

Таким образом, разработан стенд и предложен комплекс современных средств измерения, позволяющий определить с высокой точностью составляющие теплового баланса судового дизеля во всем диапазоне его нагрузок, оценить влияние степени совершенства рабочего процесса и технического состояния ДВС и его систем на распределение тепловых потерь, разработать меры по их эффективной утилизации.

Список литературы

1. Бажан П. И. Зависимости для расчета механического КПД и составляющих теплового баланса в воду и масло для среднеоборотных дизелей / П. И. Бажан, В. Я. Аладышкин // Двигателестроение. — 1986. — № 3.
2. Кривов В. Г. Комплексное электроснабжение на базе дизельных электростанций с внешней утилизацией отходящей теплоты / В. Г. Кривов, С. А. Синатов, С. Д. Гулин // Двигателестроение. — 1989. — № 9.
3. Костин А. К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания: справ. пособие / А. К. Костин, В. В. Ларионов, Л. И. Михайлов. — Л., 1979. — 222 с.
4. Пахомов Ю. А. Основы научных исследований и испытаний тепловых двигателей / Ю. А. Пахомов. — М.: ТрансЛит, 2009. — 432 с.: ил.
5. Безюков О. К. Основы комплексного совершенствования охлаждения судовых дизелей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.08.05 / О. К. Безюков; СПГУВК. — СПб., 1996. — 48 с.
6. Жуков В. А. Автоматизация тепловых испытаний двигателей внутреннего сгорания / В. А. Жуков, Е. Н. Николаенко // Двигатели внутреннего сгорания. — Харьков: ХПИ, 2011. — № 2.
7. ГОСТ Р ИСО 3046-1-99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. — Ч. 1: Стандартные условия, объявленная мощность, расходы топлива и смазочного масла. Методы испытаний.
8. Безюков О. К. Средства для контроля теплового состояния деталей остова судовых дизелей / О. К. Безюков, А. А. Кардаков // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2009. — № 2.

УДК 621.892:621.436

Ю. Н. Цветков,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРНЫХ ДОБАВОК В СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ

INFLUENCE OF SUPERFINE ADDITIVES IN LUBRICANTS ON THE PERFORMANCE OF A DIESEL

Проведен анализ влияния ультрадисперсных добавок — порошков оловянистой бронзы и фуллереновой сажи в моторное масло и порошков дисульфида молибдена и полититанатов калия в твердое смазочное покрытие на юбках поршней — на характеристики работы дизеля. Все добавки практически не влияли на механический КПД, но порошки оловянистой бронзы и дисульфида молибдена приводили к повышению индикаторного КПД дизеля. Возможная причина положительного влияния добавок дисперсных частиц на индикаторный КПД — попадание частиц с маслом в камеру сгорания и их каталитическое действие на горение топлива.

The influence of superfine additives — powders of tin bronze and fullerene soot into motor oil and molybdenum disulfide and potassium titanate into the bonded film lubricant on piston skirts — on the diesel performance was investigated. All the additives investigated had no effect upon the mechanical efficiency of the diesel, but the addition of tin bronze powder to motor oil and molybdenum disulfide to the bonded film lubricant on the piston skirts results in the increase in indicated efficiency. The probable cause of positive influence of high-dispersed particles on the indicated efficiency is the ingress of the particles into the combustion chamber and their catalytic effect on the fuel burning.

Ключевые слова: дизель, моторное масло, фуллереновая сажа, ультрадисперсный порошок, оловянистая бронза, дисульфид молибдена, полититанаты калия, твердое смазочное покрытие, юбка поршня, износ, индикаторный КПД, механический КПД.

Key words: diesel, motor oil, fullerene soot, superfine powder, tin bronze, molybdenum disulfide, potassium titanate, bonded film lubricant, piston skirt, wear, indicated efficiency, mechanical efficiency.

