

В.А. Аметов¹, М.К. Беляев¹, А.В. Зубрицкий¹, А.В. Шальков²

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

²Филиал Кузбасского государственного технического университета
имени Т.Ф. Горбачева в г. Прокопьевске, Прокопьевск, Россия

ПРОБЛЕМЫ АВТОТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ: ХИММОТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Рассмотрены вопросы проведения автотехнической экспертизы с применением одного из важнейших в настоящее время методов – химмотологического подхода. Обычно при расследовании различного рода ДТП, при экспертизе вышедших из строя автотранспортных средств по неизвестной причине не учитывается качество используемых ГСМ и рабочих жидкостей. В данном случае применение химмотологического подхода позволит в полной мере оценить степень виновности того или иного лица, действия которого способствовали возникновению неисправности автотранспортного средства, а также ДТП и других несчастных случаев в условиях автотранспортных предприятий. В статье представлены результаты автотехнических экспертиз по внезапным отказам подшипников коленчатого вала двигателей КТА-19С на примере одного из открытых угольных разрезов (первый случай) и по внезапному отказу двигателя MTU16V.4000 карьерного самосвала БелАЗ-75302, который эксплуатировался в условиях одной из Кузбасских топливных компаний (второй случай). В первом случае первопричиной прогрессирующего интегрального изнашивания подшипников коленчатого вала, характеризующегося скачкообразным ростом содержания в масле элементов – индикаторов износа цветных металлов, послужило интенсивное «срабатывание» нейтрализующей присадки в масле из-за использования дизтоплива с высоким содержанием сернистых соединений. Во втором случае отказ ДВС в виде внезапного заклинивания поршня в гильзе цилиндра А8, последовавшего разрыва юбки поршня по оси поршневого пальца за счет силы растяжения, разбиения шатуном двух гильз цилиндров А8 и В8, блока цилиндров, поддона и других элементов произошел в результате неблагоприятного температурного воздействия ряда факторов на узлы и детали КШМ и цилиндров. На примере проведенных исследований можно сказать, что только комплексное и своевременное проведение автотехнической экспертизы с использованием возможностей химмотологического подхода может способствовать объективности выводов заключений автоэкспертов и принятию всеми заинтересованными сторонами выверенных решений.

Ключевые слова: автотехническая экспертиза, горюче-смазочные материалы, транспортные средства, неисправность, отказ, параметрическая надежность, химмотологический подход, методология исследования, методы анализа нефтепродуктов.

V.A. Ametov¹, M.K. Belyaev¹, A.V. Zubritsky¹, A.V. Shalkov²

¹Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russian Federation

²Prokopievsk Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
Prokopievsk, Russian Federation

PROBLEMS OF AUTOTECHNICAL EXPERTISE: CHEMOTOLOGICAL APPROACH

The article deals with the issues of carrying out an auto-technical expertise using one of the most important methods at the present time, namely the chemotological approach. Usually, when investigating various kinds of accidents, when examining vehicles broken for an unknown reason, the quality of the used fuels and lubricants and working fluids is not considered. In this case, the application of the chemotological approach will make it possible to fully assess the degree of guilt of this or that person, whose actions contributed to the occurrence of a vehicle malfunction, as well as road accidents and other accidents in the conditions of motor transport enterprises. In the article the results of autotechnical expertise on sudden failures of the crankshaft bearings of KTA-19C engines are presented by the example of one of the open coal mines (the first case) and of the sudden failure of the MTU16V.4000 engine of a BelAZ-75302 mining dump truck, which was operated under the conditions of one of the Kuzbass fuel companies (second case). In the first case, the primary reason for the progressive integral wear of the crankshaft bearings, characterized by an abrupt increase in the content of wear indicator elements of non-ferrous metals in the oil, was the intensive "operation" of the neutralizing additive in the oil due to the use of diesel fuel with a high content of sulfur compounds. In the second case, the failure of the internal combustion engine in the form of a

sudden jamming of the piston in the cylinder liner A8, followed by the rupture of the piston skirt along the axis of the piston pin due to the tensile force, breaking by the connecting rod of two cylinder liners A8 and B8, the cylinder block, the pallet and other elements, occurred as a result of an unfavorable temperature impact of a number of factors on the units and parts of the crank mechanism and cylinders. Based on the example of the studies carried out, it can be said that only a comprehensive and timely conduct of an auto-technical expertise using the capabilities of the chemotological approach can contribute to the objectivity of the conclusions of auto experts and the adoption of verified decisions by all the interested parties.

Keywords: auto-technical expertise, fuels and lubricants, vehicles, malfunction, failure, parametric reliability, chemotological approach, research methodology, methods of petroleum products analysis.

Известно [1], что автотехническая экспертиза (АТЭ) является важнейшим инструментом исследования дорожно-транспортных происшествий (ДТП), а также элементом товароведческой экспертизы различных транспортных средств (ТС), способом изучения причин нарушения их качества и параметрической надежности [2], т.е. выхода параметров технического состояния систем, узлов и агрегатов наземных транспортных средств (НТС) за пределы требований нормативной документации. Заключение экспертов, составленные по результатам таких исследований, являются основным источником доказательств в досудебном и судебном делопроизводстве, а выводы и рекомендации АТЭ оказывают, как правило, решающее влияние на принятие решений в отношении заинтересованных сторон.

Эксперты в области судебной автотранспортной экспертизы (САТЭ) зачастую сталкиваются с тем обстоятельством, что в работе судов при постановке вопросов к эксперту возникают разногласия сторон, связанные с выявлением причинно-следственных связей и выбором факторов, влияющих на возникновение неисправностей и отказов, информативности материалов, предоставленных на экспертизу, что зачастую вызывает несогласие той или иной стороны, затрудняет и затягивает принятие решений как в досудебном, так и судебном порядке [3].

Одной из причин разногласий, на наш взгляд, служит недостаточная осведомленность автоэкспертов возможностями и достижениями в области теории и практики химмотологии – науки о рациональном и эффективном использовании ГСМ и рабочих жидкостей (РЖ), что не позволяет им учесть ряд важных факторов, способных влиять на надежность ТС, и проводить комплексное научно-техническое исследование с учетом качества используемых в ТС горючесмазочных материалов и их влияния на возникновение неисправности и отказа. Этим обстоятельством объясняется то, что многие заключения экспертов вызывают у участников арбитражного спора затруднения в формулировке и решении вопросов, выносимых на экспертизу. С методологической точки зрения затруднения возникают уже в связи с неточной постановкой цели, определением предмета и объекта исследования, использованием информативных методов исследования (испытания) и средств измерения (СИ) для получения доказательной базы, обеспечивающей полноту и всесторонность исследования механизма ДТП, возникновения параметрического отказа ТС, установления их причинно-следственной связи.

