

Прогнозирование ресурса многофункциональных энерготехнологических комплексов

Рецензия эксперта на статью получена
18.05.2020 [Expert review on the article
received on May 18, 2020].

Одним из перспективных направлений развития средств малой энергетики, как источников стабильного энергообеспечения инженерной инфраструктуры ЖКХ и коммерческих объектов, является создание многофункциональных энерготехнологических комплексов (МЭК) на основе инверторных гибридных электроагрегатов с поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС), работающих с оптимальной, с точки зрения топливной экономичности, частотой вращения, зависящей от нагрузки.

Однако при отклонении частоты вращения от номинальной величины увеличиваются максимальные величины температуры и давления в камере сгорания, что влечёт рост тепловой и механической нагруженности деталей первичного ДВС и, следовательно, ухудшение его ресурсных показателей. Для решения этой проблемы используются различные технические решения, например, снижение степени сжатия ДВС.

Эффективность этих решений должна быть подтверждена в первую очередь расчётом, так как натурные эксперименты по оценке показателей надёжности занимают длительное время (от 10 тыс. до 75 тыс. часов наработки) и требуют больших затрат материальных ресурсов.

Относительное изменение ресурса первичного двигателя при переводе на режим переменной частоты вращения в составе МЭК с поршневыми двигателями внутреннего сгорания может быть

При отклонении частоты вращения от номинальной величины увеличиваются максимальные величины температуры и давления в камере сгорания, что влечёт рост тепловой и механической нагруженности деталей

оценено по величине относительного изменения скорости накопления повреждений и изнашивания деталей. Связь между нагрузкой S и числом циклов N нагружения при работе на различных режимах описывается уравнением Вёлера [1]:

$$S_i^m N_i = \text{const}, \quad (1)$$

где m — показатель степени, зависящий от свойств материала и характера нагружения [2]; i — номер режима нагружения.

Величина показателя m для термоусталости алюминиевых поршней составляет 3,5–4,0, для механической усталости сталей — 6, для контактной усталости сталей — 3–6, для шариковых и роликовых подшипников — 3,0–3,33, для резьбовых соединений — 1,5–9,0 и т.д.

При изменении конструкции или режима функционирования ДВС меняются следующие основные факторы [3]: силы инерции поступательно движущихся и вращающихся деталей; силы давления газов в камере сгорания; температура деталей, образующих камеру сгорания; механические переменные нагрузки, связанные с угловыми ускорениями [4].

УДК 519.876.5, 621.311.236. Научная специальность: 05.04.02.

Прогнозирование ресурса многофункциональных энерготехнологических комплексов

И.Я. Редько, д.т.н., профессор, заместитель генерального директора по науке, Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского (АО «ЭНИИ», г. Москва); **А.А. Малозёмов**, д.т.н., доцент, профессор, кафедра «Колёсные и гусеничные машины»; **А.В. Наумов**, начальник учебной части, заместитель начальника кафедры «Танковые войска»; **Д.В. Козьминых**, младший научный сотрудник лаборатории исследований моторно-трансмиссионного блока автомобиля, дорожно-строительной и специальной техники, аспирант, кафедра «Колёсные и гусеничные машины»; **Г.А. Малозёмов**, студент, факультет «Математика, механика и компьютерные технологии», Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет) [ЮрГУ (НИУ), г. Челябинск]

Необходимость обеспечения стабильного функционирования инфраструктуры жилищно-коммунального хозяйства требует гарантии бесперебойного энергообеспечения, которую может дать использование многофункциональных энерготехнологических комплексов (МЭК). В свою очередь, надёжность работы самих МЭК зависит от верной настройки их компонентов. В связи с этим целью авторов статьи стала разработка математической модели прогнозирования ресурса многофункциональных энерготехнологических комплексов с поршневыми двигателями внутреннего сгорания, учитывающей конструктивные особенности и режимы нагружения двигателя, изнашивание и накопление повреждений его деталей и позволяющей существенно снизить затраты времени и материальных ресурсов на выполнение конструктивно-доводочных работ при создании и модернизации комплексов.

