

НАВЕДЕННАЯ ЭДС – КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ МИНИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ПОРШНЕВОГО ДВС

Уханов Денис Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Тракторы, автомобили и теплоэнергетика»

Уханов Александр Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тракторы, автомобили и теплоэнергетика»

Перов Вадим Аркадьевич, аспирант кафедры «Тракторы, автомобили и теплоэнергетика»
ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ

440014, г. Пенза, ул. Ботаническая, 30; тел. 88412628517, e-mail: penz_gau@mail.ru

Ключевые слова: поршневой двигатель внутреннего сгорания, безнагрузочный режим, частота вращения коленчатого вала, наведенная электродвижущая сила.

Статья посвящена решению проблемы, связанной с работой поршневых ДВС на малых оборотах типового безнагрузочного режима при остановках и стоянках автотранспортных средств с работающим двигателем. Типовой безнагрузочный режим является одним из самых неэкономичных режимов двигателя, так как на этом режиме автотранспортное средство стоит, двигатель работает и расходует топливо, а полезная работа не выполняется. Для решения этой проблемы разработан способ работы ДВС на минимальной частоте вращения коленчатого вала экспериментального безнагрузочного режима, основанный на создании периодически повторяющихся циклов, состоящих из чередующихся тактов полного отключения подачи топлива и последующего её включения на уровне, обеспечивающий наиболее экономичное протекание рабочего процесса двигателя. Этот способ позволяет снизить нижний предел минимальной частоты вращения коленчатого вала и, как следствие, часовой расход топлива по сравнению с работой двигателя на типовом режиме. Допустимая минимальная частота вращения коленчатого вала, при которой обеспечивается нормальный смазочный режим в сопряжениях поршневого ДВС, определялась по величине наведенной суммарной ЭДС.

Введение

Одним из основных требований, предъявляемых к поршневым двигателям внутреннего сгорания (ДВС), является обеспечение на холостом ходу минимальной устойчивой частоты вращения коленчатого вала. Этот параметр задается заводом-изготовителем двигателя и определяет его эксплуатационные свойства на безнагрузочных режимах при остановках или стоянках автотранспортных средств (АТС), т.е. на различных скоростных режимах холостого хода.

В процессе эксплуатации при остановках и стоянках АТС с работающим двигателем последний должен работать на самых малых и устойчивых частотах вращения коленчатого вала. Для новых поршневых ДВС минимальная устойчивая частота вращения коленчатого вала на холостом ходу, как правило, не превышает 15...40 % от максимальной. Но по истечении некоторого времени эксплуатации техническое состояние двигателей начинает ухудшаться, и на той же минимальной частоте вращения коленчатого вала они начинают работать неустойчиво. Поэтому на практике зачастую используют более высокую частоту вращения коленчатого вала, ухудшая тем самым технико-экономические показатели двигателя [1, 2].

Рассматривая проблему в целом, необходимо отметить, что все системы «жизнеобеспечения» двигателя проектируют таким образом, чтобы получить оптимальные технико-экономические характеристики, главным образом, на режиме максимальной мощности. Однако на режиме холостого хода при минимальной частоте вращения коленчатого вала эти характеристики нарушаются, что приводит к ухудшению рабочего процесса двигателя и его топливно-экономических показателей.

В настоящее время известен ряд способов, применяемых для улучшения экономичности работы поршневых ДВС на холостом ходу, в том числе и на режиме минимальной частоты вращения коленчатого вала. К ним, прежде всего, относят: отключение части цилиндров; применение систем топливоподачи аккумуляторного типа; использование при безгаражной стоянке автотранспортных средств с работающими двигателями периодически повторяющихся циклов, включающих пуск двигателя, работу двигателя на минимальной устойчивой частоте вращения коленчатого вала без нагрузки и его останов, затем опять пуск; внесение конструктивных изменений в топливную аппаратуру (например, изменение диаметра и числа сопловых отверстий

