

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ МАСЛОСНАБЖЕНИЯ ЦПГ МАЛОРАЗМЕРНОГО ЧЕТЫРЕХТАКТНОГО ДИЗЕЛЯ

SOME RESULTS OF EXPERIMENTAL MODELING CYLINDER AND PISTON GROUP OIL SUPPLY CONDITIONS OF THE LOW-SIZED FOUR-CYCLE DIESEL ENGINE

С.В. ПУТИНЦЕВ, д.т.н.
А.Ф. БИКТАШЕВ
С.С. ПИЛАЦКАЯ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия,
putintsev50@yandex.ru

S.V. PUTINTSEV, Dsc in Engineering
A.F. BIKTASHEV
S.S. PILATSKAYA

Bauman Moscow State Technical University, Moscow,
Russian Federation, putintsev50@yandex.ru

В статье представлены и обсуждены экспериментальные результаты прямой визуализации процессов масло-снабжения трущихся поверхностей цилиндра-поршневой группы (ЦПГ) быстроходного четырехтактного дизеля. Актуальность работы связана с недостаточной изученностью условий смазки, в частности, дефицитом экспериментальных сведений о процессе маслоснабжения деталей ЦПГ четырехтактных двигателей с традиционным кривошипно-шатунным механизмом (КШМ). Цель исследования состояла в выявлении реально существующего механизма процессов подачи масла на трущиеся поверхности сопряжения «цилиндр – поршень» четырехтактного двигателя внутреннего сгорания. Исследование было выполнено методом экспериментального моделирования работы системы смазки на специальной макетной установке с автономным приводом масляного насоса и оптически прозрачными цилиндром и поршнем. В работе ставились и решались задачи: наблюдения процесса истечения масла из зазоров шатунного подшипника в квазистатическом и динамическом режимах работы макетной установки; выявления условий и механизма попадания смазочного материала на трущиеся поверхности поршня и цилиндра; сопоставления характера маслоснабжения нагруженной и ненагруженной сторон стенки цилиндра. Обработка результатов исследования позволила уточнить имеющиеся представления о механизме попадания смазочного материала в сопряжение «цилиндр – поршень», а также идентифицировать новую функцию поршня, заключающуюся в переносе разбрызгиваемого шатунным подшипником моторного масла на трущиеся поверхности поршня и цилиндра. В ходе экспериментов была подтверждена ранее высказанная гипотеза о существовании аномалии количества смазочного материала, поступающего на нагруженную и ненагруженную стороны стенки цилиндра. Представленная экспериментальная информация может быть использована для доводки и модернизации любых систем смазки комбинированного типа, обслуживающих четырехтактные поршневые двигатели с традиционными КШМ.

Ключевые слова: цилиндр, поршень, шатунный подшипник, моторное масло, маслоснабжение, макетная установка.

Experimental results on direct visualization of cylinder and piston group (CPG) interacting surfaces oil supply in a high-speed four-cycle engine are presented and discussed in the article. The relevance of this work is connected with an insufficient examination of lubrication processes, in particular, deficiency of experimental data concerning to four-cycle engine with traditional crank-and-rod mechanism (CRM) CPG oil supply. The purpose of the research was experimental supervision of processes of oil delivery to interacting surfaces of coupling «cylinder-piston» in a four-cycle internal combustion engine. Attainment of the assigned purpose has been carried out by means of experimental modeling lubricating system operation with the special breadboard setup supplied an independent drive of the oil pump and optical transparent cylinder and piston. The received results have allowed to specify the CPG oil supply behavior, and also to identify the new function of the piston consisting in transfer of disintegrating oil stream onto the interacting surfaces of the piston and cylinder. During experiments earlier stated hypothesis about existence of anomaly of quantity of the lubricant arriving on the thrust and anti-thrust side of the cylinder has been confirmed. The presented experimental information can be used for operational development and modernization of any combined type lubricating systems serving four-cycle piston engine with traditional CRM.

Keywords: cylinder, piston, conrod bearing, motor oil, oil supply, breadboard setup.