Дополнительные возможности в решении вопросов, поставленных перед экспертами, дает применение химмотологического подхода, который должен применяться в случаях, когда при назначении АТЭ потребитель (покупатель) продукции (ГСМ и РЖ) или получатель сервисной услуги, связанной с обслуживанием ТС, «грешит» на качество ГСМ и РЖ, включая их исходные качественные характеристики или проявляемые ими в процессе применения эксплуатационные свойства, оказывающие влияние на техническое состояние систем, узлов и агрегатов в период, предшествующий наступлению неисправности или отказа. К примеру, зачастую при возникновении неисправностей, предшествующих отказам, владельцы ТС не могут инструментальными методами диагностики установить причину возникновения неисправности узлов и агрегатов. В этом случае следует обязательно воспользоваться возможностями безразборного контроля работоспособности узлов и агрегатов и самих ГСМ и РЖ, которые дает предлагаемый химмотологический подход. В случае перехода возникшей неисправности в параметрический отказ [4] дальнейшая эксплуатация НТС может привести к невозможной утрате доказательств, что также происходит в случае снятия узла или агрегата с НТС без вызова эксперта и направления их в ремонт.

На результатах и сроках экспертного исследования отрицательно сказывается несвоевременное назначение АТЭ. На практике специалисты и профессиональные эксперты-техники либо лишены возможности оперативного проведения экспертных действий, либо сами без должного понимания относятся к сбору образцов, в частности, эксплуатационных материалов (моторного топлива, смазочных материалов, топливных, масляных, воздушных фильтров и т.д.). При их отсутствии они вынуждены принимать возможную причину гипотетически и часто, к сожалению, в угоду непосредственному заказчику экспертизы [5].

Традиционно, когда речь идет о судебной АТЭ НТС, находящихся на гарантии, эксперты решают следующие задачи:

- ♦ определение наличия заводских дефектов в изготовлении автомобиля и общая оценка качества изготовления;
- ♦ определение причин поломки отдельных деталей, узлов и целых агрегатов, с оценкой качества выполняемого накануне технического обслуживания или ремонта;
- ♦ определение влияния условий эксплуатации НТС по дорожно-транспортным, погодноклиматическим условиям, режимам движения и нагружения техники.

Из анализа материалов и заключений специалистов в области автотехнических и товароведческих экспертиз, рассматриваемых в районных судах Томской и Кемеровской областей в отношении причин внезапных отказов двигателей внутреннего сгорания (ДВС), установлено, что при их проведении достаточно редко исследуется влияние качества используемых ГСМ и РЖ. В отдельных случаях соответствие ГСМ и РЖ нормативным требованиям принимается по сопроводительной документации (сертификаты соответствия, паспорта качества, декларации или протоколы лабораторных испытаний). В абсолютном большинстве случаев эксперты априори считают, что если заправка ГСМ выполнена в организации, имеющей разрешительные документы (лицензия или сертификат на оказание услуг), то проверка исходного качества ГСМ и тем более анализ и испытание работавших образцов не требуется [6]. В отдельных случаях приводятся ссылки на сертификаты соответствия или протоколы испытаний, но уже с просроченными сроками действия НД.

Таким образом, при выполнении АТЭ весьма ограниченно используются реальные возможности обнаружения причин отказов, связанные с химмотологическими аспектами оценки технического состояния узлов, агрегатов и самих топливно-смазочных материалов [7–9]. Это обстоятельство, а также необходимость повышения уровня защиты прав потребителей в лице физических и юридических лиц в досудебных разбирательствах и тем более в судебном делопроизводстве обуславливают потребность в проведении химмотологических исследований (ХМИ) на высоком компетентном уровне и должно, на наш взгляд, предусматривать участие аккредитованных и/или аттестованных лабораторий (центров), занимающихся анализом и испытанием нефтепродуктов и продуктов органического синтеза [10].

Испытательным центром горюче-смазочных материалов и автотранспортных средств (ИЦ ГСМ и АТС) при ТГАСУ за последние 10–15 лет по заявкам крупных транспортных предприятий, в том числе горнодобывающей промышленности, проведен ряд автотехнических экспертиз, связанных с отказами ДВС карьерных самосвалов БелАЗ, в том числе с отечественными дизелями производства ЯМЗ и КамАЗ и дизелями импортных производителей, в частности фирм Cummins и MTU Friedrichshafen GmbH. Анализ этих материалов показывает, что механизм возникновения в период гарантий аварийных отказов носит, как правило, сложный причинно-следственный характер, а причинами отказов крайне дорогостоящего оборудования выступает одновременно сразу несколько факторов, в том числе качество моторных топлив и масел.

Рассмотрим примеры проведенных АТЭ, использующих химмотологический подход, где объект исследования нами рассматривался как трибо-химмотологическая модель (ТХМ), а в качестве факторов, способных повлиять на отказ – особенности конструкции ТС, условия его эксплуатации, технология ТО и ремонта, качественные характеристики моторного топлива, свежего и работавшего масла, охлаждающей жидкости (ОЖ).

Пример 1

Исходные данные. На автобазе из 35 единиц карьерных самосвалов БелАЗ-7555Д, эксплуатирующихся в условиях открыто-угольного разреза, за короткий период (два-три месяца) резко вырос поток отказов подшипников коленчатого вала (ПКВ) двигателей КТА-19С Cummins, составивший более одного отказа на каждые 1000 мото-часов (м-ч) наработки двигателя, или 1/10000 км пробега.

Исследование. Лабораторный анализ проб дизельного топлива (ДТ), свежего и работавшего масла из картеров двигателей КТА-19С Cummins 15 самосвалов, работавших в идентичных условиях, показал, что внезапные отказы обусловлены падением давления масла и возникающими при этом стуками в кривошипно-шатунном механизме (КШМ), чему, как правило, предшествует снижение вязкостно-температурных свойств масла в результате неполного сгорания используемого дизельного топлива [15]. Снижение параметров текучести (вязкости) масла при рабочей температуре вызвало скачкообразный рост содержания в циркулирующем масле элементов – индикаторов износа ПКВ (меди и свинца), превысившего допустимые пределы в несколько раз, о чем свидетельствовал эмиссионный спектральный анализ проб масла, отобранных накануне и сразу после возникновения нарушений. Выполненный экспертами внешний осмотр подшипников обнаружил наличие значительных очагов коррозии, замятий и вымываний элементов бронзовой заливки (свинца, олова и меди) на рабочих поверхностях ПКВ вплоть до полного разрушения их антифрикционного слоя (рис. 1).



