

Технология и технологические машины

УДК 621.43:629.113/114/115; 621.892:662.75.004

Разработка способов увеличения ресурса и надежности систем смазки двигателей внутреннего сгорания наземного транспорта

В.А. Алтунин¹, К.В. Алтунин¹, И.Н. Алиев², А.А. Щиголев¹, Е.Н. Платонов¹

¹ КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ, 420111, Казань, Российская Федерация, К. Маркса ул., д. 10

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Methods for Life-Extension and Increase of Reliability of Lubrication Systems in Internal Combustion Engines Used in Ground Transportation

V.A. Altunin¹, K.V. Altunin¹, I.N. Alyev², A.A. Tschigolev¹, E.N. Platonov¹

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI, 420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10

² BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

@ e-mail: fltspacevi@yahoo.com

i Рассмотрены проблемы систем смазки поршневых и газотурбинных двигателей внутреннего сгорания наземного транспорта. Одной из главных проблем является процесс осадкообразования в маслоподводящих и маслоотводящих каналах, а также в масляных форсунках. Вследствие осадкообразования происходит преждевременный выход из строя двигателя. Рассмотрены существующие способы борьбы с этим негативным процессом: удаление осадка, ограничение его роста и предотвращение осадкообразования. Предложены новые способы борьбы с осадкообразованием: без влияния и с влиянием электростатических полей, а также гибридно. Создан алгоритм учета процесса осадкообразования и способов борьбы с ним при проектировании, расчете, создании и эксплуатации новых систем смазки перспективных двигателей повышенных характеристик. Разработаны новые способы запуска двигателей в экстремальных климатических и других условиях. На основе анализа научно-технической и патентной литературы, результатов экспериментальных исследований разработаны новые способы увеличения ресурса и надежности систем смазки двигателей наземных транспортных систем.

Ключевые слова: масляные каналы, фильтры, форсунки, осадкообразование, поршневые двигатели внутреннего сгорания, газотурбинные двигатели, ресурс, надежность, экономичность.

i The article describes problems in lubrication systems of piston and gas turbine internal combustion engines used in ground transportation. One of the main problems is associated with deposit formation in the lubricant input and output channels, and in the lubricant noz-

zles that causes premature engine failure. The existing methods to counter this negative process are investigated: deposit removal, growth curbing and deposit prevention. New methods of deposit control are proposed, without electrostatic fields, with electrostatic fields, and hybrid. An algorithm is developed that takes into account the deposit formation process and its control methods when designing, calculating, manufacturing and operating new lubrication systems for future engines with enhanced characteristics. New methods to start the engine in extreme climate and other conditions have been developed. Based on the analysis of scientific, technical and patented literature, and the results of experimental investigations, new methods have been developed to extend service life and increase reliability of engine lubrication systems for ground transportation.

Keywords: lubricant channels, filters, nozzles, deposit formation, gas turbine engines, service life, reliability, economic feasibility.

Проблемы, возникающие в системах смазки различных двигателей, энергоустановок (ЭУ) и техносистем (ТС), тесно связаны с особенностями тепловых процессов в смазочных моторных маслах [1, 2]. Один из главных негативных процессов — это процесс осадкообразования в масляных каналах, форсунках и фильтрах. Вследствие осадкообразования понижается плановый и расчетный ресурс двигателей и ЭУ [3–12], происходят аварийные ситуации, выход из строя как масляной системы, так и двигателя в целом, а значит, и всего транспортного средства. В связи с этим вопросы борьбы с осадкообразованием в системах смазки двигателей и ЭУ являются актуальными [13–19]. В статье рассмотрены проблемы масляных систем: базовых (маршевых) карбюраторных и дизельных поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и газотурбинных двигателей (ГТД) наземного транспорта; вспомогательных ДВС, ГТД (бортовых, выносных, буксируемых, стационарных электростанций, компрессорных, насосных и других ЭУ и ТС).

Анализ термодинамического состояния моторных масел. Нагрев моторных масел напрямую зависит от нагрева деталей двигателей, ЭУ и ТС, поэтому в первую очередь необходимо рассмотреть их тепловые режимы.

При работе базовых (маршевых) и вспомогательных ДВС (а также поршневых ЭУ и ТС) вследствие процесса сгорания горючей смеси в камере сгорания (КС) происходит интенсивный нагрев деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и всего ДВС [1–4, 6, 8–11, 15, 17]. Температура газообразных продуктов сгорания в КС ДВС может достигать 2 800 К и более, а давление часто превышает 10...15 МПа. На поршень действуют тепловые нагрузки, связанные с отводом в него значительного ко-

личества теплоты от горячих газов, а также с отводом теплоты от выделяющейся в результате трения при движении элементов поршневой группы. Как правило, поршни изготавливают из алюминиевых сплавов, однако при росте среднего эффективного давления при использовании газотурбинного наддува, особенно в двигателях больших размеров, жаропрочность алюминиевых сплавов часто оказывается недостаточной.

Несмотря на применение специальной системы охлаждения поршня, температуру в отдельных местах его днища не удается удержать на приемлемом для алюминиевых сплавов уровне. В этом случае для всего поршня или его наиболее нагретой части (головки) используют более жаропрочные материалы — чугуны и легированные стали. Температура верхней наружной поверхности поршней может достигать 570...600 К и более. В зоне первого компрессионного кольца температура повышается до 393...493 К и более. Первое кольцо нагревается до 473...523 К и более, нагрев остальных колец происходит менее интенсивно. Температуры в зоне контакта кольца с цилиндром могут быть существенно выше. Неразрезные жаровые кольца форсированных двухтактных двигателей имеют температуру 623 К и более, а температура цилиндра в указанной зоне может достигать 508 К. Нагрев шатунов достигает 373...393 К, коленчатых валов — 433...453 К.