Введение

Принято считать, что подача смазочного материала в основные трущиеся сопряжения ЦПГ поршневых двигателей с традиционным КШМ осуществляется путем разбрызгивания масла из зазоров вращающегося шатунного подшипника в результате совместного действия давления масла и центробежных сил инерции [1–4]. Кроме того, дополнительным (а часто и основным) механизмом маслоснабжения ЦПГ полагают конденсацию капель масла из так называемого масляного тумана, возникающего вследствие интенсивной аэрации картерного масла погружающимися в него вращающимися противовесами коленчатого вала [5, 6]. Известны схемы смазки деталей ЦПГ, использующие принцип струйной подачи масла из специально выполненных в стержне шатуна маслоподающих отверстий [7].

Отдельно наблюдаемые в ходе визуальной экспертизы (при разборке ЦПГ по причине отказа) случаи дефицита и даже отсутствия следов моторного масла на трущихся поверхностях сопряжения «цилиндр – юбка поршня» [8], соотносящиеся с обнаруживаемыми в ходе заводских моторных испытаний натиров и задиров поршней быстроходных дизелей, вынуждают проверить и уточнить целый ряд традиционных представлений об условиях маслоснабжения указанной группы деталей.

Поскольку работа системы смазки (за исключением влияния на ее показатели вязкости моторного масла) не зависит от рабочего процесса поршневого двигателя, исследование процесса смазки вообще и струйной маслоподдачи в частности вполне допустимо и, главное, удобно осуществлять в режиме прокрутки коленчатого вала без сжатия и сгорания в цилиндре, т.е. в условиях экспериментального моделирования.

Макетная установка, особенность которой состоит в автономном (независимом от коленчатого вала) приводе масляного насоса, а также применении оптически прозрачных материалов для поршня и цилиндра [9, 10], была использована при выполнении данного исследования.

Цель и задачи исследования

Цель исследования состояла в выявлении реально существующего механизма процессов подачи масла на трущиеся поверхности сопряжения «цилиндр – поршень» четырехтактного двигателя внутреннего сгорания.

Для достижения поставленной цели ставились и решались следующие задачи.

1. Наблюдение процесса истечения масла из зазоров шатунного подшипника в квазистатическом и динамическом режимах работы макетной установки.

2. Выявление условий и механизма попадания смазочного материала на трущуюся поверхность цилиндра.

3. Сопоставление характера маслоснабжения нагруженной и ненагруженной сторон стенки цилиндра.

Объект, средство, метод и условия проведения исследования

Объект моделирования – серийно выпускаемый дизель универсального назначения 1Ч 8,5/8,0 (ТМЗ-450Д) с воздушным охлаждением, имеющий отдельно установленный на блоке с помощью анкерных шпилек оребренный несущий цилиндр.

Система смазки данного двигателя – комбинированная: часть трущихся поверхностей смазывается под давлением масла, часть – самотеком – разбрызгиванием (рис. 1). При проведении всех экспериментов маслоподающее отверстие в кривошипной головке шатуна (на рис. 1, поз. 11) было герметично заглушено. Это было обусловлено необходимостью временного исключения влияния всех иных, кроме вращающегося кривошипа, источников подачи масла в зону ЦПГ, что полностью соответствовало условиям смазки ЦПГ с традиционным КШМ.

Средством моделирования выступила вышеупомянутая макетная установка на базе дизеля – объекта моделирования.

Метод исследования – прямая визуализация (наблюдение, фото- и видеорегистрация) процессов истечения моторного масла из зазоров подшипников коленчатого вала и специальных маслоподающих отверстий в шатуне (при их наличии), а также поступления масла на трущиеся поверхности деталей ЦПГ.

Условия проведения экспериментов на макетной установке: 1) квазистатический режим (автономная прокрутка электродвигателем шестеренчатого масляного насоса при неподвижном, а также медленно – не более 10 оборотов в минуту – проворачиваемом от руки или электродвигателя коленчатом валу); 2) динамический режим (автономная прокрутка электродвигателями масляного насоса и коленчатого вала, приводящего в движение пор-