Рис. 1. Наличие очагов коррозии, замятий и вымываний элементов бронзовой заливки (свинца, олова и меди) на рабочих поверхностях ПКВ

Интенсификация такого вида коррозионно-механического износа подшипников, залитых бронзой, сопровождается интенсивным «старением» моторного масла, обусловленным потерей им нейтрализующих (щелочных) свойств. Так, при нормативном сроке службы масла, равном 250 м-ч, щелочное число работавшего масла 10 двигателей достигает предельного (браковочного) значения (50 % запас щелочности) уже при наработке 100 м-часов, т.е. не достигая половины регламентной наработки.

Логический анализ причин резкого ухудшения нейтрализующих свойств моторного масла показал, что оно связано с резким снижением показателя нейтрализующих свойств масла – общего щелочного числа (ЩЧ), значение которого к середине регламентированного срока службы не превышало 0,5 мг КОН/г при значении исходного ЩЧ более 10 мг КОН/г. Поэтому версия о низком исходном качестве используемого масла была исключена после фактического анализа пробы свежего масла марки Petro Canada Premium SAE 15w-40, API CH-4, выполненного стандартным методом потенциометрического титрования (ГОСТ 11362). Стало очевидным, что причиной резкого снижения запаса нейтрализующей присадки может служить образование в картере двигателя значительной массы агрессивных (кислых) продуктов, в частности, имеющихся в составе картерных газов, прорывающихся в картер и содержащих продукты сгорания моторного топлива.

Анализ качества партии моторного дизельного топлива, поставляемого на данный участок угольного разреза (самосвалы владельца ТС в период массовых отказов двигателей работали в отрыве от своей основной производственной базы), позволил установить существенное отклонение качественных характеристик используемого дизельного топлива от требований безопасности, регламентируемых положениями Технического регламента Таможенного Союза (ТР ТС 13/2011) [12].

Согласно анализу контрольной пробы, отобранной согласно Инструкции Минэнерго [13], было установлено несоответствие дизтоплива, поставляемого сторонней организацией на исследуемый разрез по массовому содержанию серы, значение которой более чем в 10 раз превышало ее допустимое содержание в стандартном зимнем дизтопливе 3-0,05-40 по ГОСТ 305–2002. На основании полученного анализа была выдвинуто предположение о влиянии массовой доли серы в топливе на интенсификацию коррозионно-механического износа и преждевременный выход из строя ПКВ дизелей.

Подтверждением влияния сверхдопустимой массовой доли серы в дизтопливе на ухудшение нейтрализующих свойств работавшего масла послужил контроль за исходными свойствами и приобретенными состояниями масла, выполненный в ходе спланированного эксперимента, организованного экспертами в условиях реальной эксплуатации самосвалов БелАЗ-7555 методом отбора (через каждые 40–50 м-ч) и физико-химического, в том числе эмиссионного спектрального, анализа проб масла Petro Canada со всех двигателей в течение нормируемого срока использования (250 м-ч). Наиболее значимые результаты изменения параметров работавшего масла, полученные на двух характерных участках эксплуатации карьерных самосвалов, при использовании на группе машин, работающей на малосернистом топливе (с массовой доли серы <500 мг/кг), и группе, работающей на высокосернистом топливе (серы ≥5000 мг/кг), представлены на рис. 2.

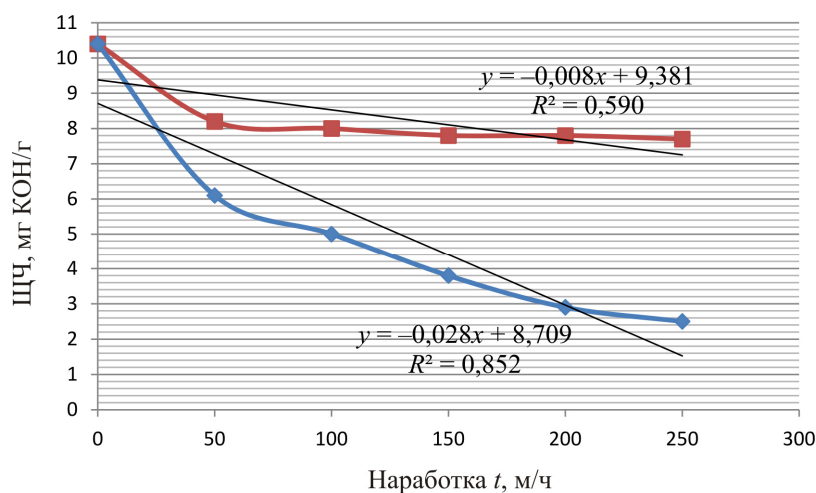


Рис. 2. Характер изменения ЩЧ масла при содержании серы в дизтопливе:
1 – менее 500 мг/кг (красная линия); 2 – более 500 мг/кг (синяя линия)

Из рис. 2 видно, что в случае использования высокосернистого топлива ($S \geq 500$ мг/кг) наблюдается резкое снижение уровня ЩЧ работавшего масла, достигающего браковочного предела (менее 50 % от $ЩЧ_{исх}$) уже к 100 м-ч работы двигателя. Дальнейшая работа двигателя производилась при недостатке нейтрализующей присадки в масле. Этим объясняется тот факт, что согласно рис. 3, 4 после наработки 100 м-ч наблюдается резкий скачок содержания Си и Рb, являющихся химическими элементами – индикаторами коррозионного износа в масле [14].