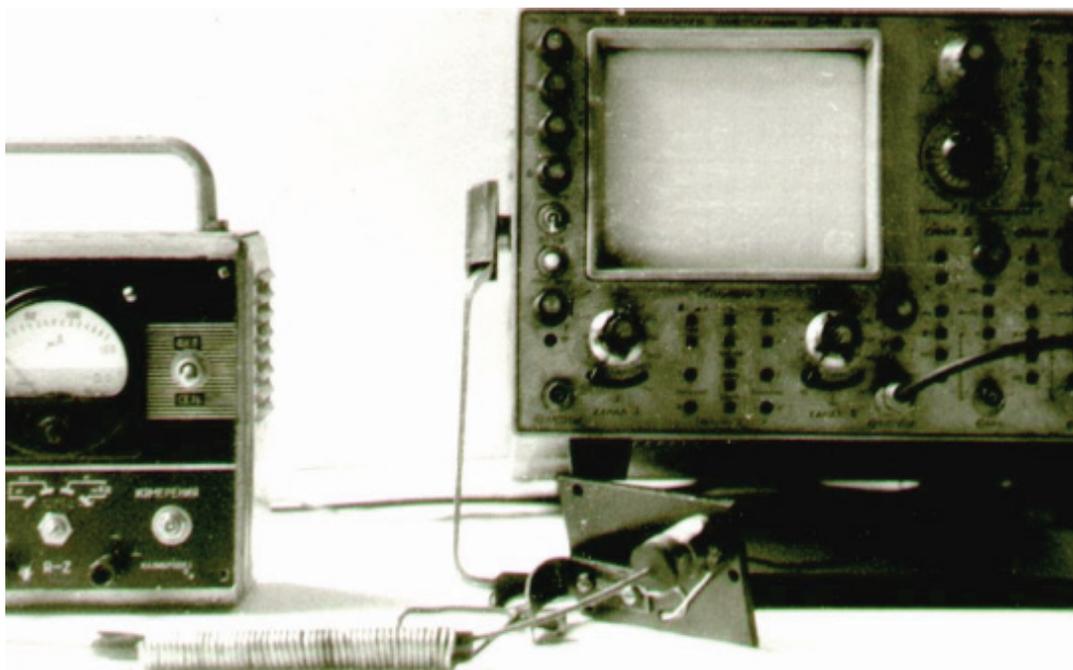


Рис. 1 – Приборы для измерения и регистрации ЭДС в подвижных сопряжениях поршневого двигателя

распылителей форсунок, двухстадийный впрыск топлива, двухфазная подача топлива и др.); оснащение двигателя электронным регулятором частоты вращения коленчатого вала; применение «воздушного» впрыска и др.

Объекты и методы исследований

Авторами разработан способ, заключающийся в переводе работы двигателя при остановках и стоянках АТС на автоматический режим периодически повторяющихся циклов, состоящих из чередующихся тактов отключения и включения подачи топлива или топливо-воздушной смеси. При этом за начало такта отключения подачи топлива принимается верхний предел изменения частоты вращения коленчатого вала ($n_{\text{в}}$), за начало такта включения подачи топлива – нижний предел ($n_{\text{н}}$). За верхний предел частоты вращения ($n_{\text{в}}$) принимается минимально-устойчивая частота вращения коленчатого вала, характерная для типового режима ($n_{\text{в}} = 700...900 \text{ мин}^{-1}$) [3, 4, 5, 6, 7].

По результатам экспериментальных исследований дизеля Д-240 было установлено, что использование предлагаемого способа, воспроизведенного путем автоматического перемещения рейки топливного насоса УТН-5А соответственно в сторону отключения и включения подачи топлива по определенному закону, позволяет снизить нижний предел устойчивой частоты вращения коленчатого вала $n_{\text{н}}$ на холостом ходу практически до пусковых

оборотов ($150...350 \text{ мин}^{-1}$). При этом средняя частота вращения коленчатого вала за цикл $(n_{\text{в}} + n_{\text{н}})/2 = (850 + 250) = 550 \text{ мин}^{-1}$.

Однако при этом не исключена вероятность появления масляного «голодания» сопряжений в узлах трения ДВС. Поэтому для определения нижнего предела частоты вращения коленчатого вала двигателя, при котором не нарушаются условия смазывания сопряжений поршневого ДВС, был использован «гальваноэффект» в паре трения сопрягаемых деталей. Суть «гальваноэффекта» заключается в том, что при работе ДВС основные детали сопряжений кривошипно-шатунного механизма, например, поршень и цилиндр, коленчатый вал и вкладыши представляют пару трения разнородных металлов, разделенных между собой активной средой (масляной пленкой), т.е. образуют микрогальванопару (катод - анод). При работе двигателя на различных скоростных и температурных режимах холостого хода в сопряжениях его подвижных деталей возникает электродвижущая сила (ЭДС) [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

Для измерения наведенной в процессе работы поршневого ДВС суммарной ЭДС (с учетом ЭДС во всех сопряжениях двигателя) использовали ртутный токосъемный датчик и милликровольтамперметр постоянного тока Н-373/3 с гальванометрическим усилителем. Одновременно усиленный сигнал выводился на экран осциллографа С1-99 (рис. 1).