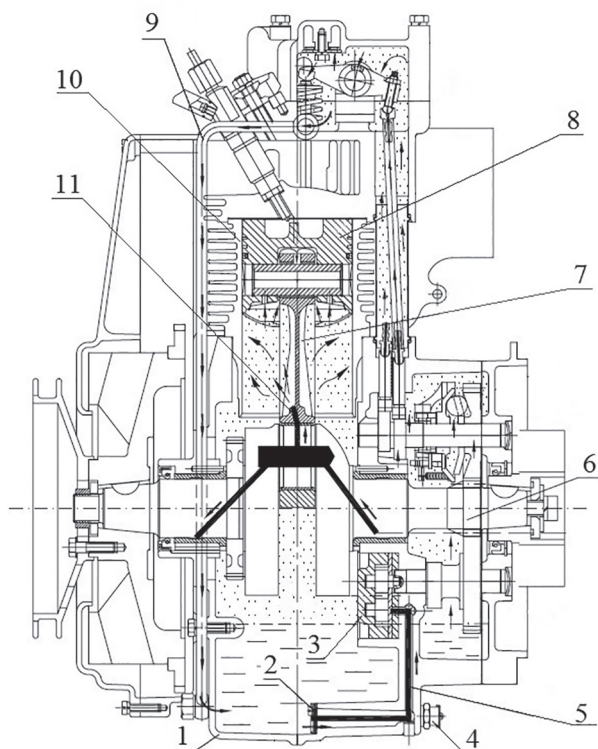


Рис. 1. Схема системы смазки дизеля – объекта исследования:

1 – картер дизеля; 2 – маслозаборник с сетчатым фильтром; 3 – масляный насос; 4 – датчик температуры масла; 5 – сверление в картере для подвода масла к насосу; 6 – коленчатый вал; 7 – шатун; 8 – поршень; 9 – сливной трубопровод; 10 – цилиндр; 11 – маслоподающее отверстие в кривошипной головке шатуна

шень в цилиндре). Диапазон давлений масла, определяемый частотой вращений приводного вала масляного насоса: от 0,2 до 0,6 МПа (срабатывание редукционного клапана).

Разбавление моторного масла дизельным топливом в специально подобранном соотношении легко позволяло без специального нагрева снизить вязкость смазочного материала до уровня, существующего в реальных условиях эксплуатации на любом интересующем режиме работы двигателя под нагрузкой.

Для наблюдения процесса формирования струй на нижней, наиболее труднодоступной, полуповерхности шатунного подшипника использовали технический эндоскоп с подсветкой, видеокамера которого закреплялась на пластически деформируемой штанге и вводилась в зону наблюдения либо через технологическое отверстие в боковой стенке картера, либо сверху через открытое посадочное отверстие цилиндра. Визуальный мониторинг и фотовидеосъемка струеобразования на верх-

ней полуповерхности шатунного подшипника велись непосредственно через цилиндрическое отверстие в картере.

Контрольные показатели:

в количественном выражении:

- фаза (угловая) существования струи масла;
 - частота вращения приводного вала масляного насоса;
 - частота вращения коленчатого вала;
 - давление масла в главной масляной магистрали;
 - температура масла в картере;
 - уровень масла в картере (по масломерному щупу и по прозрачной масломерной трубке);
- в качественном выражении:*
- зона возникновения, траектория и адресация струи масла;

- характер маслоснабжения внутренней поверхности цилиндра (отсутствие, наличие; равномерность распределения слоя масла по окружности цилиндра).

Результаты экспериментов и их обсуждение

1. Истечение струй масла из зазоров шатунного подшипника.

Опыты показали, что при наличии рабочего давления масла в пределах указанного выше диапазона наблюдается разбрызгивание струй масла из зазоров неподвижного шатунного подшипника. При этом имеет место зависимость как формы, так и интенсивности истечения масла от расположения (перекоса) шатуна относительно шейки коленчатого вала в плоскости оси последнего, а именно: увеличивающийся при перекосе шатуна торцовый зазор обуславливает нарастание бокового стока масла; сторона истечения располагается противоположно направлению перекоса (рис. 2). В данном эксперименте перекос шатуна осуществляли вручную путем приложения усилия к верхней головке шатуна в плоскости коленчатого вала.