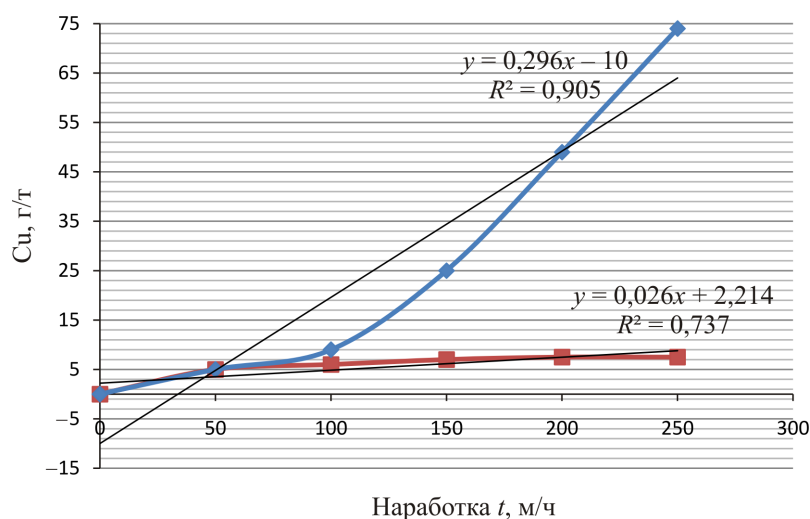


Рис. 3. Концентрация Cu в моторном масле при содержании серы в дизтопливе: 1 – менее 500 мг/кг; 2 – более 500 мг/кг

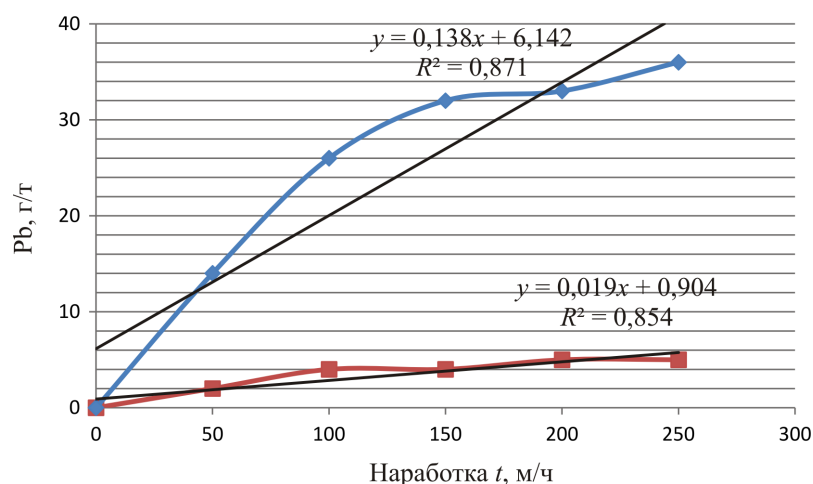
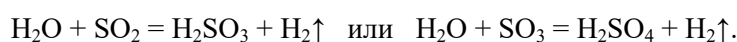


Рис. 4. Изменение концентрации Pb в моторном масле при содержании серы в дизтопливе: 1 – менее 500 мг/кг; 2 – более 500 мг/кг

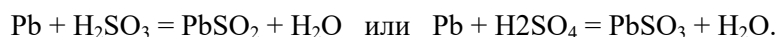
Отсутствие достаточного запаса нейтрализующей составляющей присадки в масле в последующий период приводит к скачкообразному росту содержания сначала свинца, а затем и меди в пробе масла. В начальный период (при наработке до 100 м-ч) поступление в масло Cu и Pb незначительно, что свидетельствует о работоспособности масла. В этот период происходит характерное «срабатывание» щелочной присадки моторного масла за счет ее реакции с серным (SO_2) и сернистым ангидридом (SO_3), образующимися в картере двигателя в результате сгорания сернистого топлива, и частичного растворения последних в масле. Реакции протекают по схемам:



В последующий период в условиях недостаточности запаса щелочи наблюдается образование и накопление в масле кислых сернистых и серных соединений:



Известно, что кислые продукты, образующиеся в масле, агрессивно воздействуют на металлы, в первую очередь на цветные металлы бронзовых сплавов, вызывая их окисление и последующее вымывание [8]:



Заключение. Учитывая состав конструкционного материала, из которого изготовлена рабочая несущая поверхность вкладыша, выполняющего функцию подшипника качения, очевидно, что он подвергался сложному виду коррозионно-механического изнашивания. Поэтому первопричиной прогрессирующего интегрального изнашивания вкладышей коленчатого вала, характеризующегося скачкообразным ростом содержания в масле элементов – индикаторов износа цветных металлов, послужило интенсивное «срабатывание» нейтрализующей присадки в масле из-за использования дизтоплива с высоким содержанием сернистых соединений. Следует отметить, что выполнение практических рекомендаций, разработанных на основе настоящей АТЭ, и переход работы дизелей в дальнейшем на стандартное ДТ с нормируемым содержанием серы привели к нормализации процесса «старения» моторного масла, снижению интегрального износа подшипников и профилактике внезапных отказов в период дальнейшей эксплуатации самосвалов.

Пример 2

Исходные данные. В одной (Кузбасской) топливной компании произошел внезапный отказ двигателя, который привел к аварийному разрушению цилиндропоршневой группы и блока цилиндров ДВС карьерного автосамосвала БелАЗ-75302. Со слов водителя, внезапный отказ двигателя MTU16V.4000, проявившийся в виде сильных стуков со стороны двигателя, произошел при движении самосвала, груженного породой, в сторону отвала. Этому событию предшествовало проведение работ по ТО-2. Отказ произошел примерно через один час после окончания работ по ТО-2, пуска двигателя, во время движения самосвала, груженного вскрышной породой, к отвалу. В акте выполненных работ по рассмотрению отказа ДВС 16V4000, составленном специально созданной комиссией с участием заинтересованных сторон, имелся вывод о том, что причиной аварийного выхода из строя двигателя 16V4000C11 послужило «попадание механических частиц в масляный канал при замене масляных фильтров, что провернуло коренной вкладыш по 9-й коренной шейке коленчатого вала, перекрыло масляный канал, подающий масло, что вызвало масляное голодание и дальнейшее разрушение цилиндропоршневой группы и блока цилиндров ДВС». Здесь же отмечено, что «основным фактором, повлиявшим на отказ двигателя, является низкое качество оказания сервисных услуг по замене масла и фильтров». С этим выводом выразили несогласие представители данной сервисной организации, что нашло отражение в составленном ими «особом мнении». В этом особом мнении представителей обслуживающей организации сообщается, что «масляный канал подачи масла на 9-ю коренную шейку чист и наличия примесей в анализе масла нет». А если загрязнений в масле нет, то загрязнения не могли стать причиной «проворота» вкладышей 9-й опорной шейки и последовавшего за этим выходом двигателя из строя.

Исследование. По результатам испытаний проб работающего масла, выполненных в аттестованной химической лаборатории, отклонений показателей качества проб моторного масла, отобранных через масломерный щуп двигателя самосвала БелАЗ-75302, по качественным характеристикам (щелочному числу, температуре вспышки в открытом тигле, кинематической вязкости, наличию воды и содержанию активных элементов присадки – кальция, цинк и фосфор) от нормативных браковочных значений показателей не выявлено. Результаты спектрального анализа этих проб свидетельствуют, что в предшествующий отказу период и накануне проведения работ по ТО-2 значимого содержания продуктов износа в пробах масла двигателя обнаружено не было.