Токоосъем выполняли путем непрерывного контактирования ртутного датчика с измерительной цепью («поршень – цилиндр» через сопряжение «коленчатый вал – вкладыш»). При этом датчик был соединен с коленчатым валом гибким тросиком-проводником, вращающимся при работе двигателя в специально изготовленных направляющих (рис. 2).

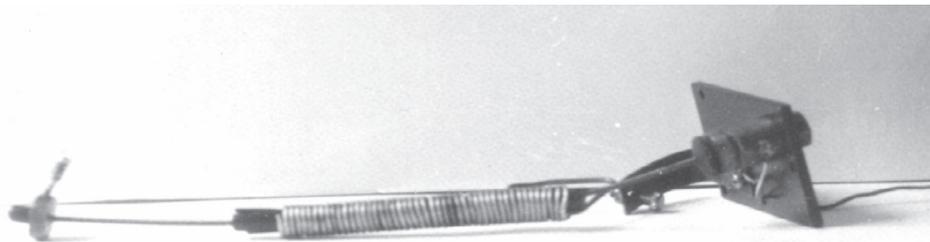


Рис. 2 – Ртутный токоосъемник

Для усиления сигнала (ЭДС в сопряжениях двигателя) была использована схема активного интегратора на основе операционного усилителя (рис. 3). Конденсатор C_1 , применяемый для хранения пропорционального интегралу заряда, включается в цепь обратной связи операционного усилителя, имеющего большой входной импеданс из числа входных каскадов на транзисторах серии СА 3140. Ток заряда конденсатора C_1 равен току, протекающему по резистору R_1 , поэтому в цепь введено сопротивление R_2 для уменьшения падения выходного напряжения $E_{\text{вых}}$ по причине утечек токов через конденсатор C_1 .

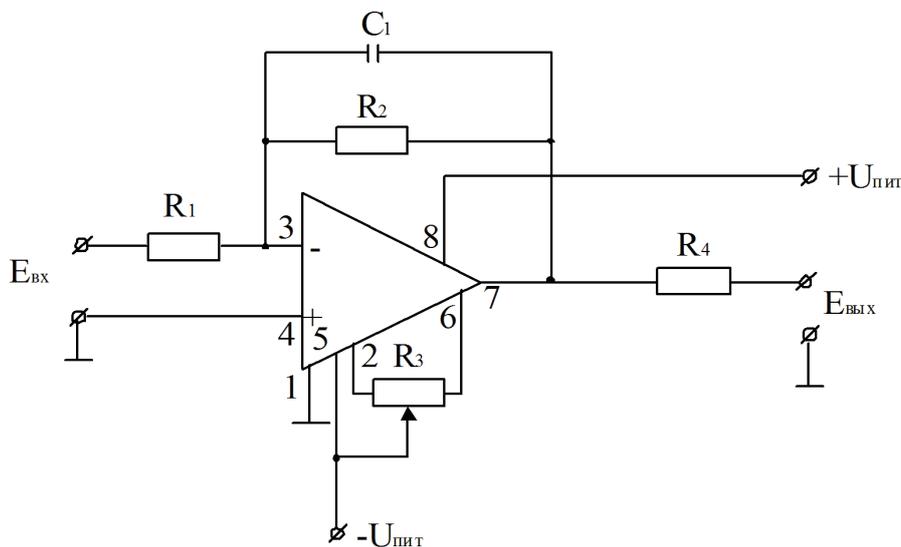


Рис. 3 – Электрическая схема активного интегратора на основе операционного усилителя

В процессе эксперимента при каждом уменьшении частоты вращения коленчатого вала (через 50 мин⁻¹) фиксировали значение наведенной ЭДС. За критическое значение была принята частота вращения, при которой ЭДС исчезает, что происходит при отсутствии масляной пленки (при сухом трении) между поршнем и цилиндром или в сопряжении коленчатый вал – вкладыши.