Ключевые слова: многофункциональный энерготехнологический комплекс, жилищно-коммунальное хозяйство, поршневой двигатель, изнашивание, накопление повреждений, ресурс, математическая модель.

UDC 519.876.5, 621.311.236. Number of scientific specialty: 05.04.02.

Forecasting the lifetime of multifunctional energy technological complexes with reciprocating engines

I. Ya. Redko, Doctor of Technical Sciences, Professor, deputy general director for science, "G. M. Khrzhizhanovsky Power Engineering Institute" Stock Co. (Moscow city); **A. A. Malozjmov**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, the Department of the Wheeled and Tracked Vehicles; **A. V. Naumov**, head of the educational unit, deputy head of the Tanks Department; **D. V. Kozminykh**, postgraduate student of the Department of the Wheeled and tracked vehicles, junior researcher, Laboratory for Research of Motor-Transmission Unit of Automotive, Road-Building and Special Equipment; **G. A. Malozjmov**, student of Mathematics, mechanics and computer technologies faculty, South Ural State University (National Research University) (Chelyabinsk city)

A mathematical model has been developed for predicting the life time of multifunctional energy technological complexes with reciprocating internal combustion engines, taking into account the engine design features and loading modes, wear and accumulation of damage to its parts and significantly reducing the time and material resources required for complexes development and modernization.

Key words: multifunctional energy technological complex, reciprocating engine, wear, damage accumulation, lifetime, mathematical model.



Последним фактором для двигателя, работающего в составе МЭК, можно пренебречь, так как её переходные режимы являются очень растянутыми по времени. Относительная скорость накопления повреждений от j -го фактора исследуемого двигателя по отношению к базовому:

$$K_j = C_j / C'_j, \quad (2)$$

где символ «'» относится к базовому двигателю (референсное значение); C — условная скорость накопления повреждений в двигателе.

На основе уравнения (1) для целей оценки влияния конструктивных параметров двигателя на его ресурс было получено выражение для оценки условной скорости накопления повреждений от инерционных нагрузок [5]:

$$C_n = \sum_1^i (n_i^{2m+1} f_i), \quad (3)$$

где f_i — частота возникновения i -го режима; n_i — частота вращения коленчатого вала на i -м режиме.

Частота возникновения режима по сути является коэффициентом его весо-мости, учитываемым при суммировании накапливаемых повреждений. Переходя от суммирования к интегрированию в диапазоне времени от τ_1 до τ_2 для вращающихся деталей, получим:

$$C_n = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (\omega^{2m+1}) d\tau, \quad (4)$$

где ω — текущая угловая скорость детали; τ — время.

Аналогично для поступательно движущихся деталей:

$$C_n = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (v^{2m+1}) d\tau, \quad (5)$$

где v — текущая поступательная скорость детали.

Относительная скорость накопления повреждений от инерционных нагрузок:

$$\frac{K_n}{d\tau} = \left(\frac{\omega}{\omega'} \right)^{2m+1} + \left(\frac{v}{v'} \right)^{2m+1}. \quad (6)$$

Аналогично рассуждая, получим выражения для относительной скорости накопления повреждений от воздействия газовых сил:

$$\frac{K_p}{d\tau} = \left(\frac{P}{P'} \right)^m, \quad (7)$$

и от воздействия низкочастотных макротепломен (зависимость от степени сжатия выражена не столь явно, как в предыдущем уравнении):

$$\frac{K_T}{d\tau} = \left(\frac{G_f}{G'_f} \right)^a \left[\frac{n' (P'_{IVC})^{0,61}}{n (P_{IVC})} \right]^b, \quad (8)$$

где G_f — часовой массовый расход топлива; P — давление газов в камере сгорания; P_{IVC} — давление воздуха в момент закрытия впускного клапана (предполагаем, что оно пропорционально давлению перед органами впуска); a и b — показатели степени, зависящие от рассматриваемой поверхности, которые согласно рекомендациям [6] могут быть приняты равными: для головки цилиндра — 1,15 и 0,655; для гильзы цилиндра — 1,8 и 1,0; для поршня 1,0 и 0,57, соответственно.