Специалистами ИЦ ГСМ и АТС ТГАСУ было установлено, что при составлении акта не были подвергнуты анализу другие потенциальные причины внезапного отказа двигателя,

связанные, в частности, с нарушением функционирования его узлов и систем. Так, совершенно отсутствовал анализ условий производства и технологического оборудования для выполнения работ по ТО и соблюдения при этом требований технических регламентов в полном объеме.

В прилагаемом досудебном экспертном заключении специалиста НАМИ, привлеченного сервисной организацией (дилером фирмы Cummins), проводившего экспертизу заочно, без выезда к месту нахождения объекта экспертизы, сделан вывод, что «причиной повреждения двигателя 16V4000C11, состоящего в повреждении двух головок 8-го и 9-го цилиндра и дальнейшего катастрофического выхода ДВС из строя, явился гидроудар в одной из его камер сгорания. Причем «гидроудар произошел в результате попадания охлаждающей жидкости в цилиндр А8 и неисправной топливной форсунки, из-за чего охлаждающая жидкость накопилась в камере сгорания». Этот вывод не был подтвержден результатами комплексного исследования, связанного, в частности, с изучением герметичности головки блока, т.е. источника поступления ОЖ в ДВС. Поэтому согласиться с этим выводом без проведения всестороннего исследования с использованием специального оборудования и средств измерения (например, стенда проверки головки блока на герметичность) невозможно.

Проведенное экспертами органолептическое исследование поврежденных шеек коленчатого вала, шатунных и коренных вкладышей, шатунов, поршней, поршневого пальца, гильз цилиндров, головок блока, клапанов, маслоприемника, масляной форсунки охлаждения поршня и др. указало на то, что внезапный отказ двигателя произошел из-за разрыва поршня А8 в результате действия значительных динамических сил в кривошипно-шатунном механизме и ЦПГ.

Анализ действия динамических сил в КШМ и ЦПГ позволил выдвинуть гипотезу о том, что разрыв поршня прошел по его нижней части (юбке) в наклонной плоскости, проходящей через одну из бобышек. Отказ двигателя произошел вследствие нарушения теплового баланса, вызванного: нарушением охлаждения поршня А8; дополнительным подводом тепла от повышенного трения с сопряжением поршень – гильза цилиндра А8; образованием на боковой наружной поверхности гильзы высокотемпературного отложения в виде накипи белого цвета.

Анализ исходных материалов и источников, представленных заказчиком по экспертизе, и проведенное собственное исследование позволяют утверждать, что механизм разрыва поршня происходил в результате неблагоприятного стечения обстоятельств и одновременного действия сразу нескольких факторов. Он, на наш взгляд, определялся значительными динамическими силами, действующими в ЦПГ 8-го цилиндра ДВС, и протекал в следующей последовательности (рис. 5, 6).

После проведения работ по ТО-2 двигателя самосвала БелАЗ-75302, выполненных с нарушениями, т.е. без установки фильтра очистки ОЖ и специальной закладной манжеты в ЦМО, произошел слив (возврат) части отложений, накопленных и удерживаемых вращающимся фильтром ЦМО, в масляную систему. С учетом конструктивных особенностей в расположении элементов масляной системы, эти отложения после пуска двигателя попали в канал 9-й опорной шейки и прилегающий к нему масляный канал в блоке, питающий форсунку охлаждения поршня (поз. А8).

Невозможность подачи масла форсункой 4 из-за отложений привела к нарушению теплового баланса распределения тепловой энергии горения топлива (Q_t), связанному с недостаточным охлаждением моторным маслом поршня (Q_n), что, естественно, способствовало повышению его температуры. На фоне общей тепловой напряженности произошло объемное расширение материала юбки поршня, выполненной из алюминиевого сплава. Это, в свою очередь, привело к заполнению зазора поршня с гильзой цилиндра и их непосредственному контакту при возвратно-поступающем движении, повышающим за счет все более возрастающих сил трения ($Q_{тр}$) и без того высокую (фактическую) температуру деталей ЦПГ.