Введение

Известно, что в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС) на преодоление трения безвозвратно теряется до четверти располагаемой энергии газов. При этом до 65 % всех механических потерь в ДВС приходится на трение между деталями цилиндропоршневой группы, прежде всего на долю сопряжений *поршневые кольца–зеркало цилиндра* и *тронк поршня–зеркало цилиндра*. Неслучайно в практике эксплуатации ДВС одним из главных направлений снижения механических потерь является применение антифрикционных и противоизносных добавок в виде высоко- и ультрадисперсных порошков различных неорганических веществ в смазочные материалы: моторное масло, твердые смазочные покрытия на тронках поршней и др.

Добавки дисперсных порошков мягких металлов в моторные масла, в отличие от традиционных присадок, которые изменяют в нужном направлении свойства только самого масла, оказывают влияние не на свойства масла, а на свойства поверхностей трения, смазываемых этим маслом. В ДВС и других смазываемых механизмах для улучшения триботехнических характеристик узлов трения, детали которых изготовлены из железоуглеродистых сплавов, широко применяются порошки меди и медных сплавов [1]. Предполагается, что частицы порошка будут формировать на поверхности тончайший слой мягкого металла или при «намазывании» частиц на поверхность, или за счет действия молекулярных сил, или в результате образования металлической связи [1]. Пленка мягкого металла, образовавшаяся на поверхности трения, создает условия для существования граничного слоя большей толщины [2, с. 176–187], то есть слоя толщиной не в одну, а в несколько молекул. Увеличение толщины граничного слоя смазочного материала приводит к существенному снижению адгезионной составляющей трения. Как показывают результаты исследований [3, с. 13–19], основная доля механических потерь (до 80 %) в ДВС приходится именно на граничный, а не на гидродинамический режим смазки, поэтому применение указанных дисперсных добавок в моторном масле представляется оправданным. Однако для того, чтобы частицы порошка, содержащиеся в моторном масле, начали формировать пленку на поверхностях трения необходимо обеспечить низкие значения нагрузок и скоростей скольжения, а также подавление доступа кислорода к зоне фрикционного контакта [4, р. 240–245]. Такие условия в практике эксплуатации ДВС в большинстве случаев не обеспечиваются. Вместе с тем, даже несмотря на отсутствие эффекта металлоплакирования, добавки ультрадисперсных порошков медных сплавов в моторное масло часто приводят к повышению эффективного КПД двигателей и, как следствие, к снижению расхода топлива. Но каким образом достигается в этом случае положительный эффект, неясно.

В твердые смазочные покрытия (ТСП), которые, как известно, состоят из связующего и высокодисперсного наполнителя, в качестве последнего вводятся порошки твердых смазочных материалов — чаще всего дисульфида молибдена (MoS_2) или графита. Распространенными связующими являются полимеры на основе фенолформальдегидной или эпоксидной смолы, напри-

мер клеи БФ-2, БФ-4. ТСП получают после отверждения в результате термической обработки суспензии (полимерного связующего с дисперсным наполнителем), которую наносят на поверхность трения деталей, в том числе и на юбки (тронки) поршней ДВС. Служат такие покрытия в основном в качестве приработочных. И хотя термин «приработочные» является условным, многие ТСП сохраняются на поверхностях трения долгое время, значительно превышающее продолжительность приработки, им подчеркивается, что ТСП предназначены для защиты поверхностей трения в тяжелых условиях работы, характеризующихся недостатком смазочного материала, который может ощущаться на некоторой площади поверхностей в период приработки, то есть неприработанных. Что касается антифрикционного действия подобных покрытий в ДВС, то здесь также много «белых пятен». Как показывают эксперименты на машинах трения, сочетание в трибосопряжениях силумина и серого чугуна — распространенных материалов для изготовления поршней и втулок цилиндров соответственно — характеризуется при смазывании моторным маслом очень низким коэффициентом трения при работе в условиях граничной смазки. Величина коэффициента трения может опускаться до 0,005–0,006, и достижение еще более низких значений дополнительными технологическими мероприятиями проблематично, а поэтому применение ТСП на материалах такого трибосопряжения приводит, как правило, не к снижению, а к увеличению коэффициента трения. Тем не менее применение ТСП, содержащих дисульфид молибдена, на тронках поршней во многих случаях приводит к снижению расхода топлива, а почему — также непонятно.