Окончательно нижний предел частоты вращения коленчатого вала $n_{\text{н}}$ при работе поршневого ДВС в безнагрузочном режиме устанавливали по наименьшей ЭДС при условии обеспечения требуемой подачи масла картерным насосом и наличия масляной пленки в сопряжениях гальванической пары.

Таким образом, была выдвинута рабочая гипотеза о том, что наведенная ЭДС в сопряже-

ниях двигателя может быть принята в качестве критерия при окончательном выборе допустимого значения минимальной частоты вращения коленчатого вала экспериментального безнагрузочного режима.

Результаты исследований

Для определения допустимой минимальной частоты вращения коленчатого вала экспериментального режима, т.е. такого значения, при котором частота вращения коленчатого вала при ее снижении в такте включения подачи топлива не только обеспечивает подачу моторного масла для смазки деталей, но и минимально допустимую толщину масляной пленки в сопряжениях двигателя, были выполнены замеры наведенной суммарной ЭДС.

Результаты замеров суммарной ЭДС, выраженной в виде интегрированного сигнала «В/деление», в сопряжениях дизеля Д-240 (в цепи гальванических пар «поршень – цилиндр», «вкладыши – коленчатый вал» и др.) при температуре масла в поддоне картера двигателя $t_{\text{м}} = 45...50^{\circ}\text{C}$ приведены в таблице 1.

Анализ данных таблицы показал, что при частоте вращения коленчатого вала $n=200$ мин⁻¹

Таблица 1

Величина интегрированного сигнала ЭДС в сопряжениях поршневого ДВС в зависимости от частоты вращения коленчатого вала экспериментального безнагрузочного режима

Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Интегрированный сигнал (число клеток × 0,05), В/деление	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Интегрированный сигнал (число клеток × 0,05), В/деление
800	4,5	450	1,5
750	3,9	400	1,3
700	3,0	350	1,0
650	2,8	300	0,5
600	2,6	250	0,3
550	2,3	200	-
500	2,0		

прибор не фиксирует наведенную ЭДС, а толщина масляной пленки в сопряжениях дизеля критическая. По всей видимости, происходит локальный контакт (сухое трение) между поршнем и цилиндром или вкладышем и шейкой коленчатого вала. Поэтому за допустимое нижнее значение минимальной частоты вращения коленчатого вала в экспериментальном безнагрузочном режиме с некоторым запасом можно принять $n_n > 250$ мин⁻¹.

При работе двигателя на минимальной частоте вращения коленчатого вала экспериментального режима также существенно снижается расход топлива по сравнению с работой ДВС на минимальных оборотах типового режима. Это подтверждается тем, что в соответствии с формулой определения часового расхода топлива, чем не ниже частота вращения коленчатого вала, тем меньше двигатель, при прочих равных условиях, расходует топлива в единицу времени:

$$G_T = 0,12 \cdot g_{ц} \cdot n \cdot \frac{z}{\tau},$$

где G_T – часовой расход топлива, кг/ч; $g_{ц}$ – массовая цикловая подача топлива, г/цикл; n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин⁻¹; z – число цилиндров двигателя; τ – тактность двигателя.

Выводы

Разработанный способ работы поршневых ДВС в безнагрузочном режиме позволяет снизить минимальную частоту вращения коленчатого вала и улучшить топливную экономичность двигателя. Предложенный показатель – наведенная суммарная ЭДС – можно использовать в качестве критерия для определения допустимой минимальной частоты вращения коленчатого вала двигателей транспортных средств.