Визуальные наблюдения процесса истечения масла из торцовых зазоров нижней полуповерхности шатунного подшипника показали, что в квазистатическом режиме работы установки моторное масло струей вытекает из обоих (левого и правого) торцовых зазоров поочередно. Первую половину такта – впуск (рабочий ход), когда поршень идет от ВМТ к НМТ, струя вытекает из правого торцового зазора, ориентированного к противоположной маховику стороне коленчатого вала, соответственно с

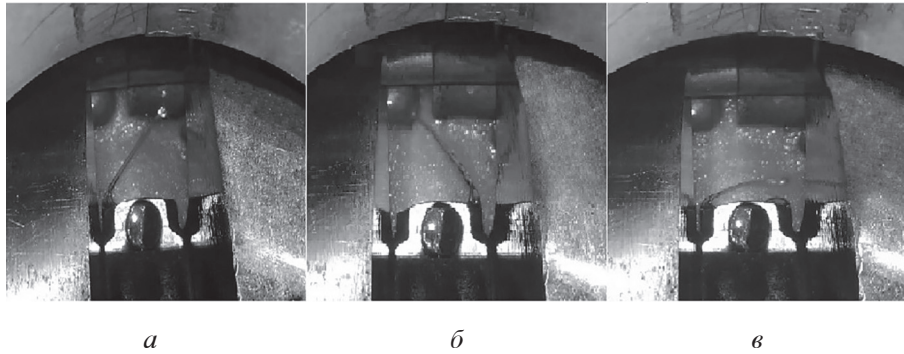


Рис. 2. Высокая (а, б) и низкая (в) интенсивность струи, истекающей из зазоров неподвижного шатунного подшипника (верхняя полуповерхность) при различных направлениях и величине перекоса шатуна относительно оси шатунной шейки: масляный насос работает, масло в главной масляной магистрали находится под давлением 0,5 МПа

постепенным усилением и после – ослаблением интенсивности. На второй половине этого такта происходит переход истечения струи на противоположную сторону шатунной шейки (правый торцовый зазор). Первую половину такта – выпуск (сжатие), когда поршень идет от НМТ к ВМТ, струя, наоборот, вытекает сначала из левого торцового зазора, расположенного ближе к маховику, обнаруживая аналогичный описанному выше характер изменения интенсивности. На второй половине хода ситуация с локализацией истечения снова «меняет знак». Таким образом, каждую половину хода поршня происходит циклическая смена локализации зоны истечения струи масла с одного торца шатунного подшипника на другой.

2. Механизм попадания масла в зазор сопряжения «цилиндр – поршень».

Условия проведения опытов – специальный динамический режим работы установки, при котором поршень в цилиндре отсутствует, а осевое возвратно-поступательное движение верхней головки шатуна обеспечивает поршневой палец из политетрафторэтилена, установленный в прозрачном цилиндре без зазоров по торцам.

В ходе экспериментов, выполненных при вращении коленчатого вала, но при отсутствии поршня в цилиндре, т.е. при действии не только давления, но и центробежных сил инерции на струю масла, установлено, что в отличие от квазистатического режима струйное истечение масла из торцовых зазоров переходит в более интенсивную форму – разбрызгивание, которого, однако, оказывается недостаточно для попадания смазочного материала на внутреннюю поверхность цилиндра:

стенки последнего внутри оставались сухими на всем скоростном диапазоне испытаний, допускаемом условиями обеспечения надежности работы макетной установки (до 600 мин⁻¹); после установки поршня в цилиндр ситуация с маслообеспечением ЦПГ коренным образом меняется: при тех же самых условиях испытаний масло с каждым ходом поршня от НМТ к ВМТ поступает на внутреннюю поверхность стенки цилиндра (рис. 3).

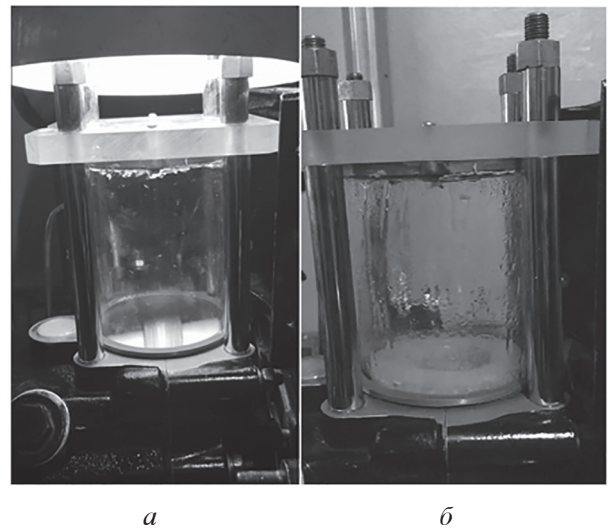


Рис. 3. Маслоснабжение внутренней поверхности стенок цилиндра макетной установки в динамическом режиме испытаний при отсутствии (а) и наличии (б) поршня в цилиндре