Таким образом, целью представленной работы является анализ влияния высокодисперсных добавок в смазочные материалы на эффективность работы дизеля.

Методика проведения экспериментов

Испытания проводили на двухцилиндровом дизеле воздушного охлаждения 2Ч10,5/12. Номинальные мощность и частота вращения коленчатого вала дизеля равны 22,1 кВт и 2000 об/мин соответственно. Поршни были изготовлены из алюминиевого сплава АК12М2МгН. Во всех испытаниях в качестве моторного масла использовали минеральное масло *Лукойл Супер Дизель SAE 15W-40 API CF-4/SG*.

Провели пять серий экспериментов.

- 1) с добавками ультрадисперсного порошка оловянистой бронзы в моторное масло;
- 2) с добавками фуллереновой сажи в моторное масло;
- 3) с ТСП, нанесенным на тронки поршней, состоящим из связующего (клея БФ-2) и высокодисперсного порошка дисульфида молибдена;
- 4) с ТСП, нанесенным на поршни, состоящим из одного связующего — клея БФ-2 (без добавок антифрикционных наполнителей);
- 5) с ТСП, нанесенным на поршни, состоящим из связующего (клея БФ-2) и высокодисперсного порошка полититанатов калия.

Основной объем экспериментов проводили с высокодисперсными порошками оловянистой бронзы и дисульфида молибдена (соответственно серии 1 и 3, см. выше). Порошки оловянистой бронзы и дисульфида молибдена были выбраны по той причине, что эти материалы относятся к одним из самых распространенных, применяемых в качестве добавок соответственно в моторное масло и ТСП.

Эксперименты серий 2, 4 и 5 проводили в качестве дополнительных для анализа результатов, полученных в сериях 1 и 3. Фуллереновая сажа и полититанаты калия были выбраны для экспериментов в сериях 2 и 5 на том основании, что фуллерены [5, с. 3253–3255] и полититанаты калия [6] являются сравнительно новыми материалами и вследствие своих уникальных и еще не до конца изученных свойств могут оказаться перспективными при использовании в триботехнических материалах.

Каждая серия экспериментов состояла из двух стадий. На первой стадии в случае проверки влияния дисперсных добавок в масло испытывали дизель с моторным маслом без добавок, а на

второй — с моторным маслом, в которое добавляли определенное количество дисперсного порошка. Соответственно при испытаниях ТСП на первой стадии испытанию подлежал дизель с поршнями без покрытий, а на второй — с теми же поршнями, но на тронки которых было нанесено покрытие с соответствующим дисперсным наполнителем.

Ультрадисперсный порошок оловянистой бронзы для добавок в моторное масло был получен методом плазменной перекомденсации и содержал помимо олова (около 5 %) примерно 9 % кислорода в составе различных оксидов. Требуемое количество порошка диспергировали предварительно в небольшом количестве масла И-20А с добавкой поверхностно-активных веществ, а уже полученную суспензию добавляли к основному объему масла в картере дизеля.

Фуллереновая сажа была получена методом Хаффмана–Кречмера и содержала около 10 % фуллеренов, из которых примерно 65 % составлял фуллерен C_{60} , 32–33 % — фуллерен C_{70} и 2–3 % — высшие фуллерены. Сажу также предварительно замешивали в небольшом количестве масла с помощью ультразвукового диспергатора и полученную суспензию добавляли потом к основному объему масла в картере дизеля.

Частицы порошка MoS_2 имели средний размер около 1,5 мкм. Частицы полититанатов калия имели вид чешуек; средний размер агломератов частиц составлял 3–5 мкм.

Технология нанесения ТСП описана в работе [7, с. 13–18]. Средняя толщина покрытия составляла 10 мкм.