Температура стенок КС в чугунных головках доходит до 623 К, а перепады температур между отдельными точками — до 423 К. В головках из алюминиевых сплавов, обладающих хорошей теплопроводностью, максимальные температуры несколько ниже, а перепады температур обычно не превышают 333 К.

Температура тарелки и стержня выпускных клапанов в современных двигателях достигает

соответственно 1 233 и 723 К в карбюраторных двигателях, 1 123 и 673 К — в дизелях. Клапан с полостью, частично заполненной натрием, имеет температуру тарелки на 393 К ниже, а температуру стержня на 373 К выше, чем сплошной клапан.

Температура газов, прорывающихся на такте сжатия, составляет около 423...723 К в карбюраторных двигателях и 772...973 К — в дизелях. Температура блока цилиндров может достигать более 473 К. Детали ЦПГ и механизма газораспределения (МГР), блоки ДВС и их крышки имеют различные виды и типы охлаждения, а также конструктивно имеют каналы для подачи моторного масла к трущимся и теплонапряженным деталям.

Помимо смазки одной из главных функций моторного масла в ДВС является отвод теплоты от его нагретых деталей. Количество теплоты, отводимой маслом, составляет 1,5...4,5 % общей теплоты, выделяемой двигателем. Эта величина зависит от большого числа факторов: конструкции двигателя, степени его форсированности и в первую очередь наличия принудительного охлаждения поршней маслом, режима работы, количества прокачиваемого масла, его температуры и т. п. Например, в наддувных модификациях двигателей количество теплоты, отводимой маслом, возрастает до 10 %.

Почти 50 % теплоты масло получает за счет соприкосновения с горячими деталями двигателя (поршень, кольца, гильзы), остальное — в результате трения в подшипниках двигателя и трения поршней в цилиндрах.

Теплоемкость масла невелика. Отдача теплоты от масла затруднительна вследствие низкого коэффициента теплопередачи между маслом и холодными деталями, например, масло радиатора. Однако нагревается масло от горячих стенок достаточно интенсивно, так как в соседстве с горячими деталями его коэффициент теплопередачи относительно высок.

Основная часть теплоты, выделяющейся в двигателе в результате сгорания топлива и трения, отводится деталями ЦПГ. Так, первое компрессионное кольцо отводит к стенкам цилиндра 30...40 % теплоты, полученной поршнем от продуктов сгорания и трения, а все остальные кольца — до 70 %. На интенсивность теплопередачи и температуру деталей ЦПГ решающее влияние оказывает масляная пленка между соприкасающимися поверхностями цилиндра, поршневых колец и поршня. Тепло-

проводность масляной пленки примерно в 4 раза больше, чем теплопроводность воздуха, поэтому при увеличении зазора между цилиндром и поршнем температура этих деталей и колец может существенно возрасти вследствие ухудшения теплопередачи.

Обычно коэффициент теплопередачи между поршневыми кольцами и цилиндром достаточно велик и повышается с возрастанием температуры. В этом случае вязкость масляной пленки между сопряженными поверхностями снижается, что значительно улучшает теплопередачу.

На температуру и износ деталей ЦПГ заметно влияет количество поступающего к ним масла. Увеличение масла на этих деталях улучшает отвод теплоты от поршня к стенке цилиндра. Протекая через лабиринт колец, масло оказывает охлаждающее действие. Кроме того, в этом случае улучшается уплотнение газового стыка, что уменьшает общий подвод теплоты к поршневым кольцам и другим деталям.

Две важнейшие функции моторного масла — отвод теплоты от деталей и уплотнение зазоров в их сопряжениях — тесно связаны. При плохом уплотнении цилиндра резко увеличивается прорыв картерных газов, разрушающих масляную пленку на деталях ЦПГ и способствующих их перегреву. В этом случае температура компрессионных колец может быть значительно (на 20...30 К) выше температуры соседних участков поршня, и теплопередача от поршня через кольца к цилиндру резко ухудшится. Эффективное уплотнение газового стыка — необходимое условие для надежного пуска двигателей, повышения их мощностных показателей, снижения дымности, токсичности, интенсивности загрязнения масла и т. п.

Масляные каналы играют большую роль в работе поршневых ДВС, ЭУ и ТС [1–4, 8–10, 13–15]. Они бывают наружными (в виде металлических трубок) и внутренними (в стенках корпусов ДВС, в поршнях, шатунах, коленчатых валах и др.). Также их можно разделить на маслоподводящие и маслоотводящие каналы. Канал маслоподвода у масляных форсунок для охлаждения поршней ДВС может быть внутренним или наружным (индивидуальным). Практически все каналы имеют цилиндрическую форму и гладкую внутреннюю поверхность. Диаметры каналов могут составлять от нескольких миллиметров до 10 мм и более.

