

УДК 621.43

Экспериментальное исследование условий маслоснабжения цилиндра быстроходного четырехтактного двигателя внутреннего сгорания

Experimental research of conditions of cylinder oil supply in high-speed four-stroke internal-combustion engine

С. В. ПУТИНЦЕВ, д-р техн. наук

А. Г. АГЕЕВ, инж.

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана,
Москва, Россия, putintsev50@yandex.ru

S. V. PUTINTSEV, DSc in Engineering

A. G. AGEEV, Engineer

N. E. Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russia,
putintsev50@yandex.ru

Актуальность работы обусловлена недостаточной изученностью процессов маслоснабжения цилиндров четырехтактных поршневых двигателей с традиционным кривошипно-шатунным механизмом и комбинированной системой смазки. Цель исследования — получение экспериментальных данных о характере распределения моторного масла по окружности цилиндра двигателя внутреннего сгорания указанного типа. Метод измерения состоял в организации дренажа и последующего контроля количества масла, снимаемого поршневыми кольцами с внутренней поверхности цилиндра. Основанная на этом методе экспериментальная установка представляла собой малоразмерный быстроходный четырехтактный дизель с воздушным охлаждением ТМЗ-450Д, в нижнем опорном поясе цилиндра которого были выполнены шесть сквозных маслосборных отверстий, снабженных тонкостенными трубками. Испытания проводились в режиме прокручивания коленчатого вала от постороннего источника (балансирной машины) с номинальной частотой вращения. Окончанием каждого опыта считался момент заполнения маслом любой первой из шести трубок. Контроль количества снимаемого масла производили путем измерения длины его столба внутри каждой из трубок. В условиях прокрутки как со сжатием, так и без сжатия воздуха в цилиндре во всех опытах получено устойчивое превышение на 15–18 % количества масла, снимаемого с ненагруженной стороны стенки цилиндра, над аналогичным показателем для нагруженной стороны. Такой характер распределения масла по окружности цилиндра, при котором ненагруженная сторона получает больше масла, чем нагруженная, указывает на нарушение принципа согласования условий смазки с условиями нагружения, что повышает риск износа и задира в цилиндро-поршневой группе. Несмотря на ограниченность рамками одной методики и одним объектом, полученные результаты свидетельствуют о том, что целесообразно продолжить изучение особенностей маслоснабжения цилиндров двигателей указанного типа для повышения надежности их работы.

Ключевые слова: цилиндр; цилиндро-поршневая группа; четырехтактный поршневой двигатель внутреннего сгорания; моторное масло; маслоснабжение.

The research is relevant because oil supply processes in the cylinders of four-stroke piston engines with traditional cranking mechanism and combined lubricating system are understudied. The research aims to receive the experimental data on pattern of motor oil distribution by circumference of cylinder for the specified type of internal-combustion engine. The measurement method is based on organization of drainage and following quantity control of oil that is removed by piston rings from internal surface of the cylinder. Experimental device corresponding to this method represents the low-sized high-speed four-stroke air-cooled TMZ-450D diesel engine having a cylinder with six oil-catch through holes executed in its bottom support belt and supplied with thin-walled tubes. Tests were performed under rotation of crankshaft by means of outside source (balanced engine) with nominal speed. The oil filling of any first of six tubes was considered as a moment of ending for each experience. The quantity of oil in tubes was controlled by measuring of oil column length in every tube. During cranking both with air compression and without it, experiments show that quantity of motor oil removed by piston rings from non-loaded cylinder wall side in all cases is more by 15–18 % than from the loaded one. Such pattern of oil distribution by circumference of a cylinder at which non-loaded side receives more oil than the loaded one, points to the infringement of principle of coordination between lubricating and loading conditions. That increases the risk of wear and bore scuffing in cylinder-piston unit. In spite of limitation by only one method and one object, the received results show the expediency of following studies of features of cylinder oil supply for the specified type of engines to increase their work reliability.