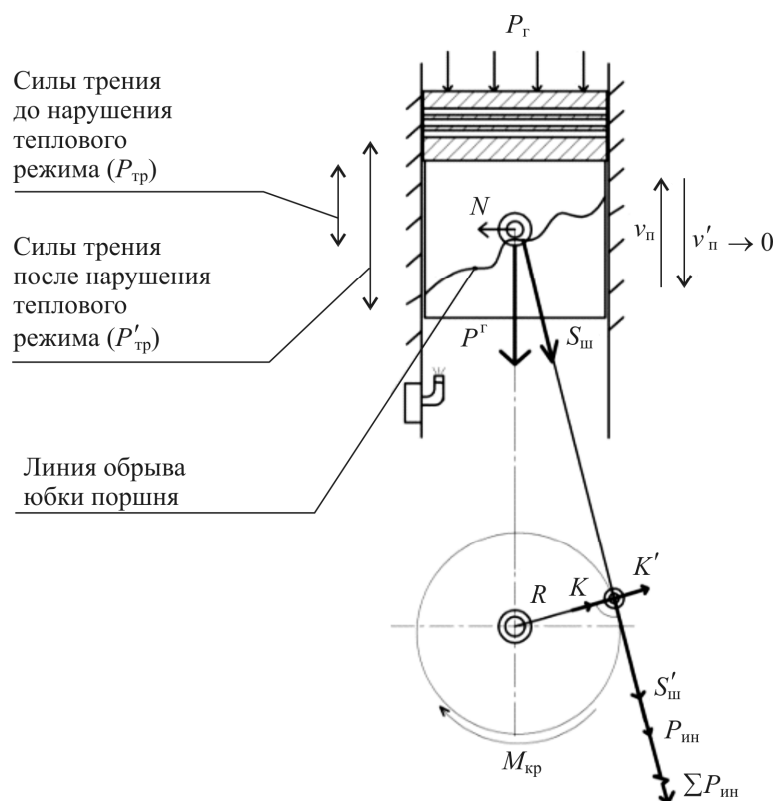


Рис. 5. Динамические силы, действующие в ЦПГ 8-го цилиндра ДВС

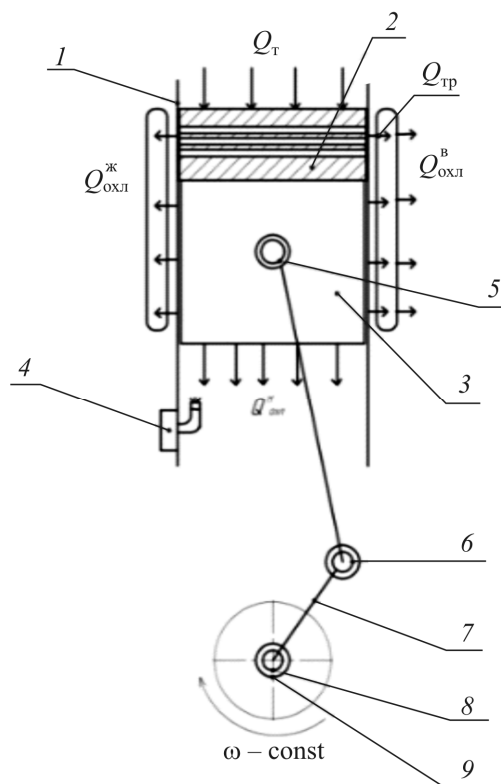


Рис. 6. Схема теплового баланса в ЦПГ двигателя:

- 1 – гильза цилиндра; 2 – транк; 3 – юбка поршня; 4 – форсунка охлаждения поршня;
5 – поршневой палец; 6 – шатунный подшипник; 7 – кривошип; 8 – коренной подшипник;
9 – коленчатый вал

В результате сильного разогрева началось схватывание между поршнем и гильзой I и II рода, повышающее динамические силы, действующие в ЦПГ. В частности, это привело к резкому увеличению сил и износу шатунных (поз. А8, В8) и коренных вкладышей, примыкающих к цилиндру А8. Отсюда объяснимый рост концентрации в масле элементов – индикаторов износа (железа, хрома, меди, свинца, алюминия и др.) материалов, из которых изготовлены детали ЦПГ. На рис. 6 представлена схема нарушения теплового баланса в ЦПГ двигателя. Фактором, предваряющим внезапный отказ, послужила работа двигателя с локальным перегревом деталей цилиндра А8 (по данным DDEC, в течение 18 с), приведшая к сильному локальному разогреву стенок цилиндра и поршня.

Результатом перегрева охлаждающей жидкости на стенках цилиндра послужило выпадение осадка белого цвета, представляющего собой солевые отложения присадки, выполняющего функцию своеобразного «изоляционного материала». Перегрев поршня привел к разогреву его конструкции, что выразилось прихватками и тепловыми разрушениями юбки в районе перемычек и канавок поршневых колец. Ухудшение условий граничного трения между поршнем с кольцами и втулкой цилиндра (согласно данным системы контроля DDEC) привело к дальнейшему повышению температуры деталей ЦПГ. Усиление динамических сил в КШМ цилиндрах А8 и В8 привело к нарушению условий гидродинамической смазки на 8-й шатунной шейке, задиру ее поверхности и сопряженных вкладышей. Нарушение условий смазки привело к дополнительному росту тепловой напряженности и росту сил трения в трибосопряжениях. В итоге произошло заклинивание поршня и его остановка ($V_{\Pi} = 0$) в направляющей цилиндра, что вызвало резкий рост суммарных сил инерции, действующих вдоль оси шатуна ($\Sigma P_{ин}$). Максимального значения эти силы, повышающие силу ($S_{ш}$), достигают при перпендикулярном расположении оси шатуна и кривошипа. При достижении этого критического значения, превышающего прочностные характеристики материала, произошел обрыв поршня А8 по линии разрыва, практически перпендикулярной оси шатуна и проходящей через плоскость бобышек поршневого пальца.

Выводы и рекомендации

Анализ исходных материалов и документов, представленных заказчиком на экспертизу, а также полученные в ходе настоящего исследования результаты позволили сделать выводы о причинах и механизме возникновения внезапного отказа двигателя MTU 16V4000 самосвала БелАЗ-75302. Отказ ДВС в виде внезапного заклинивания поршня в гильзе цилиндра А8, последовавшего разрыва юбки поршня по оси поршневого пальца за счет силы растяжения, действующей со стороны кривошипа, разбиения шатуном двух гильз цилиндров А8 и В8, блока цилиндров, поддона и других элементов произошел в результате неблагоприятного температурного воздействия ряда факторов на узлы и детали КШМ и цилиндров (поз. А8 и В8). Сочетание ряда одновременно действующих факторов, в том числе: потеря работоспособности форсунки охлаждения поршня в цилиндре А8 из-за забивки ее отверстия твердыми механическими продуктами, нарушение фаз газораспределения ГРМ из-за предельного износа толкателей в совокупности – обусловило резкое повышение трения и рост температуры в сопряжениях ЦПГ, что, в свою очередь, привело к объемному расширению поршня и сначала к «закусыванию», а затем к заклиниванию его в цилиндре А8. Под действием мощного крутящего момента на коленчатом валу, обеспечиваемого работой всех остальных цилиндров, произошло разрушение сборной конструкции поршня по юбке, выполненной из алюминиевого сплава, в результате чего «шатун показал братскую руку», вызвав катастрофические разрушения блока цилиндров, масляного поддона, двух поршней, шатунов и ряда других сопряженных узлов и деталей. Материальный ущерб, связанный только со стоимостью отказавших деталей, двигателя согласно дефектной ведомости составил более 10,5 млн руб.

Авторами предлагается методика комплексного исследования факторов (конструкторских, технологических, эксплуатационных), влияющих на процессы, происходящие в трибосме-

ханической системе (ТМС) «агрегат – топливо – масло – эксплуатация». Такими процессами, как ранее было установлено, традиционно выступают износ трущихся сопряжений, коррозия металлических поверхностей, образование отложений в масляной системе, а также процессы изменения качественных характеристик моторного топлива, смазочного масла: вязкостно-температурных, нейтрализующих, моющих, диспергирующих и др. Предлагаемая методика основана на проведении ряда теоретических и экспериментальных исследований, устанавливающих закономерности и причинно-следственные связи в ТМС, приводящие к отказам, и значения качественных характеристик ГСМ и РЖ. Качество последних оценивается достижением ими предельно допустимых браковочных значений показателей, при которых с вероятностью, достигающей 95 %, возникают параметрические отказы (нарушение работоспособности ТМС), выходящие за пределы, установленные НД. Выявление этих закономерностей и пределов должно основываться на логическом анализе и математической обработке данных, полученных в результате изучения комплекса физико-химических показателей работоспособности объекта контроля как ТМС с использованием информационных технологий [15].