Маршевые и вспомогательные ГТД также подвержены нагреву [2, 5–7]. В ГТД основными

агрегатами и узлами трения, для которых требуется смазка, являются шариковые и роликовые подшипники турбокомпрессорного агрегата, шестерни редуктора отбора мощности, шестерни привода агрегатов, работающие на высоких оборотах, шлицевые муфты валов и т. п. Благодаря наличию смазочного масла уменьшаются трение и износ деталей и агрегатов. Масло отводит от них теплоту, предотвращает появление коррозии и задиоров, удаляет попадающие между трущимися деталями твердые включения и частицы. В некоторых ГТД масло служит рабочей жидкостью (системы автоматизации и регулирования) и применяется в сервомеханизмах. При любых давлениях и температурах необходимо обеспечивать надежную смазку двигателя. Наиболее ответственные и нагруженные подшипники (подшипники турбокомпрессорного агрегата в ГТД), а также зубчатые и шлицевые соединения имеют принудительную смазку под давлением, осуществляемую с помощью центробежных или струйных форсунок.

В центробежной масляной форсунке [6, 7] масло под давлением нагнетающего насоса проходит через сетку и по винтовой канавке стержня распылителя (где его струя закручивается) попадает в калибровочное отверстие корпуса форсунки и распыливается на подшипник. Недостаток форсунок этого типа — насыщение распыленного масла воздухом, вследствие чего ухудшается отвод теплоты от подшипника. В связи с этим наиболее широко распространены простые по устройству струйные форсунки, представляющие собой трубку с калиброванным отверстием (диаметром 1,0...1,5 мм), из которого смазочное масло под давлением в виде распыленной струи падает на подшипник.

Остальные трущиеся детали смазываются разбрызгиванием масла, которое попадает на вращающиеся детали и образует масляный туман. Замкнутая система смазки ГТД обычно включает масляный бак, масляный теплообменник, масляные насосы, маслофильтры, воздухоотделитель, редукционные и запорные клапаны, масляные форсунки, маслопровод и приборы контроля температуры и давления масла.

Температура подшипников трансмиссии и стенок масляных полостей, омываемых маслом, часто превышает 573 К. Температура втулки контактно-кольцевого уплотнения шарико-

подшипника компрессора высокого давления достигает 598 К. Температура стакана роликоподшипников турбины высокого и низкого давления после останова двигателя повышается до 613 К, а температура воздушно-масляной эмульсии в полости подшипников роторов вентилятора — до 460 К. Температура масла на выходе из двигателя достигает 438...495 К.

В каналах маслоподвода и маслоотвода в различных ДВС, ГТД, ЭУ, ТС происходят разные тепловые процессы, для исследования которых необходимо знать термодинамические состояния и свойства моторных масел. Далее проведем анализ термодинамического состояния моторных масел.

Рассмотрим термодинамическое состояние моторных масел в каналах и агрегатах системы смазки различных ДВС, ГТД, ЭУ, ТС.

Перед началом работы ДВС моторное масло в системе смазки находится при нормальном давлении и температуре окружающей среды. В ходе работы ДВС моторное масло прогревается до различных температур, особенно в пограничных слоях на деталях КС, ЦПГ, МГР, в маслоподающих и маслоотводящих каналах под различными давлениями в условиях вынужденной (при работе масляных насосов) и естественной (при останове двигателя) конвекциях. Можно отметить, что моторное масло в таких условиях находится в следующих режимах: до начала кипения, начальная стадия кипения (с образованием паровых пузырей), развитая стадия кипения (с образованием тепловых свилей) и стадия критического кипения (с образованием сухих пятен, максимальным испарением, образованием паровой подушки и постепенным исчезновением паровых свилей). Практически при любых давлениях на нагретых до температуры 373 К и более металлических деталях при контакте с маслом происходит негативный процесс осадкообразования как при вынужденной, так и при естественной конвекции применяемого масла [6–15].

В ГТД моторное масло также находится в различных термодинамических условиях по температуре и давлению, при естественной и вынужденной конвекции [5–7]. В ГТД моторное масло может нагреваться до температуры 495 К и более при давлении на рабочем фильтре 0,13...0,15 МПа, а в других маслосистемах — 0,35...0,50 МПа, т. е. в ГТД моторное масло также может находиться в различных состояниях: до начала кипения, при кипении и при

критических температурах с образованием сухих пятен на стенках каналов.

Знание термодинамического состояния моторного масла в ДВС, ГТД, ЭУ, ТС необходимо для разработки новых систем маслоподдачи и защиты от осадкообразования, систем фильтрации, очистки и охлаждения разогретого масла, новых датчиков и систем контроля, новых методик проектирования, создания и эксплуатации перспективных ДВС, ГТД, ЭУ, ТС различных классов и назначения.

При различных термодинамических состояниях меняются теплофизические и другие свойства моторных масел, включая свойства к окислению масла с образованием осадков.

При эксплуатации ДВС, ГТД, ЭУ и ТС практически все внутренние каналы испытывают нагрев и давление, они подвержены негативному процессу осадкообразования (как высоко-, так и низкотемпературному). Во внешних каналах при определенных условиях и конфигурациях также могут происходить низкотемпературное осадкообразование и захолаживание (вследствие концентрации отколовшихся твердых частиц углеродистых осадков). Далее более подробно рассмотрим различные углеродистые отложения, возникающие при нагревах моторных масел.

Анализ осадкообразования в системах смазки двигателей. Высокая температура деталей ЦПГ карбюраторных и дизельных ДВС является главным источником возникновения негативных процессов, связанных с нагаро-, лако- и осадкообразованием [4, 8–15]. Однако в карбюраторных двигателях количество сажи и сернистых соединений, образующихся при сгорании топлива и поступающих в масло, значительно меньше. В таких двигателях при работе на высокотемпературном режиме главной причиной образования лаковых отложений служит окисление моторного масла вместе с присутствующими в нем продуктами неполного сгорания топлива. Отложения при высокотемпературном режиме образуются в виде нагаров и лаков. В состав этих отложений помимо углеродистых и асфальто-смолистых продуктов входят также зольные остатки от сгорания топлива и масла, разложившиеся присадки, пыль, продукты износа.