Keywords: cylinder; cylinder-piston unit; four-stroke internal-combustion engine; motor oil; oil supply.

Введение

В статье [1] поднята актуальная проблема недостаточной изученности условий смазки деталей цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) в быс-

троходных четырехтактных двигателях внутреннего сгорания (ДВС). Выдвинута гипотеза о том, что при использовании в указанных двигателях традиционного кривошипно-шатунного механизма (КШМ) с

комбинированной системой смазки существует вероятность аномально-го маслоснабжения цилиндра, при котором максимально нагруженная боковой силой сторона цилиндра недополучает моторное масло, а

противолежущая, менее нагруженная сторона, наоборот, получает его в избытке, что не отвечает принципу трибоадаптивности и приводит к ухудшению условий смазки, трению и изнашиванию [2—4].

Данная статья представляет продолжение, конкретизацию и частичную разработку ряда упомянутых выше положений.

Цель исследования

Цель исследования — получение экспериментальных данных о характере распределения моторного масла по окружности цилиндра ДВС указанного типа.

Для ее достижения поставлены следующие задачи:

1) разработка метода и реализующего этот метод устройства (установки) для контроля количества моторного масла, попадающего на противоположные относительно плоскости коленчатого вала нагруженную и ненагруженную стороны стенки цилиндра;

2) изготовление и отладка экспериментальной установки;

3) выполнение эксперимента по качественной и количественной оценке характера маслоснабжения цилиндра быстрогоходного четырехтактного ДВС.

В качестве объекта исследования, как и в работе [1], выбран полностью отвечающий требованиям касательно типа КШМ и системы смазки одноцилиндровый четырехтактный дизельный двигатель с воздушным охлаждением 1Ч 85/80 (ТМЗ-450Д), выпускаемый ПО "Туламашзавод".

Материалы и методы

В основу метода экспериментального контроля количества моторного масла, попадающего на противоположные стенки цилиндра, положена идея частичного дренажа (вывода наружу) масла, снимаемого поршневыми кольцами с внутренней поверхности цилиндра, через специально выполненные маслосборные отверстия в стенке цилиндра.

В качестве физических причин выхода моторного масла по дренажным отверстиям рассматривались известное превышение (перепад) давления картерных газов ниже пояса поршневых колец над атмосфер-

ным давлением за пределами цилиндра, а также скребковый эффект колец при прямом ходе поршня от верхней мертвой точки к нижней (ВМТ и НМТ). Гипотетический характер приведенного положения обусловлен тем, что не найдено аналогов такого опыта, поэтому не было гарантии осуществимости дренажа масла.

Для реализации метода маслосборные отверстия были выполнены в сечении цилиндра, расположенном на уровне огневого пояса головы поршня при положении последнего в НМТ. Это обеспечивало, во-первых, прохождение всех поршневых колец комплекта через отверстия, во-вторых, отсутствие перекрытия отверстий поршнем при его положении в ВМТ (рис. 1).

Для вывода собираемого масла за пределы стенки цилиндра в каждое из маслосборных отверстий были герметично установлены тонкостенные трубки (материал — латунь) с наружным диаметром 3 мм. Перед проведением опытов предусматривалось надевание удлинителей на эти трубки в виде прозрачных полихлорвиниловых трубок, которые предназначались для визуального контроля процесса дренажа масла (при нахождении наблюдателя вблизи двигателя) в ходе опыта, а после его окончания — для определения количества собранного масла (рис. 2).