Кроме усталостных факторов на выработку ресурса влияет механический износ трущихся в сопряжениях деталей [7], скорость которого пропорциональна силе трения:

$$F_{\text{тр}} = f_{\text{тр}} N_n = A F_n \mu v, \quad (9)$$

где N_n — нормальная сила; $f_{\text{тр}}$ — коэффициент трения; A — коэффициент пропорциональности; μ — коэффициент динамической вязкости (для жидкостного трения); v — скорость относительного перемещения. Тогда относительная скорость изнашивания:

$$\frac{K_{\text{тр}}}{d\tau} = \frac{F_n}{F'_n} \frac{n}{n'}. \quad (10)$$

Обобщённую оценку теплонапряжённости ДВС удобно произвести по критерию фирмы Doxford [8]:

$$q \approx K \left(\frac{G_m}{F_n} \right)^a \frac{1}{(A n S_\Sigma \rho_b)^b}, \quad (11)$$

где K — коэффициент; F_n — площадь поршня; S_Σ — суммарный ход поршней; ρ_b — плотность воздуха на входе в цилиндр; $A = \epsilon / (\epsilon - 1)$.

Показатель ресурса ПДВС определяется исходя из известного значения ресурса базового двигателя R' :

$$R = R' / K_\Sigma, \quad (12)$$

где K_Σ — суммарная относительная скорость накопления повреждений исследуемого двигателя (относительно базового).

В выражении (12) используется значение ресурса ДВС, а не инверторного электроагрегата, так как, согласно действующим в отрасли нормативно-техническим документам, именно двигатель определяет ресурс энергоустановки.

Разработанная математическая модель для оценки относительного изменения скорости расходования ресурса была внедрена в имитационную модель МЭК с первичным поршневым ДВС [9] в компоненты, описывающие цилиндр, кривошип и блок в целом. Она упрощённая, в то же время отличается низкой трудоёмкостью и позволяет оценить характер влияния различных факторов на изменение ресурсных показателей первичного двигателя инверторной энергоустановки.

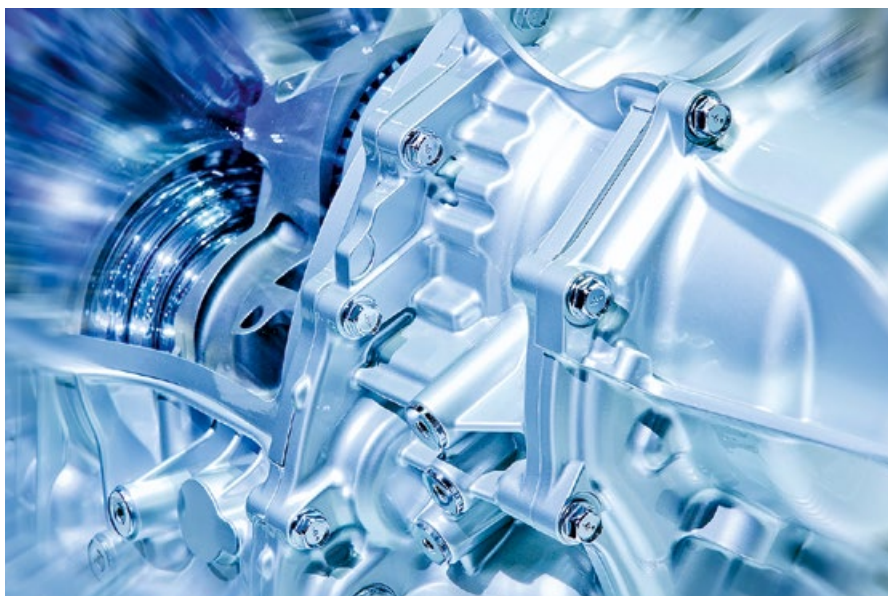
С использованием разработанной математической модели было проведено расчётное исследование влияния различных факторов на тепловую и механическую нагруженность ДВС в составе МЭК на базе электроагрегата ДГУ-100С производства Челябинского тракторного завода и его ресурсные показатели.

