Y., Li Z., Yu L., Wang X., Lu X. Review of the state-of-the-art of particulate matter emissions from modern gasoline fueled engines. *Applied Energy*. 2019. 238: 1269-1298. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.179>.

23. Sujesh G., Ramesh S. Modeling and control of diesel engines: A systematic review. *Alexandria Engineering Journal*. 2018. 57: 4033-4048. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.02.011>.

24. Kozina A., Radica G., Nižetić S. Analysis of methods towards reduction of harmful pollutants from diesel engines. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 262: 121105. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121105>.

25. Ferraro G., Fratini E., Rausa R., Baglioni P. Impact of oil aging and composition on the morphology and structure of diesel soot. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018. 512: 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.10.033>.

26. Xu H.T., Luo Z.Q., Wang N., Qu Z.G., Chen J., An L. Experimental study of the selective catalytic reduction after-treatment for the exhaust emission of a diesel engine. *Applied Thermal Engineering*. 2019. 147: 198-204. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.067>.

27. Haas F. M., Won S. H., Dryer F. L., Pera C. Lube oil chemistry influences on autoignition as measured in an ignition quality tester. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2019. 37:4645-4654. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.165>.

28. Kalghatgi G. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? *Applied Energy*. 2018. 225: 965-974. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.076>.

29. Abián M., Martín C., Nogueras P., Sánchez-Valdepeñas J., Rodríguez-Fernández J., Lapuerta M., Alzueta M. U. Interaction of diesel engine soot with NO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> at diesel exhaust conditions. Effect of fuel and engine operation mode. *Fuel*. 2018. 212: 455-461. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.025>.

30. Deulgaonkar V. R., Pawar K., Kudle P., Raverkar A., Raut A. Failure analysis of fuel pumps used for diesel engines in transport utility vehicles. *Engineering Failure Analysis*. 2019. 105: 1262-1272. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.048>.

31. Venkatachalam G., Kumaravel A. Experimental Investigations on the Failure of Diesel Engine Piston. *Materials Today: Proceedings*. 2019. vol. 16. pp. 1196-1203. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.214>.

32. Hu C., You G., Liu J., Du Sh., Zhao X., Wu S. Study on the mechanisms of the lubricating oil antioxidants: Experimental and molecular simulation.



*Journal of Molecular Liquids*. 2021. 324:115099. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115099>.

33. Agocs A., Nagy A. L., Tabakov Z., Perger J., Rohde-Brandenburger J., Schandl M., Besser Ch., Dörr N. Comprehensive assessment of oil degradation patterns in petrol and diesel engines observed in a field test with passenger cars – Conventional oil analysis and fuel dilution. *Tribology International*. 2021. 161:107079. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107079>.

34. Rossegger B., Eder M., Vareka M., Engelmayer M., Wimmer A. A novel method for lubrication oil consumption measurement for wholistic tribological assessments of internal combustion engines. *Tribology International*. 2021. 162: 107141. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107141>.

35. Temizer I., Cihan O. Experimental and numerical evaluation of combustion analysis of a DI diesel engine. *Energy Reports*. 2021. 7: 5549-5561. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.192>.

36. Korneev S.V., Permyakov V.B., Bakulina V.D., Yarmovich Y.V., Pashukevich S.V. Influence of high temperatures on changes in the performance characteristics of motor oils when diluted with fuel. *AIP Conference Proceedings: "Oil and Gas Engineering, OGE 2020"* 2020: 020010. <https://doi.org/10.1063/5.0026994>

37. Ostrikov V.V., Afonichev D.N., Orobinskij V.I., Balabanov V.I. Uдалenie produktov stareniya iz rabotayushhix motorny`x masel bez ix sliva iz karterov dvigatelej mashin [Removal of aging products from working motor oils without draining them from crankcases of machine engines]. *Ximiya i texnologiya topliv i masel*, 2020, 3:18-21.

38. Utaev S.A. Zakonomernosti nakopleniya zagryaznyayushhix primesej motorny`x masel v processe e`kspluatatsii dvigatelej [Patterns of

accumulation of contaminants in engine oils during engine operation]. *Sovremenny`e materialy`, texnika i texnologii*, 2016, 2: 207-214.

39. Zazulya A.N., Belov S.A. Izmenenie svojstv motornogo masla vo vremya e`kspluatatsii v dizel`nom dvigatele [Changes in the properties of engine oil during operation in a diesel engine]. *Sovremenny`e metody` texnicheskoy diagnostiki i nerazrushayushhego kontrolya detalej i uzlov*, 2020, 1: 5-8.

40. Ostrikov V.V., Sazonov S.N., Afonichev D.N., Kozlov V.G. Izmenenie vyazkosti motornogo masla kak pokazatel` texnicheskogo sostoyaniya dvigatelya vnutrennego sgoraniya i svojstv smazochного материала [Changing the viscosity of engine oil as an indicator of the technical condition of the internal combustion engine and the properties of the lubricant]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2019, 3: 54-61.

41. Busin I.V., Ostrikov V.V., Kornev A.Yu. Texnologiya ochistki rabotayushhego motornogo masla ot produktov stareniya [Technology for cleaning running engine oil from aging products]. *Nauka v central`noj Rossii*, 2015, 3: 82-87.

42. Korneev S.V., Pashukevich S.V. Vliyanie vody` na izmenenie pokazatelej kachestva motornogo masla [The influence of water on the change in engine oil quality indicators]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2021, 4: 406-415.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Пашукевич Софья Вячеславовна – аспирант.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sofia V. Pashukevich – Postgraduate student of the Chemistry and Chemical Technology Department.