Вопрос о том, чем должны заканчиваться трубки-удлинители — открытым, глухим концом или специально установленным обратным клапаном — до проведения опытов

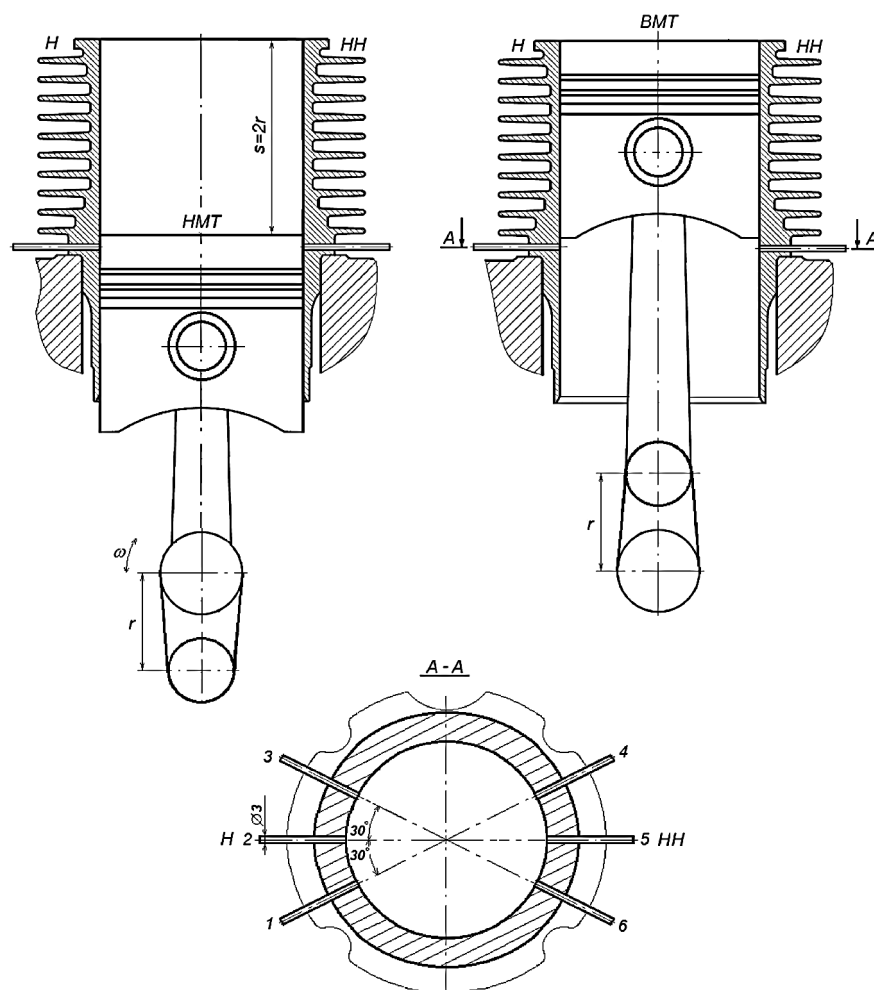


Рис. 1. Схема размещения маслосборных трубок в нижнем посадочном поясе цилиндра дизеля ТМЗ-450Д:

r — радиус цилиндра; s — ход поршня; ω — направление вращения коленчатого вала; H , HH — признаки нагруженной и ненагруженной сторон (полукружностей) стенки цилиндра



Рис. 2. Общий вид опытного цилиндра, снабженного маслосборными тонкостенными трубками

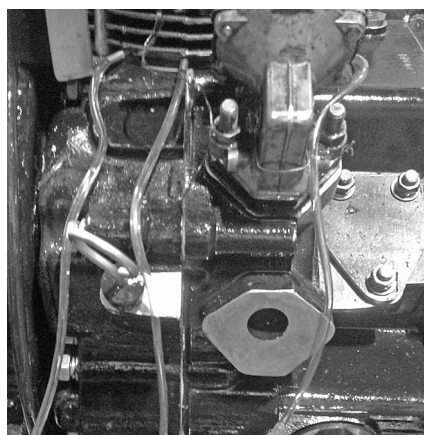


Рис. 3. Размещение прозрачных полихлорвиниловых удлинителей на маслосборных трубках опытного цилиндра дизеля ТМЗ-450Д

не был решен, поскольку, как указывалось выше, характер и сама осуществимость процесса дренажа масла не были заранее известны. В этих условиях целесообразно было начать опыт с самого простого варианта, подразумевающего открытый свободный конец трубок-удлинителей.