Для эксперимента использовалась имитационная модель первичного двигателя 4ЧН15/20.5. Учитывая, что инверторный энергоагрегат работает на режимах, близких к стационарным, газотурбинный наддув имитировался граничными условиями.

Расчёт выполнялся для следующих вариантов конструкции:

1. С постоянной частотой вращения и степенью сжатия 14,5 (базовый).
2. С постоянной частотой вращения и степенью сжатия 13,5.
3. С переменной частотой вращения и степенью сжатия 14,5.
4. С переменной частотой вращения и степенью сжатия 13,5.

С использованием графика характерных суточных электрических нагрузок автономной системы энергоснабжения была построена гистограмма частоты



возникновения режимов нагружения инверторного электроагрегата (рис. 1).

Максимальная мощность ДВС определялась с учётом КПД электротехнической части энергоустановки, нормативного коэффициента реактивной нагрузки $\cos(\varphi) = 0,8$, но без учёта возможности 10 % перегрузки, и она составила 125 кВт.

На основании гистограммы частоты и алгоритма оптимального регулирования топливоподачи получены средние частоты вращения коленчатого вала ДВС (варианты 3 и 4) в каждом из диапазонов нагрузки. С использованием гистограммы частоты возникновения режимов нагружения (рис. 2), экспериментальных и расчётных данных были определены значения суммарной относительной скорости накопления повреждений и относительной скорости изнашивания дизеля 4ЧН15/20.5 в составе МЭК с постоянной и переменной частотой вращения коленчатого вала, степенью сжатия 14,5 и 13,5. Основные результаты расчёта представлены в табл. 1 и на рис. 2.

При одновременном снижении степени сжатия и работе с оптимальной частотой вращения коленчатого вала происходит снижение суммарной скорости накопления повреждений на 30 %. Только при снижении степени сжатия либо при работе с переменной частотой вращения скорость накопления повреждений увеличивается на 9 % и 47 %, соответственно. Это вызвано тем, что оба мероприятия влекут рост скорости накопления повреждений в 1,7–2,1 раза вследствие увеличения амплитуды низкочастотных макротеплосмен из-за: а) изменения частоты вращения; б) увеличения диапазона изменения средних температур и давлений рабочего тела в камере сгорания.