Для испытаний брали приработанные цилиндры и поршневые кольца. В процессе испытаний проводили измерения расхода топлива, регистрировали индикаторные диаграммы дизеля и температуры стенок цилиндров и выхлопных газов. Во время испытаний поддерживали постоянными: частоту вращения коленчатого вала дизеля (1600 ± 15 об/мин), температуру масла в картере (90 ± 2 °С), воздуха, обдувающего цилиндры (30 ± 2 °С) и воздуха, подаваемого в двигатель (30 ± 2 °С). Индикаторный и механический КПД рассчитывали методом сопоставления индикаторной и эффективной мощности дизеля. Дополнительно для оценки механических потерь и давления в конце цикла сжатия проводили испытания методом проворачивания коленчатого вала с помощью электродвигателя, перекрыв подачу топлива в дизель.

Результаты испытаний высокодисперсных добавок в моторное масло

Добавка нескольких десятых процента ультрадисперсного бронзового порошка в масло приводит на большинстве режимов к снижению удельного эффективного расхода топлива на 4–6 %. Снижение температуры отработанных газов при этом колеблется от 15 °С на 25-процентной мощности до 29 °С на нагрузке 60 %. Намного более существенный положительный эффект — снижение расхода топлива составило 15 % — был зарегистрирован на 75-процентной нагрузке, при этом содержание монооксида углерода в газах в масле снизилось в 3 раза (при добавке 0,225 % порошка бронзы).

Анализ причин изменения эффективного КПД показал, что его увеличение произошло не за счет увеличения механического КПД (его значение практически не изменилось (рис. 1, а)), а за счет увеличения индикаторного КПД (рис. 1, б). Малая чувствительность механического КПД к содержанию УДП в масле подтверждается и результатами измерения механических потерь методом проворачивания коленчатого вала дизеля от электродвигателя.

Добавка же фуллереновой сажи в моторное масло не оказала на КПД дизеля никакого влияния (рис. 2). Изменения как механического, так и индикаторного КПД, при варьировании концентрации сажи в масле и мощности дизеля были очень незначительными, и в этих изменениях трудно заметить какую-либо устойчивую тенденцию.

Результаты испытаний ТСП на тронках поршней

Обработка результатов испытаний поршней, покрытых ТСП, содержащим дисульфид молибдена, показала заметное снижение удельного расхода топлива. Причем экономия топлива тем больше, чем ближе режим работы к номинальному, например на доле мощности, равной 75 %,

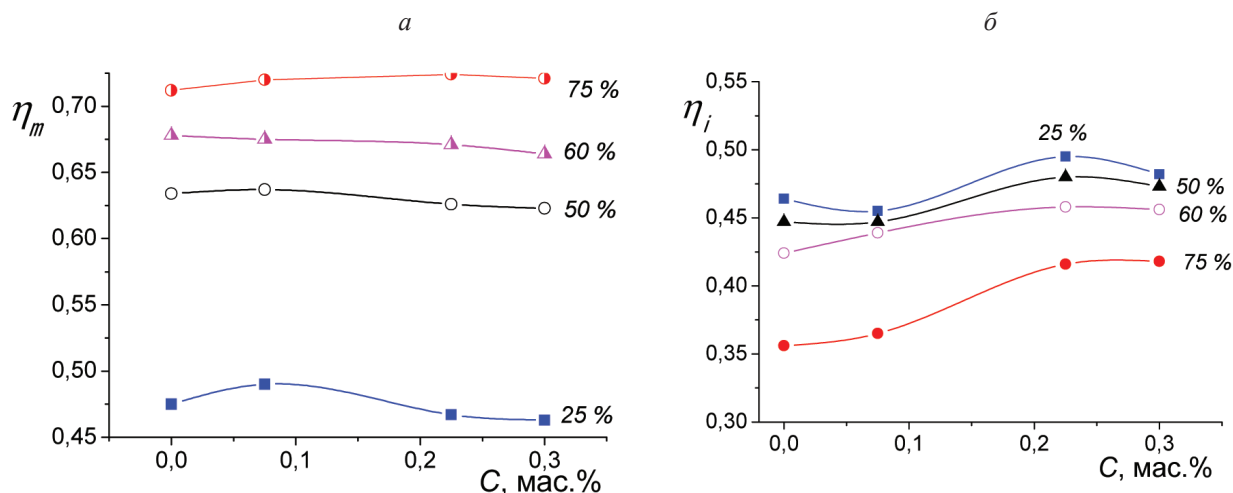


Рис. 1. Изменение механического (а) и индикаторного (б) КПД с изменением концентрации бронзового порошка в моторном масле. Числа на поле рисунка — значения долевой мощности