Результаты этих, многократно воспроизведенных, опытов позволили выявить и идентифицировать ранее не упоминавшуюся в литературе функцию поршня как своеобразного, циклически работающего транспортера смазочного материала от шатунной шейки к стенкам ци-

линдра. Тщательные визуальные наблюдения показали, что указанная функция поршня, которую можно назвать транспортной, состоит в том, чтобы за счет действия сил адгезии и инерции доставлять порции моторного масла, попадающего в результате разбрызгивания из торцовых зазоров вращающегося шатунного подшипника на нижнюю кромку юбки приходящего в НМТ поршня, на трущуюся поверхность цилиндра.

Для ответа на вопрос: могло ли масло попасть на стенки цилиндра в результате заброса вращающимися противовесами, предположительно зачерпывающими масло из картера при прохождении поршнем ВМТ, был поставлен

специальный эксперимент, заключающийся в определении минимального уровня масла в картере, возникающего в режиме работы масляного насоса, когда масло заполняет все полости и каналы системы смазки.

Измерения, выполненные с помощью прозрачной трубки уровня масла, показали, что последний в режиме работы масляного насоса располагается гарантированно (не менее чем на 25 мм) ниже орбиты наиболее удаленной от оси коленчатого вала точки поверхности противовесов, что полностью исключает их контакт с моторным маслом в картере, а следовательно, и заброс масла на цилиндр при вращении коленчатого вала (рис. 4).

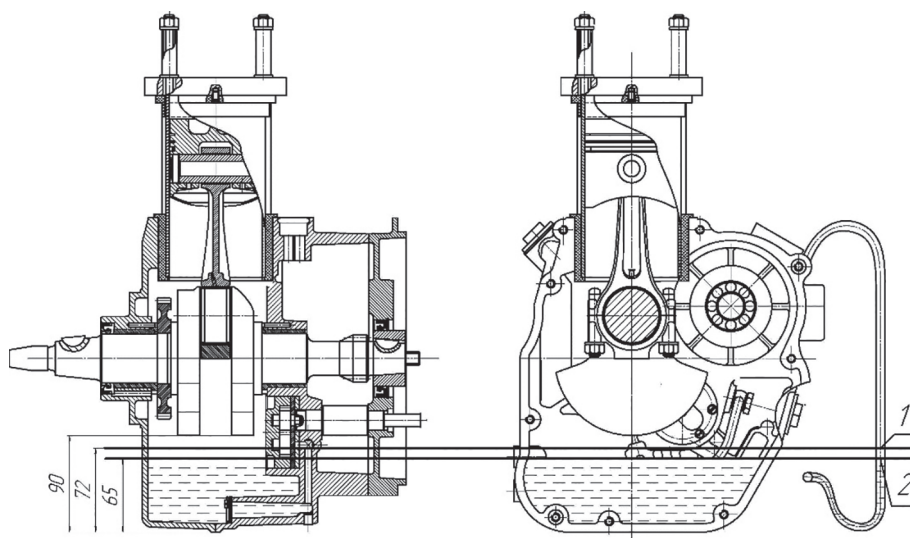


Рис. 4. Относительное расположение противовесов и уровней моторного масла в картере при неработающем (1) и работающем (2) масляном насосе

3. Маслоснабжение нагруженной и ненагруженной сторон стенки цилиндра.

Анализ результатов визуального наблюдения, а также фото- и видеорегистрации состояния внутренних смазываемых поверхностей прозрачного цилиндра с поршнем в динамическом режиме испытаний однозначно указали на различную интенсивность маслоснабжения так называемых нагруженной (ориентированной против направления вращения кривошипа коленчатого вала) и ненагруженной действием максимальной боковой силы поршня сторон (полуповерхностей) стенки цилиндра. Это различие состояло в меньшем количестве моторного масла на нагруженной стороне по сравнению с ненагруженной стороной (рис. 5), что вполне объяснимо, если учесть ориентацию этих сторон по отношению к направлению