Библиографический список

1. Уханов, А.П. Улучшение работы автомобилей с карбюраторными двигателями на холостом ходу / А.П. Уханов, Д.А. Уханов, М.Ф. Глебов // Новые промышленные технологии. – 2005. – № 2. – С. 37 - 42.
2. Уханов, Д.А. Новая концепция работы двигателей автотракторной техники на безнагрузочных режимах / Д.А. Уханов // Вестник Московского государственного агроинженерного университета им. В.П. Горячкина. – 2008. – № 2 (27). – С. 100 - 102.
3. Патент 2170914 Российская Федерация, МПК G 01 M 15/00, F 02 D 41/16, 17/04. Способ снижения эксплуатационного расхода топлива силовой установкой и устройство для его осуществления / С.В. Тимохин, А.П. Уханов, А.В. Николаенко, Д.А. Уханов, Р.В. Федулов. – № 2000100194/06; заяв. 05.01.2000; опубл. 20.07.2001, Бюл. № 20.
4. Патент 2451810 Российская Федерация, МПК F 02 F 1/20. Цилиндропоршневая группа двигателя внутреннего сгорания / Д.А. Уханов, А.Л. Хохлов, И.Р. Салахутдинов, А.А. Хохлов. – № 2011100391/06; заяв. 11.01.2011; опубл. 27.05.2012, Бюл. № 15.
5. Патент 2204730 Российская Федерация, МПК 7F 02 D 41/16, 17/04, G 01 M 15/00. Способ управления работой транспортного двигателя внутреннего сгорания на режиме динамического холостого хода и устройство для его осуществления / А.П. Уханов, С.В. Тимохин, Д.А. Уханов, А.С. Тимохин. – № 2001112308/06; заяв. 04.05.2001; опубл. 20.05.2003, Бюл. № 14.
6. Автоматизированная система управления работой бензинового впрыскового двигателя в режиме холостого хода / Д.А. Уханов, А.П. Уханов, Н.А. Мухатаев, В.А. Перов // Известия Самарской ГСХА. – 2017. – Выпуск 4. – С. 39 - 44.
7. Уханов, А.П. Топливная экономичность

и экологическая безопасность автомобильного двигателя при работе на режиме самостоятельного холостого хода / А.П. Уханов, М.Ф. Глебов // Образование, наука, практика: инновационный аспект. Материалы международной научно-практической конференции. – Пенза: ПГСХА, 2015. – Том 2. – С. 70 - 73.

8. Рахубовский, Ю.С. Исследование износа цилиндров автомобильных дизелей в условиях Крайнего Севера: автореф. дисс. ... канд. технических наук / Ю.С. Рахубовский. – Львов, 1969. – 30 с.

9. ГОСТ 22261-94. Средства измерений электрических и магнитных величин. – М.: Госстандарт. – 15 с.

10. Кар, Дж. Проектирование и изготовление электронной аппаратуры / Дж. Кар; пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 387 с.

11. Методы управления трением и изнашиванием материалов в условиях возникновения контактной разности потенциалов / И.Р. Салахутдинов, А.А. Глущенко, М.М. Замальдинов,

А.П. Никифоров // Эксплуатация автотракторной и сельскохозяйственной техники: опыт, проблемы, инновации, перспективы. Материалы III международной научно-практической конференции. – Пенза: РИО ПГАУ, 2017. – С. 125 - 127.

12. Процесс образования контактной разности потенциалов в сопряжении «поршневое кольцо – гильза цилиндров» / И.Р. Салахутдинов, А.А. Глущенко, М.М. Замальдинов, А.В. Лисин // Эксплуатация автотракторной и сельскохозяйственной техники: опыт, проблемы, инновации, перспективы. Материалы III международной научно-практической конференции. – Пенза: РИО ПГАУ, 2017. – С. 128 - 130.

13. Прейс, Г.А. Электрохимические явления при трении металлов / Г.А. Прейс, А.Г. Дзюб // Трение и износ. – 1980. – Том 1, № 2. – С. 217 - 235.

14. Рыжкин, А.А. Об электрических явлениях при трении / А.А. Рыжкин, В.Э. Бурлаков. – Вестник ДГТУ, 2011. – Том 11, № 9. – С. 1564 - 1573.

INDUCED ELECTROMOTIVE FORCE (EMF) AS CRITERIAL INDICATOR OF MINIMUM ROTATION RATE OF PISTON ENGINE CRANKSHAFT

**Ukhanov D.A., Ukhanov A.P., Perov V.A.
FSBEI HE Penza SAU
440014, Penza, Botanicheskaya st., 30;
tel.: 88412628517, e-mail: penz_gau@mail.ru**

Key words: piston internal combustion engine, load-free mode, crankshaft rotation rate, induced electromotive force.

The article is devoted to the solution of the problem related to the operation of piston internal combustion engines at low rotation rates of a typical load-free mode during stops and parking of vehicles with a working engine. A typical load-free mode is one of the most costly engine modes, as the vehicle is not moving, the engine is running and consuming fuel, and useful work is not being performed. To solve this problem, a method has been developed for operating an internal combustion engine at a minimum rotation rate of the crankshaft of experimental load-free mode, based on recurrent cycles. They consist of alternating cycles of complete cut-off of the fuel supply and its subsequent activation at a level that ensures the most economical flow of the engine working process. This method allows to decrease the lower limit of crankshaft minimum rotation rate and, consequently, the hourly fuel consumption in comparison with the engine operation in standard mode. The acceptable crankshaft minimum rotation rate, at which normal lubrication conditions in the engine are ensured, was determined by induced total electromotive force parametre.