На поверхностях деталей с более высокой температурой отложения более твердые и темные и, как правило, содержат большое количе-

ство золы, карбенов и карбонидов. Такие отложения на деталях накапливаются в процессе работы двигателя с затухающей скоростью.

Уменьшение интенсивности загрязнения поверхностей деталей по мере работы двигателя объясняется следующими причинами:

- снижение каталитического влияния металлической поверхности по мере ее загрязнения нагаром и лаком;
- малая теплопроводность отложений, что приводит к повышению температуры внешней поверхности отложений (с увеличением толщины) и их выгоранию на поверхностях деталей, омываемых горячими газами;
- истирание образующихся отложений на поверхностях трения.

Предельная толщина образовавшегося нагара определяется тепловым режимом работы двигателя и не зависит от качества топлива и масла. Чем холоднее стенки КС и ниже температура сгорания, тем больше зона холодных температур и толще слой нагара. При увеличении нагара ухудшается охлаждение КС, уменьшается ее объем и увеличивается фактическая степень сжатия. Нагар может вызвать преждевременное воспламенение смеси от какой-либо горячей точки, возникающей в КС. Такой точкой могут оказаться частицы нагара, особенно если в его состав входят соединения металлов (например, свинца), способные быстро нагреваться до высоких температур. Преждевременное воспламенение сопровождается стуком в ДВС, вызывает снижение его мощности и разрушает детали. Кроме того, повышение нагарообразования, наблюдаемое при работе двигателя на пониженных тепловых режимах, ведет к тому, что часть нагара смывается стекающими по стенкам цилиндра наиболее тяжелыми и не успевающими испариться при этих режимах фракциями топлива. Попадая таким образом на поверхность трения пары «цилиндр — поршень», частицы нагара увеличивают износ этих деталей. В дальнейшем частицы нагара вместе с тяжелыми фракциями топлива поступают в картер и загрязняют масло, вследствие чего повышается абразивный износ деталей двигателя.

При повышенном лакообразовании происходит пригорание поршневых колец, они как бы приклеиваются лакоподобной пленкой к поршню. Кольца теряют при этом упругость и перестают выполнять свои функции. Нарушается герметичность между цилиндром и порш-

нем, происходит сбой нормального режима смазки колец и гильзы, возникают задиры и износ зеркальной поверхности гильзы в результате появления слоя твердого осадка в кольцевых канавках и выхода колец за расчетные пределы, а самое главное — происходит заклинивание колец и самого поршня.

Особо необходимо отметить маслоподводящие и маслоотводящие каналы в стенках корпусов ДВС, в поршнях, шатунах, коленчатых валах, а также масляные форсунки, охлаждающие поршни, поскольку процесс осадкообразования в них очень опасен. При частичном закоксовывании хотя бы одного маслоподводящего (маслоотводящего) канала возникают большие проблемы со смазкой деталей ЦПГ и МГР, что неизбежно приводит к ускоренному выходу из строя всего поршневого ДВС, ЭУ, ТС. Полное закоксовывание хотя бы одного маслоподводящего (маслоотводящего) канала выводит из строя ДВС, ЭУ, ТС уже через несколько минут работы с необходимостью их дальнейшего заводского ремонта. Частичное закоксовывание форсунки масляного охлаждения поршня приводит к нерасчетной подаче масла на внутреннюю часть горячего поршня, т. е. нарушается расчетный процесс его охлаждения, что негативно сказывается и на других процессах в ДВС. Полное закоксовывание масляной форсунки приводит к быстрому перегреву горячего поршня, ускоренному закоксовыванию всех маслоподводящих и маслоотводящих каналов внутри него, закоксовыванию кольцевых канавок и колец с дальнейшим их заклиниванием, заклиниванию самого поршня и выходу из строя всего ДВС, ЭУ, ТС. Из опыта эксплуатации ДВС известно, что масляная форсунка смазки и охлаждения поршня полностью закоксовывается уже через 800 ч (или циклов) работы.

Твердые углеродистые отложения на рабочих поверхностях клапанов отрицательно влияют на работу поршневых ДВС, ЭУ, ТС. Существенное влияние на загрязнение деталей ЦПГ оказывает проникновение масла в КС через зазор между стеблем (стержнем) впускного клапана и направляющей втулкой, что происходит более интенсивно при возникновении слоя твердого осадка на рабочих поверхностях клапана и его гнезда. Масло при сгорании образует в КС большое количество углеродистых и зольных остаточных продуктов, которые, прорываясь вместе с газами в картер, по пути интенсивно загрязняют детали ЦПГ.

При понижении температуры количество низкотемпературных углеродистых отложений увеличивается в несколько раз. Типичный элементарный состав углеродистых отложений на деталях ДВС при его работе на низкотемпературном режиме: углерод — 69,0 %; водород — 6,5 %; кислород — 21,0 %; азот — 2,0 %, сера — 1,5 %; относительная молекулярная масса — 800. Низкотемпературные отложения откладываются на деталях и агрегатах, имеющих относительно низкие рабочие температуры (крышка клапанной коробки, масляный картер, фильтры, сетки маслоприемников насосов и т. п.).