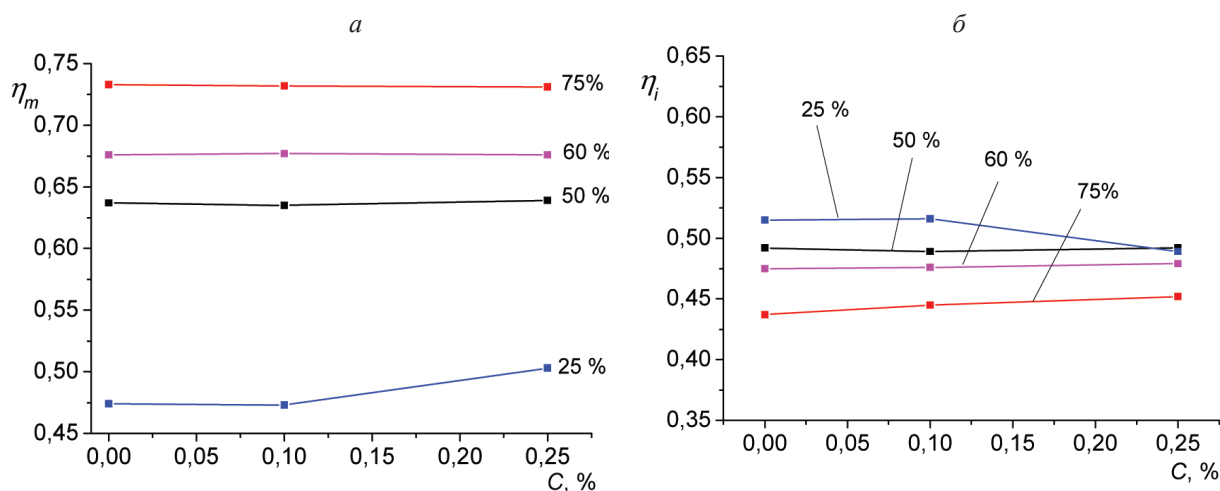


Рис. 2. Зависимость механического (а) и индикаторного (б) КПД дизеля от концентрации фуллереновой сажи в моторном масле при разных значениях долевой мощности

снижение удельного расхода топлива составило более 5 % [7]. Снижение удельного расхода топлива после нанесения на поршни ТСП с MoS_2 привело к существенному снижению температур как стенок цилиндров в районах максимальной скорости движения поршня (при работе на долевой мощности, близкой к номинальному значению, более чем на 20 °С) так и выхлопных газов.

Как видно из рис. 3, так же как и в случае добавок ультрадисперсного порошка оловянистой бронзы в моторное масло (см. рис. 1), снижение удельного расхода топлива при испытании поршней с ТСП, содержащим MoS_2 , произошло исключительно из-за увеличения индикаторного КПД, механический же КПД практически не изменился. Такой результат нельзя назвать случайным: оценка механических потерь в дизеле методом проворачивания коленчатого вала дизеля с помощью электродвигателя показала, что механические потери после нанесения на поршни ТСП, содержащего MoS_2 , даже увеличились примерно на 5 %. И хотя результаты, получаемые в режиме проворачивания коленчатого вала от постороннего источника энергии, нельзя без существенных поправок переносить на рабочие условия, тем не менее они указывают на то, что нанесение ТСП, содержащих дисульфид молибдена, не всегда приводит к снижению трения в условиях смазки.