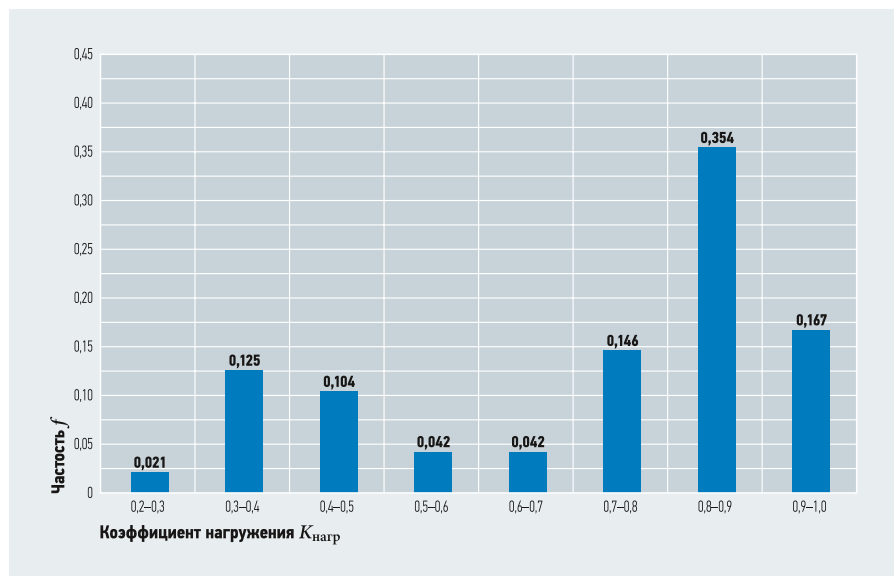


Рис. 1. Частота возникновения режимов нагружения инверторного энергоагрегата в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов



Относительная скорость накопления повреждений и износа*

табл. 1

Влияющий фактор	Вариант			
	1	2	3	4
Инерционные нагрузки	1,000	1,000	0,607	0,607
Газовые силы	1,000	0,518	1,171	0,567
Макротеплосмены:				
— гильза	1,000	2,095	2,066	2,033
— головка цилиндра	1,000	1,885	1,770	1,757
— поршень	1,000	1,822	1,689	1,679
Суммарные повреждающие нагрузки	1,000	1,086	1,468	0,700
Изнашивание	1,000	0,996	0,763	0,759

* Для дизеля 4ЧН15/20.5 в составе МЭК.

В варианте (2) это частично компенсируется снижением газовых нагрузок, а в варианте (3) — уменьшением инерционных нагрузок, что является недостаточным. В варианте (4) одновременно снижаются как инерционные нагрузки, так и газовые силы, что компенсирует рост скорости накопления повреждений из-за макротеплосмен.

Расчёт относительной скорости накопления повреждений выполнен для трёх деталей: гильзы и головки цилиндра, поршня. В наибольшей степени (на 42%) уменьшается суммарная скорость накопления повреждений поршня, для головки цилиндра эта величина составляет 40%, для гильзы — 30%. Поэтому лимитирующей ресурс деталью является гильза.

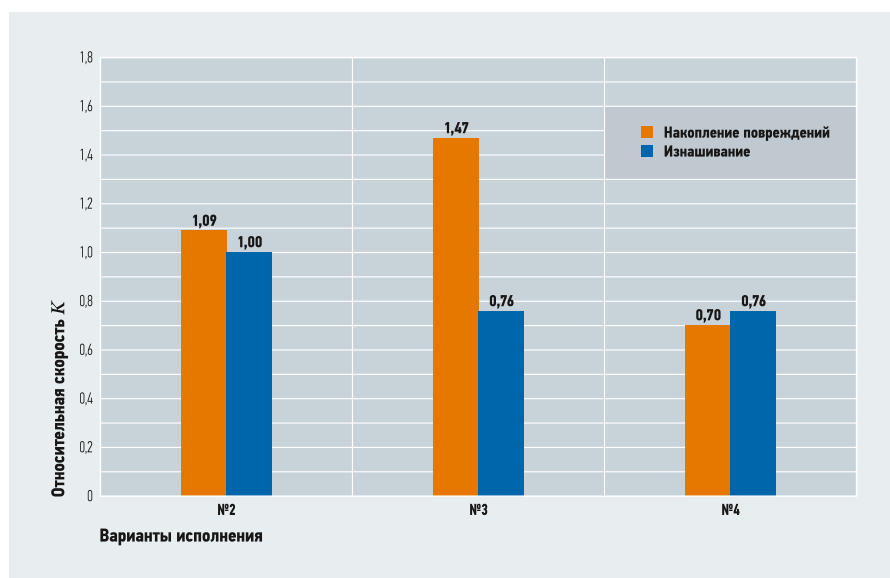


Рис. 2. Суммарная относительная скорость накопления повреждений и относительная скорость изнашивания дизеля 4ЧН15/20.5 в составе МЭК в вариантах исполнения (2–4)