Надежная работа современных ДВС, в том числе и форсированных, может быть обеспечена только в случае применения масел с высокими эксплуатационными свойствами. Получение таких масел требует необходимой степени их очистки и введения в них специальных присадок, позволяющих резко улучшить эксплуатационные свойства масел. К указанным присадкам относятся:

- вязкостные (загущающие), улучшающие вязкостно-температурную характеристику масла;
- депрессорные, понижающие температуру застывания масла;
- антиокислительные и нейтрализующие, уменьшающие образование кислых и смолообразующих продуктов окисления масла, а также нейтрализующие действие сернистых соединений;
- антикоррозионные, защищающие цветные металлы подшипников от коррозионного износа;
- моюще-диспергирующие, препятствующие образованию различных видов отложений на деталях двигателя и поддерживающие загрязняющие примеси в масле во взвешенном состоянии;
- противоизносные и противозадирные, уменьшающие износ и задиры пар трения двигателя;
- антиржавейные, предназначенные для предотвращения коррозии деталей в условиях длительного хранения;
- антипенные, уменьшающие склонность масел к пенообразованию.

Однако негативные процессы, связанные с нагаро-, лако- и осадкообразованием в ДВС, происходят и в случае применения перечисленных присадок, так как многие из них работают до температуры 473 К и, кроме того, со временем теряют свои свойства. В связи с этим необ-

ходимо разрабатывать новые средства и способы борьбы с процессами углеродистых отложений на деталях поршневых ДВС, ЭУ, ТС.

Процесс осадкообразования в системах смазки различных базовых и вспомогательных ГТД, ЭУ и ТС также очень опасен [2, 5–7]. Частичное закоксовывание масляной форсунки приводит к недостаточной и нерасчетной смазке и охлаждению подшипников и трущихся деталей, пригоранию шариков и роликов подшипника, быстрому выходу из строя всего двигателя, ЭУ и ТС. Полное закоксовывание масляной форсунки приводит к ускоренной поломке ГТД, ЭУ, ТС. Твердые углеродистые частицы осадка быстро забивают сеточные фильтры, каналы, ухудшают стабильную работу всего ГТД, ЭУ, ТС.

Согласно теории Г.Ф. Большакова [12], все углеводородные жидкости до температуры 313 К являются диэлектриками, при повышении температуры до 373 К в них возникают заряженные (+, –) частицы и углеводородные жидкости становятся электропроводными средами, при дальнейшем повышении температуры в них образуются диполи, которые активно участвуют в процессе осадкообразования. По Шоттки и Френкелю известно [12, 17], что любые металлические поверхности (даже полированные) имеют микронеровности, на остриях которых всегда присутствуют заряды с чередующимися знаками (+, –). При нагреве моторных масел до температур более 373 К диполи притягиваются к противоположным зарядам на микроостриях поверхности металлических деталей, образуя слой углеродистого осадка. Этот процесс в полной мере относится и к моторным маслам нефтяного происхождения. Авторами работы [20] было выдвинуто предположение о возможности управления заряженными частицами и диполями в нагретых моторных минеральных маслах магнитными и электростатическими полями в целях предотвращения осадкообразования на металлических поверхностях деталей систем смазки различных ДВС, ГТД, ЭУ и ТС.

Анализ способов борьбы с осадкообразованием в смазочных системах двигателей. Существуют следующие способы и методы борьбы с осадкообразованием в моторных маслах для поршневых ДВС, ГТД, ЭУ, ТС [6, 7]:

- применение специальных антиокислительных, моющих и других присадок;

- правильный выбор моторного масла для данных ДВС, ГТД, ЭУ, ТС;

- осуществление контроля за масляными фильтрами;

- своевременная смена фильтрующих элементов;

- плановая замена отработанного моторного масла на новое;

- предтопливная обработка масла с помощью магнитных и электрических полей;

- очистка масла с помощью магнитных и электрических полей;

- промывка систем смазки ДВС, ГТД, ЭУ, ТС специальными моющими жидкостями (без разборки и разборкой);

- механическая очистка деталей и каналов масляной системы ДВС, ГТД, ЭУ, ТС от осадка (с разборкой);

- промывка каналов масляной системы с помощью специальных жидкостей при термоакустических автоколебаниях давления (для удаления осадка);

- выжигание твердого углеродистого осадка в насыщенном пламени метана;

- замена закоксованных деталей и агрегатов на новые.

Однако применение различных антиосадкообразующих присадок возможно только до температуры масла или нагреваемых стенок каналов 473 К, при дальнейшем ее повышении осадок начинает появляться и расти. Остальные методы малоэффективны и очень затратны по временным, технологическим и экономическим показателям. Действующая в настоящее время система контроля способна следить за температурой и давлением в системах смазки (в основном на фильтрах), однако контроль за появлением и ростом углеродистого осадка в масляных каналах и в масляных форсунках не осуществляется. Отсутствуют эффективные системы пассивной и активной борьбы с осадком по его предотвращению, уменьшению, ограничению и удалению без разбора ДВС, ГТД, ЭУ и ТС.

Экспериментальные исследования В.А. Алтунина, А.А. Щиголева и других [17] показали, что магнитные поля очень слабо влияют на интенсификацию теплоотдачи к моторным маслам и вообще не влияют на предотвращение осадкообразования в них. Видимо, поэтому магнитные поля используют в масляных системах ДВС в основном для очистки масел от металлических примесей, которые образуются

при эксплуатации. Электростатические поля оказывают значительное влияние на увеличение коэффициента теплоотдачи к моторным маслам в условиях естественной конвекции (до 450 %), а самое важное — они способствуют предотвращению осадкообразования в зоне прохождения силовых линий. Поэтому использование этих полей можно отнести к перспективным способам борьбы с осадкообразованием в моторных маслах. Применение электростатических полей в системах смазки может увеличить ресурс их работоспособности в 2–3 раза.