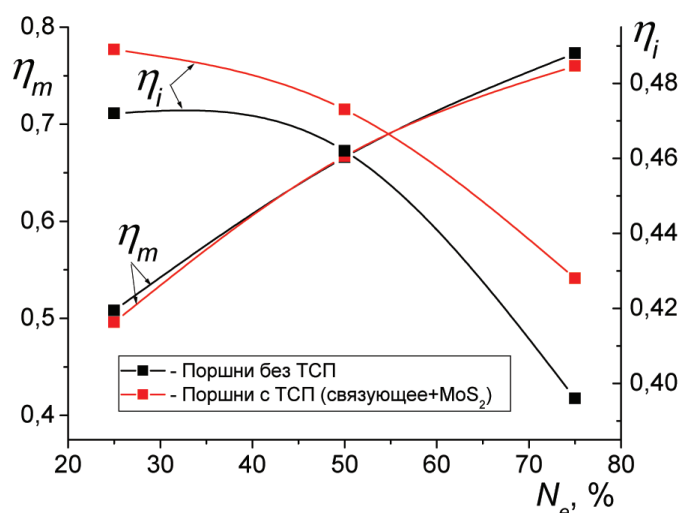


Рис. 3. Влияние ТСП, содержащего MoS_2 , на зависимость индикаторного и механического КПД от долевого мощностного фактора

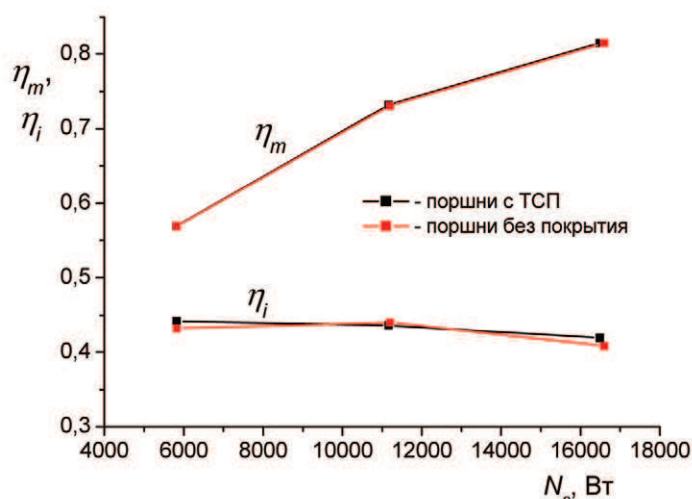


Рис. 4. Влияние твердого смазочного покрытия, содержащего полититанаты калия, нанесенного на поршни дизеля, на механический (η_m) и индикаторный (η_i) КПД дизеля

Затем были проведены эксперименты с поршнями, на юбки которых было нанесено покрытие из одного связующего, то есть без добавок MoS_2 . В этом случае никакого изменения (ни индикаторного, ни механического КПД) зарегистрировано не было. То есть причину в повышении индикаторного КПД в случае использования на поршнях ТСП с дисульфидом молибдена нельзя объяснить действием полимерного связующего, например теплоизолирующим или каким-либо иным; на величину индикаторного КПД оказал влияние именно присутствующий в покрытии дисульфид молибдена.

Однако не все высокодисперсные добавки в твердые смазочные покрытия оказывают влияние на КПД дизеля. Из рис. 4 видно, что замена порошка дисульфида молибдена в ТСП на порошок полититанатов калия не повлекла за собой каких-либо изменений в КПД дизеля.

Анализ причин влияния добавок УДП на индикаторный КПД дизеля

Значение индикаторного КПД зависит от множества факторов. Отличительная особенность применения дисперсных порошков неорганических веществ в качестве добавок в моторное масло и в ТСП, наносимые на поршни ДВС, в том, что они могут оказывать влияние не только на трибологические характеристики пар трения цилиндропоршневой группы, но и на рабочие процессы в двигателе,

так как малое их количество с моторным маслом обязательно попадает в камеру сгорания двигателя. Однако в научной литературе обращается внимание прежде всего на влияние таких добавок на механические потери в двигателе, тогда как информация об их влиянии на индикаторный КПД отсутствует.