Расчёт относительной скорости накопления повреждений выполнен для трёх деталей: гильзы и головки цилиндра, поршня

Скорость изнашивания уменьшается во всех рассмотренных вариантах из-за снижения частоты вращения и/или уменьшения газовых сил. Для варианта (4) её снижение составляет 24%. То есть параметрический отказ наступит раньше, чем функциональный, поэтому он является лимитирующим. Ожидаемое увеличение ресурса дизеля 4ЧН15/20.5 (с пониженной до 13,5 степени сжатия) в составе автономной МЭК с инверторным электроагрегатом составит 32%.

Таким образом, в ходе выполненных работ была создана математическая модель для прогнозирования ресурса МЭК с поршневыми двигателями внутреннего сгорания, учитывающая конструктивные особенности и режимы нагружения двигателя, изнашивание и накопление повреждений его деталей. Математическая модель была использована при разработке МЭК на базе двигателя 4ЧН15/20.5. В ходе расчётов было установлено, что перевод инверторного электроагрегата установки на режим переменной частоты вращения с одновременным снижением степени сжатия с 14,5 до 13,5 единиц позволит увеличить её ресурс примерно на 32%.

- Хевилэнд Р. Инженерная надёжность и расчёт на долговечность. — Л.: Энергия, 1966. 231 с.
- Сервисен С.В. Несущая способность и расчёты деталей машин на прочность: Справочное пособие / С.В. Сервисен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. — М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
- Маковеев Ю.П., Мордухович М.М., Мкртумян Э.А. Исследование условий работы основных деталей дизеля Д-60 при его форсировании // Тракторы и сельскохозяйственные машины, 1970. №7. С. 1–3.
- Леонов О.Б., Мануйлов Н.Н. Анализ силовых нагрузок при переходном процессе в ДВС. — М.: Известия вузов: Машиностроение, 1968. №4. С. 116–123.
- Малозёмов А.А., Шикин А.С. Расчётно-экспериментальная оценка влияния уровня деформирования на ресурс дизеля типа В-2 // Вестник ЮУрГУ: Машиностроение, 2009. Вып. 13. №24. С. 89–96.
- Хрушков П.П. Влияние эксплуатационных режимов тракторного двигателя на износостойкость основных его деталей / Записки ЛСХИ. — Л., 1971. Т. 174. Вып. 3. С. 70–74.
- Костин А.К. Теплонапряжённость двигателей внутреннего сгорания: Справочное пособие / А.К. Костин, В.В. Ларионов, Л.И. Михайлов. — Л.: Машиностроение, 1979. 222 с.
- Шикин А.С. Снижение механической и тепловой напряжённости деталей форсированного дизеля двойного назначения 4ЧН15/20.5 уменьшением степени сжатия / Проблемы эксплуатации и обслуживания транспортно-технологических машин: Мат. междунауч.-техн. конф. — Тюмень: ТГНУ, 2009. С. 395–399.
- Малозёмов А.А., Наумов А.В., Малозёмов Г.А. Программное обеспечение для имитационного моделирования автономных теплоэнергетических установок с поршневыми двигателями // Журнал СОК, 2019. №10. С. 32–36.

References — see page 80.

Forecasting the lifetime of multifunctional energy technological complexes with reciprocating engines. Pp. 76–79.

Ivan Ya. Redko, Doctor of Technical Sciences, Professor, deputy general director for science, "G.M. Khrzhizhanovsky Power Engineering Institute" Stock Co.; **Andrey A. Malozjomov**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, the Department of the Wheeled and Tracked Vehicles; **Aleksey V. Naumov**, head of the educational unit, deputy head of the Tanks Department; **Dmitrij V. Kozminykh**, postgraduate student of the Department of the Wheeled and tracked vehicles, junior researcher, Laboratory for Research of Motor-Transmission Unit of Automotive, Road-Building and Special Equipment; **Georgiy A. Malozjomov**, student of Mathematics, mechanics and computer technologies faculty, South Ural State University (National Research University, Chelyabinsk city)