В ходе экспериментальных исследований установлено [17], что оребренная нагреваемая поверхность деталей в виде винтовой, кольцевой конической резьбы с высотой зубьев 2... 5 мм способна затормаживать негативный процесс осадкообразования на высоту этих зубьев, т. е. эту оребренную поверхность можно считать новым способом ограничения роста осадка в моторном масле. Ресурс таких масляных каналов может увеличиться в 2 раза. Ресурс гибридных масляных каналов, где организована борьба с осадкообразованием с влиянием и без влияния электростатического поля одновременно, может быть увеличен в 3–4 раза.

На основе анализа научно-технической и патентно-лицензионной литературы [1–16], результатов экспериментальных исследований В.А. Алтунина, А.А. Щиголева и других можно предложить перспективные способы и методы борьбы с осадкообразованием в масляных системах ДВС, ГТД, ЭУ, ТС:

- применение электростатических полей внутри масляных систем ДВС, ГТД, ЭУ, ТС (для предотвращения и уменьшения осадка);
- изменение конструкции масляных каналов и деталей, а также их поверхностей (для затормаживания и ограничения процесса осадкообразования);
- обеспечение дополнительной системой охлаждения теплонапряженных деталей масляной системы ДВС, ГТД, ЭУ, ТС до температуры 373 К и ниже (для предотвращения осадкообразования);
- резервирование каналов, форсунок, деталей и агрегатов масляных систем ДВС, ГТД, ЭУ, ТС (для увеличения ресурса ДВС, ГТД, ЭУ и ТС);
- создание каналов, форсунок с центральной осевой иглой для контроля за степенью закоксованности, удаления твердого углеродистого осадка, обеспечения вынужденной конвекции

масла за счет электрического ветра (при выходе из строя основной насосной системы);

- создание новых датчиков и систем контроля за несанкционированным повышением температуры деталей ДВС, ГТД, ЭУ, ТС, возникновением осадка и его удалением в масляной системе ДВС, ГТД, ЭУ, ТС (для своевременного включения в работу систем защиты от осадка и его удаления);

- разработка и применение новых конструктивных схем форсунок охлаждения поршня ДВС, охлаждения и смазки подшипников ГТД, маслоподводящих и маслоотводящих каналов ДВС, ГТД: с влиянием и без влияния электростатического поля, гибридных (для предотвращения осадкообразования, интенсификации теплоотдачи, удаления осадка);

- разработка новых конструктивных схем масляных теплообменников: с влиянием и без влияния, гибридных (для интенсификации теплоотдачи, предотвращения осадкообразования);

- разработка новых конструктивных схем фильтров: с влиянием и без влияния электростатического поля; гибридных (для повышения эффективности очистки и фильтрации масла).

Для повышения надежности ДВС необходима также разработка новых систем запуска ДВС в экстремальных условиях (при низких температурах, разряженных аккумуляторных батареях, отсутствии запасов воздуха и др.), когда в первую очередь возникает потребность разогрева масляной системы. Авторами предложены новые способы запуска ДВС в экстремальных условиях [18, 19].

Способы увеличения ресурса и надежности систем смазки двигателей. На основе анализа научной и патентно-лицензионной литературы, результатов экспериментальных исследований можно предложить следующие способы увеличения ресурса и надежности систем смазки транспортных базовых (маршевых) и вспомогательных поршневых и газотурбинных ДВС [1–17]:

- 1) учет особенностей тепловых процессов, в частности процесса осадкообразования, в моторных маслах при различных термодинамических условиях, а также их негативных влияний на работу всего двигателя перед началом проектирования, расчета и создания систем смазки для разных ДВС;

- 2) правильный выбор способов борьбы с осадкообразованием в ходе проектирования, создания и эксплуатации новых систем смазки

двигателей. Перспективными являются следующие способы: охлаждение горячих деталей до температуры ниже 373 К; конструктивный увод горячих деталей в область с наименьшим нагревом; применение электростатических полей; разработка сменных конструкций; создание новых систем и датчиков контроля за осадкообразованием с выводом данных на специальное табло механика-водителя;

3) создание новой системы запуска ДВС в экстремальных условиях [18, 19].

Выводы

1. Проведен анализ возможности увеличения ресурса и надежности существующих и новых перспективных систем смазки двигателей, ЭУ и ТС наземного транспорта.

2. Показаны существующие и перспективные способы и методы борьбы с негативным процессом осадкообразования, применение которых повысит ресурс и надежность новой отечественной техники.