Комплексное и своевременное проведение АТЭ, с использованием возможностей химмотологических исследований ГСМ и РЖ и современных информационных технологий с целью оперативной диагностики технического состояния узлов и агрегатов, может способствовать объективности выводов заключений автоэкспертов и принятию всеми заинтересованными сторонами выверенных решений, в том числе при выполнении досудебных и судебных экспертиз.

Список литературы

1. Методические рекомендации по проведению судебных автотехнических экспертиз и исследований колесных транспортных средств в целях определения размера ущерба, стоимости восстановительного ремонта и оценки / Е.Л. Махнин, И.Н. Новоселецкий, С.В. Федотов [и др.]. – М.: ФБУ РФЦСЭ при Минюсте РФ, 2018. – 326 с.
2. Методические рекомендации по назначению автотехнической экспертизы при расследовании дорожно-транспортных происшествий. – М.: Человек и закон, 2010.
3. Аметов В.А., Зубрицкий А.В., Фоминых М.А. Исследование причин отказов двигателя MTU 16V 4000 автосамосвалов БелАЗ-75302 ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» // Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., 2012. – Новокузнецк: Филиал КузГТУ. – С. 54–57.
4. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
5. Shal'kov A.V., Mamaeva M.S. Estimation of energy efficiency of means of transport according to the results of technical diagnostics // The Second International Innovative Mining Symposium (Devoted to Russian Federation Year of Environment). – 2017. – Vol. 21. DOI: org/10.1051/e3sconf/20172103013.
6. Fadeev Iu. A., Shal'kov A.V. The metrological assurance of quality petroleum products. Methods for determining octane and sulfur numbers in the petroleum products // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 115. DOI: org/10.1088/1755-1315/115/1/012040
7. Заречнева Н.А., Зубрицкий А.В., Аметов В.А. Оценка влияния некондиционного топлива на работоспособность двигателей КТА-19С карьерных самосвалов БелАЗ // Материалы науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов ТГАСУ. – Пермь, 2016. – С. 135–141.
8. Заключение специалистов о причине выхода из строя двигателей карьерных самосвалов ОАО КТК «Разрез Виноградовский»: отчет НИР / Томск. гос. арх.-строит. ун-т. – Томск, 2011. – 22 с.
9. Аметов В.А., Зубрицкий А.В. Исследования причин отказов двигателей «Камминз» большегрузных автосамосвалов на основе комплексной диагностики системы «ДВС-масло» // Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса: материалы I Междунар. конф. – Новокузнецк: Филиал КузГТУ, 2011. – С. 49–52.

10. Предпосылки применения химмотологического подхода при проведении автотехнической экспертизы ДВС транспортных средств / В.А. Аметов, А.В. Зубрицкий, Г.В. Маслюков [и др.] // Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Новокузнецк: филиал КузГТУ, 2013. – С. 406–410.
11. Simulation and field measurements of reliability parameters of dump truck hydraulic system / Khoreshok A.A., Kuznetsov A.V., Shal'kov A.V. // The Third International Innovative Mining Symposium. – 2018. – Vol. 41. DOI: [org/10.1051/e3sconf/20184103004](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184103004).
12. О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту: Технический регламент Таможенного Союза ТР ТС 13/2011.
13. Инструкция по контролю и обеспечению сохранения качества нефтепродуктов в организациях нефтепродуктообеспечения: утв. Приказом Минэнерго РФ от 19 июня 2003 г. № 231.
14. Соколов А.И. Изменение качества масла и долговечность автомобильных двигателей. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1976. – 127 с.
15. Разработка системы контроля технического состояния ДВС экскаваторно-автомобильного комплекса с использованием онлайн-технологий / В.А. Аметов, А.В. Шальков, А.В. Кузнецов, А.Г. Старченко, И.А. Мягих // Материалы научно-практической конференции студентов и молодых ученых КузГТУ. – Кемерово: НИУ КузГТУ, 2020. – С. 123–126.

References

1. Makhnin E.L., Novoseletskii I.N. Fedotov S.V. et al. Metodicheskie rekomendatsii po provedeniiu sudebnykh avtotekhnicheskikh ekspertiz i issledovaniu kolesnykh transportnykh sredstv v tseliakh opredeleniia razmera ushcherba, stoimosti vosstanovitel'nogo remonta i otsenki [Methodical recommendations for conducting forensic auto-technical examinations and research of wheeled vehicles in order to determine the amount of damage, the cost of refurbishment and assessment] Moscow, Federal'noe biudzhethoe uchrezhdenie Rossiiskii federal'nyi tsentr sudebnoi ekspertizy pri Ministerstve iustitsii Rossiiskoi Federatsii, 2018, 326 p.
2. Metodicheskie rekomendatsii po naznacheniiu avtotekhnicheskoi ekspertizy pri rassledovanii dorozhno-transportnykh proisshествii [Methodical recommendations for the appointment of an auto-technical examination in the investigation of road accidents] Ed. N.M. Kristi. Moscow, Chelovek i zakon, 2010.
3. Ametov V.A., Zubritskii A.V., Fominykh M.A. Issledovanie prichin otkazov dvigatelya MTU 16V 4000 avtosamosvalov BelAZ-75302 Otkrytogo aktsionernogo obshchestva Ugol'naia kompaniia Kuzbassrazrezugol' [Investigation of the causes of failures of the MTU 16V 4000 dump trucks BelAZ-75302 of the Open Joint Stock Company "Coal Company "Kuzbassrazrezugol'"] *Perspektivy razvitiia i bezopasnost' avtotransportnogo kompleksa, Materialy vtoroi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, Novokuznetsk, Filial KuzGTU, 2012, pp. 54-57.
4. Pronikov A.S. Parametricheskai nadezhnost' mashin [Parametric machine reliability]. Moscow, Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Bauman, 2002, 560 p.
5. Shal'kov A.V., Mamaeva M.S. Estimation of energy efficiency of means of transport according to the results of technical diagnostics. *The Second International Innovative Mining Symposium (Devoted to Russian Federation Year of Environment)*, 2017, vol. 21. DOI: [org/10.1051/e3sconf/20172103013](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172103013)
6. Fadeev Iu. A., Shal'kov A.V. The metrological assurance of quality petroleum products. Methods for determining octane and sulfur numbers in the petroleum products. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 115. DOI: [org/10.1088/1755-1315/115/1/012040](https://doi.org/10.1088/1755-1315/115/1/012040).
7. Zarechneva N.A., Zubritskii A.V., Ametov V.A. Otsenka vliianiia nekonditsionnogo topliva na rabotosposobnost' dvigatelei KTA-19C kar'ernykh samosvalov BelAZ [Assessment of the influence of substandard fuel on the performance of KTA-19C engines of BelAZ mining dump trucks] *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh i studentov Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2016, pp. 135-141.
8. Ametov V.A. Zakliuchenie spetsialistov o prichine vykhoda iz stroia dvigatelei kar'ernykh samosvalov Otkrytogo aktsionernogo obshchestva Kuzbasskoi toplivnoi kompanii Razrez Vinogradovskii [Conclusion of experts on the reason for the failure of the engines of mining dump trucks of the Open Joint-Stock Company of the Kuzbass Fuel Company "Open pit mine Vinogradovsky"] *Otchet po nauchno-issledovatel'skoi rabote*, Tomskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nii universitet, 2011, 22 p.
9. Ametov V.A., Zubritskii A.V. Issledovaniia prichin otkazov dvigatelei Cummins bol'shegruznykh avtosamosvalov na osnove kompleksnoi diagnostiki sistemy Dvigatel' vnutrennego sgoraniia-maslo [Research into the causes of failure of Cummins engines of heavy-duty dump trucks based on comprehensive diagnostics of the Internal combustion engine-oil system] *Perspektivy razvitiia i bezopasnost' avtotransportnogo kompleksa, Materialy pervoi Mezhdunarodnoi konferentsii*, Novokuznetsk, Filial KuzGTU, 2011, pp. 49-52.