1. R. Hevilend. *Inzhenernaja nadezhnost' i raschjot na dolgovechnost'* [Engineering reliability and durability calculation]. Leningrad. Jenergija ["The Energy" Publishers]. 1966. 231 p.
2. S.V. Servisen, V.P. Kogaev, R.M. Shnejderovich. *Nesushhaja sposobnost' i raschjoty detalej mashin na prochnost'*: Spravochnoe posobie [Carrying capacity and strength calculations of machine parts: A reference manual]. Moscow. Mashinostroenie ["Engineering Industry" Publishers]. 1975. 488 p. [In Russian]
3. Ju.P. Makoveev, M.M. Morduhovich, Je.A. Mkrtumjan. *Issledovanie uslovij raboty osnovnyh detalej dizelja D-60 pri ego forsirovanii* [Investigation of the operating conditions of the main parts of the D-60 diesel engine during its forcing]. *Traktory i sel'hoz mashiny* ["Tractors and agricultural machinery" Magazine]. 1970. No. 7. Pp. 1–3. [In Russian]
4. O.B. Leonov, N.N. Manujlov. *Analiz silovyh nagruzok pri perehodnom processe v DVS* [Analysis of power loads during a transient process in an internal combustion engine]. Moscow. *Izvestija vuzov: Mashinostroenie* [Proc. of universities: Mechanical engineering]. 1968. No. 4. Pp. 116–123. [In Russian]
5. A.A. Malozjomov, A.S. Shikin. *Raschetno-jeksperimental'naja ocenka vlijanija urovnja deforsirovanija na resurs dizelja tipa V-2* [Computational and experimental evaluation of the influence of the derating level on the service life of a V-2 diesel engine]. *Vestnik JuUrGU: Mashinostroenie* [Bulletin of the South Ural State University: Mechanical Engineering]. 2009. Issue 13. No. 24. Pp. 89–96. [In Russian]
6. P.P. Hrushkov. *Vlijanie jekspluatacionnyh rezhimov traktornogo dvigatelja na iznosostojkost' osnovnyh ego detalej* [Influence of operating conditions of a tractor engine on the wear resistance of its main parts]. *Zapiski LSHI* [Notes of the Leningrad Agricultural Institute]. Leningrad. 1971. Vol. 174. Issue 3. Pp. 70–74. [In Russian]
7. A.K. Kostin, V.V. Larionov, L.I. Mihajlov. *Teplonaprjazhennost' dvigatelej vmutrennego sgoranija: Spravochnoe posobie* [Thermal intensity of internal combustion engines: A reference manual]. Leningrad. Mashinostroenie ["Engineering Industry" Publishers]. 1979. 220 p.
8. A.S. Shikin. *Snizhenie mehanicheskij i teplovoj naprjazhennosti detalej forsirovannogo dizelja dvojnogo naznachenija 4ChN15/20.5 umensheniem stepeni szhatija* [Reducing the mechanical and thermal stress of the parts of the 4CHN15/20.5 dual-purpose forced diesel engine by reducing the compression ratio]. *Problemy jekspluatcii i obsluzhivanija transportno-tehnologicheskij mashin: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskij konferencii* [Problems of operation and maintenance of transport and technological machines: Materials of the international scientific and technical conference]. Tyumen. TGNU [Tyumen State Oil and Gas University]. 2009. Pp. 395–399. [In Russian]
9. A.A. Malozjomov, A.V. Naumov, G.A. Malozjomov. *Programmnoe obespechenie dlja imitacionnogo modelirovanija avtonomnyh teplojenergeticheskij ustanovok s porshnevnyimi dvigateljami* [Software for simulation of autonomous heat and power plants with piston engines]. *Zhurnal Santehnika, otopenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2019. No. 10. Pp. 32–36. [In Russian]