Литература

- [1] Орлин А.С., Круглов М.Г., ред. *Двигатели внутреннего сгорания: устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей*. Москва, Машиностроение, 1990. 228 с.
- [2] Агафонов А.Н., Сайданов В.О., Гудзь В.Н. *Комбинированные энергоустановки объектов малой энергетики*. Санкт-Петербург, Изд-во СПбГПУ, 2005. 262 с.
- [3] Венцель С.В. *Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания*. Москва, Химия, 1979. 238 с.
- [4] Кавтарадзе Р.З. *Локальный теплообмен в поршневых двигателях*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 592 с.
- [5] Косточкин В.В. *Надежность авиационных двигателей и силовых установок*. Москва, Машиностроение, 1988. 272 с.
- [6] Яновский Л.С., ред. *Инженерные основы авиационной химмотологии*. Казань, Изд-во Казан. ун-та, 2005. 714 с.
- [7] Яновский Л.С., ред. *Горюче-смазочные материалы для авиационных двигателей*. Казань, Мастер Лайн, 2002. 400 с.
- [8] Кузьмин Н.А., Зеленцов В.В., Крупа В.В. Тепловое состояние, изнашивание и отложения в ДВС. *Известия Тульского государственного университета*, 2001, вып. 5, с. 58–61.
- [9] Кузьмин Н.А., Зеленцов В.В., Донато И.О. Исследование отложений в автомобильных двигателях. *Тр. Нижегородского гос. технич. ун-та им. Р.Е. Алексеева*, 2010, № 2 (81), с. 156–165.
- [10] Лазарев Е.А. Повышение эффективности охлаждения днища поршня дизеля преобразованием формы и характера движения струи охлаждающего масла. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*, 2008, № 23(123), с. 60–63.
- [11] Сомов В.А. Смазка машин и механизмов. Особенности смазки деталей дизелей. *Трение, износ, смазка*, 2009, т. 11, № 1, с. 17–25.
- [12] Большаков Г.Ф. *Физико-химические основы применения топлив и масел: Теоретические аспекты химмотологии*. Новосибирск, Наука, 1987. 209 с.
- [13] Бунаков Б.М., Первушин А.Н., Смирнов К.Ю. Моторные автомобильные масла. Состояние и пути повышения их качества. *Автомобильная промышленность*, 2008, № 10, с. 28–30.
- [14] Григорьев М.А., Бунаков Б.М., Долецкий В.А. *Качество моторного масла и надежность двигателей*. Москва, Изд-во стандартов, 1981. 232 с.
- [15] Гуреев В.М., Дружинин А.М., Гельманов Р.Р. Нагарообразование и ресурс ДВС. *Вестник машиностроения*, 2009, № 1, с. 29–31.
- [16] Нигматуллин Р.Г., Нигматуллин В.Р., Нигматуллин И.Р. *Диагностика двигателя внутреннего сгорания по анализу моторного масла*. Уфа, Изд-во ГУП РБ «Уфимский полиграфкомбинат», 2011. 297 с.
- [17] Алтунин В.А., Щиголев А.А., Юсупов А.А. Повышение надежности систем смазки поршневых двигателей внутреннего сгорания. *Матер. докл. Международ. научно-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения»*. Самара, 25–27 июня 2014. Изд-во СГАУ им. акад. С.П. Королева, 2014, ч. 1, с. 157.

- [18] Алтунин В.А., Яновская М.Л., Щиголов А.А., Монда В.А., Демиденко В.П. *Способ заправки воздушных баллонов запуска дизельных двигателей воздухом*. Пат. № 2541022, Российская Федерация, 2015, бюл. № 4, 12 с.
- [19] Алтунин В.А., Яновская М.Л., Щиголов А.А., Монда В.А., Демиденко В.П. *Пульт управления и контроля за работой съемной рубашки охлаждения артиллерийского ствола*. Пат. № 2541570, Российская Федерация 2015, бюл. № 5, 26 с.
- [20] Алиев И.Н., Мильвидский А.Р. Деформация поверхности электропроводящей жидкости под действием импульса сильного поля. *Инженерно-физический журнал*, 2004, т. 77, № 1, с. 133–134.