10. Ametov V.A., Zubritskii A.V., Masliukov G.V. et al. Predposylki primeneniia khimnotologicheskogo podkhoda pri provedenii avtotekhnicheskoi ekspertizy dvigatelei vnutrennego sgoraniia transportnykh sredstv [Prerequisites for the application of the chemotological approach when carrying out an autotechnical examination of internal combustion engines of vehicles] *Perspektivy razvitiia i bezopasnost' avtotransportnogo kompleksa, Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, Novokuznetsk, Filial KuzGTU, 2013, pp. 406-410.
11. Khoreshok A.A., Kuznetsov A.V., Shal'kov A.V. Simulation and field measurements of reliability parameters of dump truck hydraulic system. *The Third International Innovative Mining Symposium*, 2018, vol. 41. DOI: org/10.1051/e3sconf/20184103004
12. Tekhnicheskii reglament Tamozhennogo Soiuza 13/2011. O trebovaniakh k avtomobil'nomu i aviatsionnomu benzinu, dizel'nomu i sudovomu toplivu, toplivu dlia reaktivnykh dvigatelei i mazutu [Technical Regulations of the Customs Union 13/2011. On requirements for motor and aviation gasoline, diesel and marine fuel, jet fuel and fuel oil] Ed. AO "Kodeks". Moscow, 2019, 31 p.
13. Instruksiia po kontroliu i obespecheniiu sokhraneniia kachestva nefteproduktov v organizatsiiakh nefteproduktoobespecheniia (utverzhdена приказом Министерства энергетики Россиiskoi Federatsii ot 19 iyunia 2003 g. № 231) [Instructions for the control and maintenance of the quality of petroleum products in petroleum product supply organizations (approved by order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated June 19, 2003 No. 231)]. Ed. I.Kh. Iusufov. Moscow, 2003, 47 p.
14. Sokolov A.I. Izmenenie kachestva masla i dolgovechnost' avtomobil'nykh dvigatelei [Change in oil quality and durability of automotive engines] Tomsk, Tomskii gosudarstvennyi universitet, 1976, 127 p.
15. Ametov V.A., Shal'kov A.V., Kuznetsov A.V., Starchenko A.G., Miagkikh I.A. Razrabotka sistemy kontrolya tekhnicheskogo sostoiianiia dvigatelei vnutrennego sgoraniia ekskavatorno-avtomobil'nogo kompleksa s ispol'zovaniem onlain-tekhnologii [Development of a system for monitoring the technical condition of internal combustion engines of an excavator-automobile complex using online technologies] *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i molodykh uchennykh KuzGTU*, Kemerovo, nauchno-innovatsionnoe upravlenie KuzGTU, 2020, pp. 123-126.

Получено 30.09.2020

Об авторах

Аметов Винур Абдурафиевич (Томск, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры автомобильного транспорта и электротехники, эксперт системы ТЭКСЕРТ, руководитель Испытательного центра ГСМ и АТС, Томский государственный архитектурно-строительный университет (634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, e-mail: ametov@tsuab.ru).

Беляев Михаил Константинович (Томск, Россия) – эксперт в области ТО и ремонта колесных транспортных средств системы ГОСТ Р и системы ДСАТ, главный специалист Испытательного центра ГСМ и АТС, Томский государственный архитектурно-строительный университет (634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, e-mail: belyaev-mikle@mail.ru).

Зубрицкий Алексей Валерьевич (Томск, Россия) – инженер-исследователь, зав. лабораторией, Томский государственный архитектурно-строительный университет (634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, e-mail: avzubritskiy@gmail.com).

Шальков Антон Владимирович (Прокопьевск, Россия) – старший преподаватель кафедры информационных технологий, машиностроения и автотранспорта филиала Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева в г. Прокопьевске (653039, Кемеровская область, г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а, e-mail: prk-s@yandex.ru).

About the authors

Vinur A. Ametov (Tomsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automobile Transport and Electrical Engineering, Expert of the TEKSERT system, Head of the Test Center for Fuels and Lubricants and motor vehicles, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering (2, Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russian Federation, e-mail: ametov@tsuab.ru).

Mikhail K. Belyaev (Tomsk, Russian Federation) – an Expert in the field of maintenance and repair of wheeled vehicles of the GOST R system and the DSAT system, Chief Specialist of the Test Center for Fuels and Lubricants and Motor Vehicles, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering (2, Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russian Federation, e-mail: belyaev-mikle@mail.ru).

Alexey V. Zubritsky (Tomsk, Russian Federation) – Research Engineer, Head of Laboratory, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering (2, Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russian Federation, e-mail: avzubritskiy@gmail.com).

Anton V. Shalkov (Prokopyevsk, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Information Technologies, Mechanical Engineering and Automotive, Prokopyevsk Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (19a, Nogradskaya st., Prokopyevsk, 653039, Kemerovo region, Russian Federation, e-mail: prk-s@yandex.ru).