Bibliography

1. Ukhanov, A.P. Performance improvement of cars with carburetor engines at idle run / A.P. Ukhanov, D.A. Ukhanov, M.F. Glebov // *New industrial technologies*. - 2005. - № 2. - P. 37 - 42.
2. Ukhanov, D.A. A new strategy of engine operation of autotractor machinery on non-loading modes / D.A. Ukhanov // *Vestnik of Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin*. - 2008. - № 2 (27). - P. 100 - 102.
3. Patent 2170914 the Russian Federation, the IPC G 01 M 15/00, F 02 D 41/16, 17/04. Method for reducing the operational fuel consumption of the power plant and a device for its execution / S.V. Timokhin, A.P. Ukhanov, A.V. Nikolaenko, D.A. Ukhanov, R.V. Fedulov. - № 2000100194/06; appl. 05.01.2000; publ. 20.07.2001, Bul. № 20.
4. Patent 2451810 Russian Federation, IPC F 02 F 1/20. Cylinder piston group of the internal combustion engine / D.A. Ukhanov, A.L. Khokhlov, I.R. Salakhutdinov, A.A. Khokhlov. - No. 2011100391/06; appl. 11.01.2011; publ. 27.05.2012, Bul. № 15.
5. Patent 2204730 Russian Federation, IPC 7F 02 D 41/16, 17/04, G 01 M 15/00. A method for controlling the operation of a transport internal combustion engine in the dynamic idle mode and a device for its execution / A.P. Ukhanov, S.V. Timokhin, D.A. Ukhanov, A.S. Timokhin. - № 2001112308/06; appl. 04.05.2001; publ. 20.05.2003, Bul. № 14.
6. Automated system for controlling the operation of a gasoline injection engine at idle mode / D.A. Ukhanov, A.P. Ukhanov, N.A. Mukhatayev, V.A. Perov // *Izvestya of Samara State Agricultural Academy*. - 2017. - Issue 4. - P. 39 - 44.
7. Ukhanov, A.P. Fuel efficiency and ecological safety of automobile engine at idle mode / A.P. Ukhanov, M.F. Glebov // *Education, science, practice: innovative Aspect. Materials of the international scientific-practical conference*. - Penza: PSAA, 2015. - Volume 2. - P. 70 - 73.
8. Rakhubovskiy, Yuri Sergeevich. Research of cylinder wear of automobile diesel engines in the conditions of the Far North: author's abstract of dissertation of Candidate of Technical Sciences / Yu.S. Rakhubovskiy. - Lvov, 1969. - 30 p.
9. National State Standard 22261-94. Means for measuring electrical and magnetic quantities. - Moscow: Gosstandart. - 15 p.
10. Kar, J. Design and manufacture of electronic equipment / J. Kar; trans. from English. - Moscow: Mir, 1986. - 387 p.
11. Methods for controlling the friction and wear of materials in the conditions of a contact potential difference / I.R. Salakhutdinov, A.A. Glushchenko, M.M. Zamaldinov, A.P. Nikiforov // *operation of automotive and agricultural machinery: experience, problems, innovations, prospects. Materials of the III International scientific and practical conference*. - Penza: Publishing house of PSAU, 2017. - P. 125 - 127.
12. The process of formation of contact potential difference in the conjugation of «piston ring-cylinder liner» / I.R. Salakhutdinov, A.A. Glushchenko, M.M. Zamaldinov, A.V. Lysin // *Operation of automotive and agricultural machinery: experience, problems, innovations, prospects. Materials of the III International scientific and practical conference*. - Penza: Publishing house of PSAU, 2017. - P. 128 - 130.
13. Preis, G.A. Electrochemical phenomena in the friction of metals / G.A. Preis, A.G. Dzyub // *Friction and wear*. - 1980. - Volume 1, № 2. - P. 217 - 235.
14. Ryzhkin, A.A. About electrical phenomena in friction / A.A. Ryzhkin, V.E. Burlakov. - *Vestnik of DSTU*, 2011. - Volume 11, № 9. - P. 1564 - 1573.