Добавки бронзового ультрадисперсного порошка в моторное масло оказывают, вероятно, влияние на полноту сгорания топлива. Известно, что медь является катализатором горения и снижает энергию активации реакций окисления, происходящих в камере сгорания ДВС [8, с. 23–24]. Попадая в камеру сгорания с моторным маслом, частицы бронзы могут оказывать каталитическое действие. Этими же причинами вызвано, по всей видимости, и увеличение индикаторного КПД после нанесения на юбки поршней ТСП, содержащего MoS_2 : частицы дисульфида молибдена из ТСП попадают при трении в масло, и с маслом — в камеру сгорания дизеля, где они оказывают ка-

талитическое действие на процесс горения топлива. Последнее предположение требует дальнейшей экспериментальной проверки, так как автору не известны упоминания в научной литературе о подобном каталитическом действии дисульфида молибдена.

Высказанные выше предположения могут оказаться актуальными также при обработке деталей дизелей широко применяемыми в настоящее время геомодификаторами трения [9, с. 71–81], так как различные оксиды, содержащиеся в модификаторах или образующиеся в процессе обработки ими поверхностей трения, могут оказывать каталитическое действие [10] при их попадании с обработанных поверхностей в масло, а затем в камеру сгорания ДВС.

Выводы

Добавки неорганического происхождения, вводимые в виде ультрадисперсных порошков в моторное масло или твердые смазочные покрытия, наносимые на поршни ДВС, попадают вместе с моторным маслом в камеру сгорания двигателя и могут оказывать влияние на индикаторный КПД двигателя.

При выборе антифрикционных и противоизносных добавок неорганического происхождения, вводимых в моторное масло и твердые смазочные покрытия на поршнях, предпочтение следует отдавать добавкам, оказывающим каталитическое действие на процесс горения топлива.

Список литературы

1. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения / Д. Н. Гаркунов [и др.]. — М.: Машиностроение, 1982. — 207 с.
2. Фукс Г. И. Полимолекулярная составляющая граничного смазочного слоя / Г. И. Фукс // Исследования в области поверхностных сил: сб. докл.: II конф. по поверхностным силам, апрель 1960 г. — М.: Наука, 1964.
3. Цветков Ю. Н. Соотношение потерь на трение, приходящихся на граничный и гидродинамический режимы смазки в двигателях внутреннего сгорания / Ю. Н. Цветков, Д. А. Крылов, А. А. Татулян // Двигателестроение. — 2010. — № 1.
4. Kuranov V. Unity and contrast of normal oxidizing friction and selective transfer / V. Kuranov, A. Vinogradov, S. Mironov // Zagadnienia eksploatacji maszyn. — 1998. — Zeszyt 2 (114). (Polska).
5. Sublimed C₆₀ films for tribology / B. Bhushan [et al.] // Applied Physics Letters. — 1993. — Vol. 62, № 25.
6. Полититанаты калия с волокнистой и чешуйчатой структурой. Синтез и применение / А. В. Гороховский [и др.] [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: <http://www.ntsrf.info/upload/My/politkal2.pdf> (дата обращения: 26.04.2014).
7. Цветков Ю. Н. Влияние дисульфида молибдена в твердом смазочном покрытии, нанесенном на юбки поршней, на эффективные показатели дизеля / Ю. Н. Цветков, А. А. Сабуров, А. А. Татулян // Двигателестроение. — 2012. — № 2 (248).
8. Катализаторы горения для бензинов и дизельных топлив / Д. В. Сердюк [и др.] // Автомобильная промышленность. — 2001. — № 5.
9. Погодаев Л. И. К механизму взаимодействия природных слоистых гидросиликатов с поверхностями трения / Л. И. Погодаев, И. А. Буяновский, Е. Ю. Крюков [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2009. — № 5.
10. Jones R. L. Catalytic Combustion in Internal Combustion Engines: A Possible Explanation for the Woschni Effect in Thermally-Insulated Diesel Engines / R. L. Jones; Naval Research Laboratory. Report Number NRL/MR/6170/96-7897. — Washington, 1996. — 26 p.