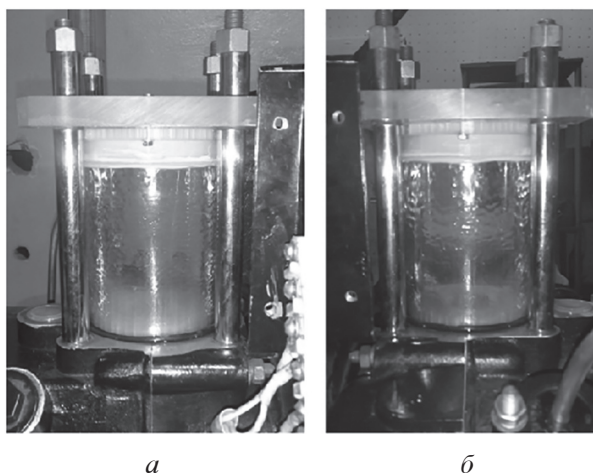


Рис. 5. Сравнение характера маслоснабжения нагруженной (а) и ненагруженной (б) сторон стенки цилиндра в динамическом режиме работы макетной установки

вращения кривошипа коленчатого вала и принять инерционный заброс моторного масла из зазоров вращающегося шатунного подшипника с последующей реализацией транспортной функции поршня в качестве основного механизма маслоснабжения сопряжения «цилиндр – поршень».

Описанный выше характер распределения смазочного материала по окружности цилиндра свидетельствует об определенной аномалии маслоснабжения, состоящей в том, что нагруженная боковой силой поршня сторона цилиндра, которая наиболее подвергается трению и изнашиванию, получает меньшее количество смазки, чем сторона ненагруженная. Полученная в результате макетного моделирования информация о процессе маслоснабжения цилиндра согласовывались с выводами экспериментального исследования [11] и гипотезой, изложенной в ранее опубликованной работе [12].

Заключение

В ходе моделирования работы комбинированной системы смазки четырехтактного быстроходного малоразмерного дизеля с традиционным КШМ осуществлено прямое наблюдение механизма маслоснабжения ЦПГ; идентифицирована смазочная (транспортная) функция поршня, заключающаяся в переносе моторного масла, попадающего на нижнюю кромку юбки поршня в результате разбрызгивания из зазоров вращающегося шатунного подшипника на внутреннюю поверхность стенки цилиндра. Дополнительно подтверждена ранее выдвинутая гипотеза о неравномерности распределения масла по окружности цилиндра, состоящая в том, что нагруженная сторона стенки цилиндра получает масла меньше, чем ненагруженная. Полученная информация может быть использована для уточнения расчетных моделей работы системы смазки и модернизации ее элементов с целью повышения надежности и энергоэкономичности ДВС указанного типа.

Литература

1. Взоров Б.А., Адамович А.В., Арабян А.Г. и др. / Тракторные дизели: Справочник / под общ. ред. Взорова Б.А. М.: Машиностроение, 1981. – 535 с.
2. Алексеев В.П., Воронин В.Ф., Грехов Л.В. и др. / под общ. ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. Двигатели внутреннего сгорания. Устройство и работа поршневых и комбинированных двига-

телей: Учебник / М.: Машиностроение, 1990. 288 с.

3. Pinel S.I., Signer H.R and Zaretsky E.V. Comparison Between Oil-Mist and Oil-Jet Lubrication of High-Speed, Small-Bore Angular-Contact Ball Bearings. *Tribology Transactions*. 2001. Vol. 44 (3). P. 327–338.
4. Вахламов В.К., Шатров М.Г., Юрчевский А.А. Автомобили. Теория и конструкция автомобиля и двигателя: Учебник / под ред. А.А. Юрчевского. М.: Издательский центр «Академия», 2012. 816 с.
5. Agarwal A.K., Goyal S.K., Srivastava D.K. Time resolved numerical modeling of oil jet cooling of a medium duty diesel engine piston. *International Communications In Heat and Mass Transfer*. 2011. Vol. 38 (8). P. 1080–1085.
6. Dhariwal H.C. Control of blowby emissions and lubricating oil consumption in IC engines. *Energy Conversion and Management*. 1997. Vol. 38. No 10–13. P. 1267–1274.
7. Хрулев А.Э. Ремонт двигателей зарубежных автомобилей. М.: За рулем, 2000. 440 с.
8. Повреждения поршней – как выявить и устранить их. Техническая брошюра. Neuenstadt: MS Motorservice International GmbH. 2015. 92 с.
9. Путинцев С.В., Бикташев А.Ф., Гуськов В.Ф. Обоснование и проект макетной установки для исследования условий маслоснабжения цилиндра четырехтактного быстроходного дизеля с воздушным охлаждением // *Материалы XVIII Междунар. научно-практ. конф. Владимир, 2016*. С. 255–258.
10. Путинцев С.В., Бикташев А.Ф. Макетная установка для прямой визуализации и оценки маслоснабжения деталей ЦПГ малоразмерного быстроходного дизеля с воздушным охлаждением // *Проблемы и перспективы студенческой науки*. 2017. № 1. С. 18–20.
11. Путинцев С.В., Агеев А.Г. Экспериментальное исследование условий маслоснабжения цилиндра быстроходного четырехтактного двигателя внутреннего сгорания // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. № 10. С. 45–49.
12. Путинцев С.В. Анализ и постановка задачи маслоснабжения цилиндра четырехтактного поршневого двигателя // *Тракторы и сельхозмашины*. 2015. № 11. С. 24–27.