References

- [1] *Dvigateli vnutrennego sgoraniia: ustroistvo i rabota porshnevnykh i kombinirovannykh dvigatelei* [Internal combustion engines: structure and operation of reciprocating engines and combined]. Ed. Orlin A.S., Kruglov M.G. Moscow, Mashinostroenie publ., 1990. 228 p.
- [2] Agafonov A.N., Saidanov V.O., Gud' V.N. *Kombinirovannye energoustanovki ob'ektov maloi energetiki* [Combined power plants of small power]. Sankt-Peterburg, SPbGPU publ., 2005. 262 p.
- [3] Ventsel' S.V. *Primenenie smazochnykh masel v dvigateliakh vnutrennego sgoraniia* [The use of lubricating oils for internal combustion engines]. Moscow, Khimiia publ., 1979. 238 p.
- [4] Kavtaradze R.Z. *Lokal'nyi teploobmen v porshnevnykh dvigateliakh* [The local heat transfer in piston engines]. Moscow, Bauman Press, 2001. 592 p.
- [5] Kostochkin V.V. *Nadezhnost' aviatsionnykh dvigatelei i silovykh ustanovok* [Reliability of aircraft engines and power units]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1988. 272 p.
- [6] *Inzhenernye osnovy aviatsionnoi khimmotologii* [Engineering bases aviation Chemmotology]. Ed. Ianovskii L.S. Kazan', KFU publ., 2005. 714 p.
- [7] *Goriuche-smazochnye materialy dlia aviatsionnykh dvigatelei* [Fuels and lubricants for aircraft engines]. Ed. Ianovskii L.S. Kazan', Master Lain publ., 2002. 400 p.
- [8] Kuz'min N.A., Zelentsov V.V., Krupa V.V. *Teplovoe sostoianie, iznashivanie i otlozheniia v DVS* [Thermal state, wear and deposits in the engine]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the TSU]. 2001, iss. 5, pp. 58–61.
- [9] Kuz'min N.A., Zelentsov V.V., Donato I.O. *Issledovanie otlozhenii v avtomobil'nykh dvigateliakh* [Research of Adjournalment in Automobile Engines]. *Trudy Nizhegorodskogo gos. tekhnich. un-ta im. R.E. Alekseeva* [Transactions of Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alekseev]. 2010, no. 2(81), pp. 156–165.
- [10] Lazarev E.A. *Povyshenie effektivnosti okhlazhdeniia dnishcha porshnia dizelia preobrazovaniem formy i kharaktera dvizheniia strui okhlazhdaiushchego masla* [Efficiency Upgrading of Cooling of a Piston Top of a Diesel Engine By Means of Shape Transformation And Movement Character of a Cooling Oil Jet]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriia: Mashinostroenie* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical engineering industry]. 2008, no. 23(123), pp. 60–63.
- [11] Somov V.A. *Smazka mashin i mekhanizmov. Osobennosti smazki detalei dizelei* [Grease and machinery. Features lubricating parts of diesel engines]. *Trenie, iznos, smazka* [Friction, wear, lubrication]. 2009, vol. 11, no. 1, pp. 17–25.
- [12] Bol'shakov G.F. *Fiziko-khimicheskie osnovy primeneniia topliv i masel: Teoreticheskie aspekty khimmotologii* [Physico-chemical basis for the use of fuels and oils: Theoretical aspects Chemmotology]. Novosibirsk, Nauka publ., 1987. 209 p.
- [13] Bunakov B.M., Pervushin A.N., Smirnov K.Iu. *Motornye avtomobil'nye masla. Sostoianie i puti povysheniia ikh kachestva* [Motor Car oils. Condition and ways of improving their quality]. *Avtomobil'naia promyshlennost'* [Automotive industry]. 2008, no. 10, pp. 28–30.
- [14] Grigor'ev M.A., Bunakov B.M., Doletskii V.A. *Kachestvo motornogo masla i nadezhnost' dvigatelei* [The quality of the engine oil and engine reliability]. Moscow, Standart publ., 1981. 232 p.
- [15] Gureev V.M., Druzhinin A.M., Gel'manov R.R. *Scale formation and life of internal combustion engines*. *Russian Engineering Research*, 2009, vol. 29, no. 1, pp. 26–28.

- [16] Nigmatullin R.G., Nigmatullin V.R., Nigmatullin I.R. *Diagnostika dvigatelia vnutrennego sgoraniia po analizu motornogo masla* [Diagnosis of an internal combustion engine to analyze engine oil]. Ufa, GUP RB «Ufimskii poligrafkombinat» publ., 2011. 297 p.
- [17] Altunin V.A., Shchigolev A.A., Iusupov A.A. Povyshenie nadezhnosti sistem smazki porshnevykh dvigatelei vnutrennego sgoraniia [Improving the reliability of the lubrication of the piston engine]. *Materialy dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiia dvigatelestroeniia»* [Proceedings of the International scientific and practical conference «Problems and prospects of the engine»]. Samara, 25–27 June 2014. SGAU im. akad. S.P. Koroleva publ., 2014, pt. 1, p. 157.
- [18] Altunin V.A., Ianovskaia M.L., Shchigolev A.A., Monda V.A., Demidenko V.P. *Sposob zapravki vozdushnykh ballonov zapuska dizel'nykh dvigatelei vozdukhom* [A method of filling air tanks air start diesel engines]. Patent RF, no. 2541022, 2015.
- [19] Altunin V.A., Ianovskaia M.L., Shchigolev A.A., Monda V.A., Demidenko V.P. *Pul't upravleniia i kontrolia za rabotoi s'emnoi rubashki okhlazhdeniia artilleriiskogo stvola* [Control and monitor the performance of removable cooling jacket artillery barrel]. Patent RF, no. 2541570, 2015.
- [20] Aliev I.N., Mil'vidskii A.R. Deformation of the surface of a conducting liquid under the action of a pulse of a strong field. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2004, vol. 77, no. 1, pp. 161–162.

Статья поступила в редакцию 31.08.2015

Информация об авторах

АЛТУНИН Виталий Алексеевич (Казань) — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения». КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, К. Маркса ул., д. 10, e-mail: fltspacevi@yahoo.com).

АЛТУНИН Константин Витальевич (Казань) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения». КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, К. Маркса ул., д. 10).

АЛИЕВ Исмаил Новрузович (Москва) — доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Техническая физика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

ЩИГОЛЕВ Александр Александрович (Казань) — соискатель ученой степени кандидат технических наук кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения». КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, К. Маркса ул., д. 10).

ПЛАТОНОВ Евгений Николаевич (Казань) — докторант кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения». КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, К. Маркса ул., д. 10).

Information about the authors

ALTUNIN Vitaly Alekseevich (Kazan) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Heat and Power Engineering. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: fltspacevi@yahoo.com).

ALTUNIN Konstantin Vitalievich (Kazan) — Candidate of Science, Associate Professor, Department of Heat and Power Engineering. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10).

ALIEV Ismail Novruzovich (Moscow) — Doctor of Science (Physics and Math), Professor, Department of Technical Physics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).

TSCHIGOLEV Aleksandr Aleksandrovich (Kazan) — Candidate of Science, Eng. (Pending Dissertation), Department of Heat and Power Engineering. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10).

PLATONOV Evgeny Nikolaevich (Kazan) — Doctoral Candidate, Department of Heat and Power Engineering. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10).