Небольшое четное число дренажных отверстий (6 шт.) выбрано из-за стремления сохранить прочность стенки цилиндра и обеспечить равные условия для съема масла с противоположных нагруженной и ненагруженной сторон. С этой же целью выбрана одинаковая полная длина каждой из шести полихлорвиниловых трубок-удлинителей (рис. 3), равная 300 мм (чтобы свободные

концы трубок не касались поверхности подмоторной рамы).

Поскольку условия маслоснабжения цилиндра данного дизеля (как и других четырехтактных быстроходных ДВС с комбинированной системой смазки) не зависят от наличия или отсутствия сгорания топлива, в качестве основного режима испытаний принята прокрутка коленчатого вала от постороннего источника — балансирной машины.

Соответствующая решению этой задачи экспериментальная установка (рис. 4) представляла собой соединенный с валом балансирной машины комплектации (система питания демонтирована) с установленным на его блоке опытным цилиндром. При использовании этой установки обеспечивалось полное геометрическое, кинематическое и физическое подобие объекту. В работу имеющейся на дизеле системы смазки не вносилось никаких изменений или нарушений, если не считать отсутствия нагрева масла от сгорания топлива (компенсация этого несоответствия описана ниже) и предусмотренной испытаниями незначительной убыли моторного масла в ходе ожидаемого дренажа, соизмеримой с естествен-

ной потерей масла в процессе, например, утечки через неплотности.

Предусматривалось осуществление прокрутки в двух вариантах работы установки: со сжатием и без сжатия воздуха в цилиндре. Второй вариант обеспечивался снятием с головки цилиндра клапанов, форсунки и свечи предпускового подогрева, чем гарантировалось отсутствие нагрева цилиндра от сжатия поступающего в него воздуха. Это было необходимо для измерения температурных полей цилиндра, обусловленных трением поршня с кольцами [5]. Объединение двух направлений исследования объясняется попыткой оценить перспективы осуществления многозадачного эксперимента на применяемой установке.

Неизбежное отличие (снижение) температуры моторного масла в системе смазки установки от реальной температуры в работающем под нагрузкой дизеле компенсировалось отказом от принудительного охлаждения цилиндра благодаря установке стального экрана на пути потока охлаждающего воздуха от вентилятора-маховика. Это, вкпе с использованием предельного скоростного режима прокрутки, соответствующего номинальной частоте враще-

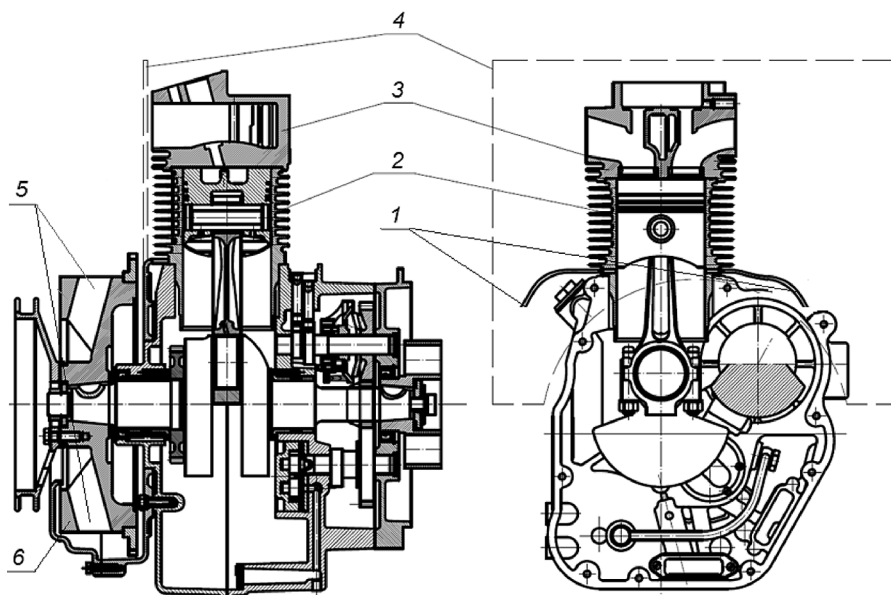


Рис. 4. Экспериментальная установка для исследования маслоснабжения цилиндра на базе дизеля ТМЗ-450Д:

1 — дренажные трубки-удлинители; 2 — цилиндр; 3 — голова цилиндра (демонтированы клапаны, форсунка и свеча предпускового подогрева); 4 — экран на пути потока охлаждающего воздуха; 5 — лопасти вентилятора на маховике 6

ния коленчатого вала 3600 мин⁻¹, позволяло поднять только за счет трения в ЦПГ и КШМ температуру масла до значений, входящих в рабочий диапазон этого показателя для данного дизеля: 70–85 °С.

Контроль температуры моторного масла в системе смазки осуществляли с помощью термопары Х-К, спай которой был размещен на конце масломерного щупа установки.

Продолжительность прокрутки в каждом опыте определялась временем заполнения маслом любой первой из шести трубок-удлинителей, после чего дальнейшее продолжение прокрутки не имело смысла из-за риска потери информации.

Количество масла, снятого с каждой из сравниваемых сторон стенки цилиндра, предполагалось определять как суммарную длину столба масла (за вычетом длины воздушных прослоек) в трубках-удлинителях, связанных с соответствующими отверстиями в стенке цилиндра: 1–3 — для нагруженной стороны; 4–6 — для ненагруженной (см. рис. 1). С целью повышения достоверности результатов предусматривалось повторение каждого опыта при идентичных начальных условиях.

На поршень, представление о конструкции которого дает рис. 1, устанавливали серийный комплект поршневых колец, включающий два компрессионных и одно маслоъемное кольцо.

При проведении испытаний использовался смазочный материал, рекомендованный к применению заводом-изготовителем объекта испытаний, — дизельное минеральное моторное масло SAE 30 API CC (М-10 Г₂К) производства компании Oilright (Россия). Перед первой серией опытов свежее моторное масло в требуемом количестве (2 л) заливалось до уровня, контролируемого с помощью масломерного щупа, и в процессе исследования добавлялось при необходимости.

Результаты и их обсуждение

Пробные прокрутки коленчатого вала показали, что снимаемое поршневыми кольцами со стенки цилиндра масло пульсациями поступает в трубки-удлинители в виде пены, что практически не позволяет выпол-

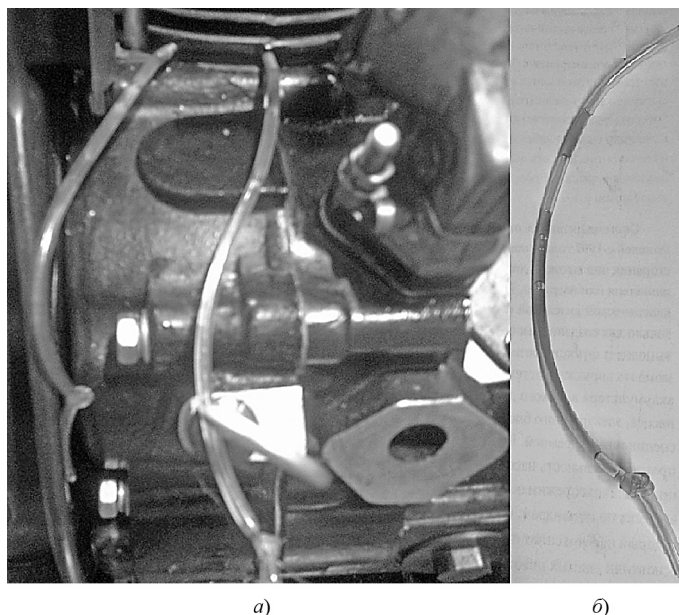


Рис. 5. Вид трубок-удлинителей с узлами на концах и маслом внутри:

а — во время сбора масла; б — в снятом состоянии

нить ни качественную, ни количественную оценку маслоснабжения цилиндра.