References

1. Vzorov B.A., Adamovich A.V., Arabyan A.G. i dr. *Traktornye dizeli: Spravochnik* [Tractor diesel engines: Reference book]. Pod obshch. red. B.A. Vzorova. Moscow: Mashinostroenie Publ. 1981. 535 p.

2. Alekseev V.P., Voronin V.F., Grekhov L.V. i dr. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Ustroystvo i rabota porshnevnykh i kombinirovannykh dvigateley: Uchebnyk [Internal combustion engines. Design and operation of piston and supercharged engines: textbook]. Pod obshch. red. A.S. Orlina. M.G. Kruglova. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1990. 288 p.
3. Pinel S.I., Signer H.R. and Zaretsky E.V. Comparison Between Oil-Mist and Oil-Jet Lubrication of High-Speed, Small-Bore Angular-Contact Ball Bearings. Tribology Transactions. 2001. Vol. 44 (3). P. 327–338.
4. Vakhlamov V.K., Shatrov M.G., Yurchevsky A.A. Avtomobili. Teoriya i konstruktsiya avtomobilya i dvigatelya: Uchebnyk [Vehicles. Theory and design of vehicle and engine: textbook]. Pod red. A.A. Yurchevskogo. Moscow. Akademiya Publ. 2012. 816 p.
5. Agarwal A.K., Goyal S.K., Srivastava D.K. Time resolved numerical modeling of oil jet cooling of a medium duty diesel engine piston. International Communications In Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 38 (8). P. 1080-1085.
6. Dhariwal H.C. Control of blowby emissions and lubricating oil consumption in IC engines. Energy Conversion and Management. 1997. Vol. 38. No 10–13. P. 1267–1274.
7. Khrulev A.E. Remont dvigateley zarubezhnykh avtomobiley [Repair of engines of foreign cars]. Moscow. Za rulem Publ. 2000. 440 p.
8. Povrezhdeniya porshney – kak vyyavit' i ustranit' ikh [Damage of pistons – how to detect and neutralize them]. Neuenstadt. MS Motor service International. GmbH Publ. 2015. 92 p.
9. Putintsev S.V., Biktashev A.F., Gus'kov V.F. Reasoning and project of a breadboard setup for research of cylinder oil supply conditions in four-cycle high-speed air-cooled diesel engine. Mater. XVIII Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. [Materials of XVIII International scientific-practical conference]. Vladimir. 2016. P. 255–258 (in Russ.).
10. Putintsev S.V., Biktashev A.F. A breadboard setup for direct visualization and estimation of oil supply of CPG's parts of low-sized high-speed air-cooled diesel engine. Problemy i perspektivy studentcheskoy nauki. 2017. No 1. P. 18–20 (in Russ.).
11. Putintsev S.V., Ageev A.G. Experimental research of conditions of cylinder oil supply in high-speed four-stroke internal combustion engine. Tractory i sel'khoz mashiny. 2016. No. 10, P. 45–49 (in Russ.).
12. Putintsev S.V. Analysis and statement of a cylinder oil supply problem in a four-stroke piston engine. Tractory i sel'khoz mashiny. 2015. No. 11. P. 24–27 (in Russ.).