Приемлемая для решения задач эксперимента сплошность столбов масла (с единичными и четкими по границе воздушными прослойками) была достигнута благодаря узлам, завязанным на свободных концах трубок (рис. 5). Вероятнее всего, каждый из этих вручную выполненных узлов в совокупности с упругостью стенок трубок-удлинителей работал как обратный клапан, который стравливал из трубок воздух и обеспечивал тем самым их заполнение маслом.

Обработка полученных результатов показала, что как для первого, так и для второго варианта работы установки общий и устойчивый факт — значимое превышение суммарного количества масла в трубках, расположенных с ненагруженной стороны стенки цилиндра (НН), над количеством масла в трубках с нагруженной стороны (Н). В частности, для варианта прокрутки со сжатием воздуха в цилиндре оно составило соответственно 738 и 626 мм, или 18 % по отношению к результату для нагруженной стороны (рис. 6).

Отсутствие сжатия воздуха в цилиндре не оказало существенного влияния на результаты сравнения маслоснабжения нагруженной и

ненагруженной сторон его стенки. Так, снова имело место превышение количества масла, собранного с ненагруженной стороны стенки цилиндра, его относительное значение составило около 15 %. Однако при прокрутке без сжатия воздуха в цилиндре отмечена примерно вдвое меньшая скорость поступления масла в трубки, чем при прокрутке со сжатием, на что указала продолжительность заполнения трубок маслом: 40 и 15 мин соответственно.

Наблюдаемое на рис. 6 некоторое превышение количества масла, собранного удаленными от центральной зоны (плоскости качания шатуна) трубками 1, 3, 4 и 6, по сравнению с трубками 2 и 5, расположенными по центру, может быть объяснено доминированием заброса масла из зазоров на противоположных боковых поверхностях вращающейся шатунной шейки коленчатого вала.

Представленный на рис. 6 характер маслоснабжения, при котором ненагруженная сторона цилиндра получает больше масла, чем нагруженная, аномален, поскольку противоречит принципу согласования условий смазки с условиями нагружения: во избежание масляного голодания и, как следствие, повышенного износа и задира, нагруженная сторона стенки цилиндра должна

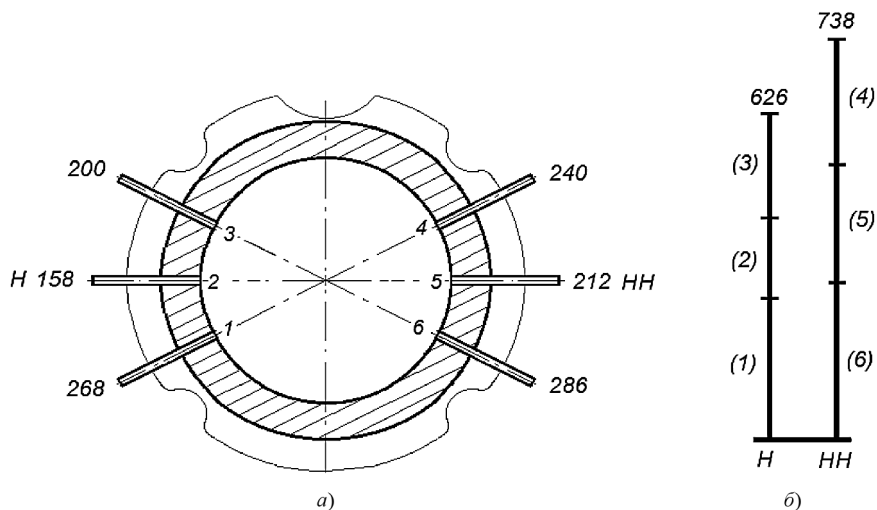


Рис. 6. Раздельное (а) и суммарное на сравниваемых нагруженной *H* и ненагруженной *HH* сторонах стенки цилиндра (б) количество масла в мм длины его столба в трубке-удлинителе по итогам прокрутки коленчатого вала установки в условиях сжатия воздуха в цилиндре на частоте вращения 3600 мин^{-1} в течение 15 мин

получать соответствующее нагрузке, т.е. большее количество смазочного материала, чем ненагруженная.

Несмотря на ограниченность рамками одной методики и объекта, полученные результаты в целом подтвердили гипотезу о существовании аномальной неравномерности распределения масла по характерным сторонам стенки цилиндра. Это говорит в пользу продолжения работ по изучению особенностей масло-снабжения цилиндров данного типа ДВС для повышения надежности их работы.

Выводы

1. Разработана, отлажена и проверена на эффективность применения установка для количественной оценки маслоснабжения внутренней поверхности цилиндра четырехтактного ДВС с комбинированной системой смазки.

2. В результате проведенных экспериментов установлено, что применительно к конструкции дизеля

1Ч 85/80 (ТМЗ-450Д) суммарное количество моторного масла, собранного с ненагруженной стороны стенки цилиндра, при прочих равных условиях устойчиво превышает на 15–18 % аналогичный показатель для противоположной нагруженной стороны. Это противоречит принципу согласования условий смазки с условиями нагружения узла трения и может стать причиной повышенного износа и задира в ЦПГ.

3. Несмотря на ограниченность рамками одной методики и объекта, полученные результаты свидетельствуют о целесообразности продолжения изучения особенностей маслоснабжения цилиндров двигателей указанного типа для повышения надежности их работы.

Литература и источники

1. Путинцев С. В. Анализ и постановка задачи маслоснабжения цилиндра четырехтактного поршневого двигателя // Тракторы и сельхозмашины. 2015, № 11. С. 24–27.

2. Путинцев С. В., Аникин С. А., Агеев А. Г. Применение принципа трибоадаптивности для профилирования юбки поршня быстроходного дизеля // Известия вузов. Машиностроение. 2015, № 5 (662). С. 18–24.

3. Deuss Th., Ehnis H., Freier R. et al. Reibleistungsmessungen am befeuerten dieselmotor // MTZ. 2010, no. 5 (0512010), pp. 326–330.

4. Блинов А. Д., Голубев П. А., Драган Ю. Е. и др. Современные подходы к созданию дизелей для легковых автомобилей и малотоннажных грузовиков / Под ред. В. С. Папонова и А. М. Минеева. М.: НИЦ Инженер, 2000. 332 с.

5. Путинцев С. В., Агеев А. Г. Экспериментальная оценка малых изменений механических потерь в условиях стендовых моторных испытаний // Известия вузов. Машиностроение. 2014, № 7 (652). С. 1–7.

References

1. Putintsev S. V. Analysis and statement of problem of cylinder oil supply in four-stroke piston engine. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2015, no. 11, pp. 24–27 (in Russ.).

2. Putintsev S. V., Anikin S. A., Ageev A. G. Applying the triboadaptivity principle to the profiling of piston skirt of high-speed diesel engine. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2015, no. 5 (662), pp. 18–24 (in Russ.).

3. Deuss Th., Ehnis H., Freier R., Kuenzel R. Reibleistungsmessungen am befeuerten dieselmotor. *MTZ*, 2010, no. 5 (0512010), pp. 326–330 (in Germ.).

4. Blinov A. D., Golubev P. A., Dragan Yu. E. et al. *Sovremennye podkhody k sozdaniyu dizeley dlya legkovykh avtomobiley i malotonnazhnykh gruzovikov* [Modern approaches to the development of diesel engines for passenger cars and light-duty trucks]. Under the editorship of V. S. Paponov and A. M. Mineev. Moscow, Inzhener Publ., 2000, 332 p.

5. Putintsev S. V., Ageev A. G. Experimental evaluation of small changes in mechanical losses in conditions of bench engine tests. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2014, no. 7 (652), pp. 1–7 (in Russ.).