

НАГРУЗОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА ПРИРОДНОГО ГАЗА

LOAD CHARACTERISTICS OF A VEHICLE DIESEL ENGINE USING NATURAL GAS AS A FUEL

В.А. ЛИХАНОВ, д.т.н.
М.Л. СКРЯБИН, к.т.н.
А.В. ГРЕБНЕВ, к.т.н.

ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, Киров, Россия, lv99@mail.ru

V.A. LIHANOV, DSc in Engineering
M.L. SKRYABIN, PhD in Engineering
A.V. GREBNEV, PhD in Engineering

Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russia, lv99@mail.ru

В статье представлены нагрузочные характеристики дизеля Д-245.7 при работе по газодизельному процессу. Приведены графики изменения показателей процесса сгорания, характеристик тепловыделения, эффективных показателей. Проблема повышения стоимости бензина и дизельного топлива, ограниченность природных запасов нефти толкают к необходимости поиска альтернативных топлив для автомобильного транспорта. Среди всего перечня перспективных топлив много преимуществ есть у природного газа. Самое главное преимущество – низкая стоимость. Важно изучить вопросы перевода на природный газ дизельных двигателей, т.к. дизельный двигатель является наиболее распространенным в народном хозяйстве. Самым подходящим способом перевода дизелей на природный газ является реализация газодизельного рабочего процесса, так как она не требует существенной переделки двигателя.

В качестве объекта исследования выбран дизель Д-245.7. В процессе исследования в числе прочих были сняты нагрузочные характеристики данного дизеля при работе по газодизельному процессу. При анализе полученных экспериментальных данных у газодизельного процесса по сравнению с дизельным можно отметить некоторые особенности. На газодизельном процессе наблюдается повышение температуры и давления газов в цилиндре. Тепловыделение происходит намного быстрее. Это свидетельствует об объемном характере воспламенения и сгорания природного газа. Мощность двигателя при переходе на газодизельный процесс сохраняется на прежнем уровне, при этом потребление дизельного топлива за счет замещения природным газом снижается в несколько раз. Также газодизельному процессу свойственно снижение эффективного КПД, часового расхода воздуха, коэффициента избытка воздуха, температуры отработавших газов.

Ключевые слова: газодизель, природный газ, альтернативное топливо.

The article presents the load characteristics of the D-245.7 diesel engine when working on the gas-diesel process. The graphs of changes in the indicators of the combustion process, heat release characteristics, effective indicators are given. The problem of increasing the cost of gasoline and diesel fuel, the limited natural reserves of oil push to the need to find alternative fuels for automobile transport. Among the entire list of promising fuels, natural gas has many advantages. The most important advantage is low cost. It is important to study the issues of converting diesel engines to natural gas, as diesel engine is the most common in the national economy. The most suitable way to convert diesels to natural gas is to implement a gas-diesel working process, since it does not require a significant alteration of the engine. The diesel engine D-245.7 was selected as the object of study. During the study, among other things, the load characteristics of this diesel engine were taken while working on the gas-diesel process. When analyzing the experimental data obtained in the gas-diesel process compared to the diesel one, some features were noted. At the gas-diesel process, an increase in temperature and gas pressure in the cylinder is observed. Heat dissipation happens much faster. This indicates the volumetric nature of the ignition and combustion of natural gas. Engine power during the transition to the gas-diesel process is maintained at the same level, while the consumption of diesel fuel due to the substitution of natural gas is reduced by several times.

Keywords: gas diesel, natural gas, alternative fuel.

Введение

В настоящее время увеличение стоимости дизельного топлива и бензина, ограниченность запасов нефти повышают актуальность работ по переводу автотранспорта на альтернативные виды топлива. Одним из таких топлив является природный газ. Стоимость природного газа на автомобильных заправках в настоящее время составляет менее 50 % стоимости бензина или дизельного топлива. Это при том, что расход природного газа получается сопоставимым.

В народном хозяйстве наиболее распространен грузовой и пассажирский автотранспорт с дизелями в качестве силовой установки. Перевод дизеля на питание природным газом проще всего осуществить по газодизельному процессу. Преимуществом такого способа перевода является возможность его применения для уже находящихся в эксплуатации дизелей при незначительной их модернизации, не затрагивающей существенного изменения конструкции.

Конструкция дизелей постоянно совершенствуется, степень форсирования увеличивается, удельная мощность возрастает. На автотранспорте все больше используются дизели, оснащенные системами наддува и промежуточного охлаждения воздуха на впуске. Перевод таких дизелей на природный газ уже частично исследован. Однако все еще остается не достаточно изученным вопрос перевода на природный газ высокофорсированных дизелей малой размерности.

Цель исследования

Анализ процессов, характеризующих перевод высокофорсированных дизелей малой размерности на питание природным газом.

Материалы и методы

В научно-исследовательской лаборатории Вятской ГСХА проведены работы по переводу автомобильного дизеля на природный газ в рамках общей темы «Улучшение эксплуатационных показателей дизелей путем применения альтернативных топлив».

Объектом исследования был выбран дизель Д-245.7 (4ЧН 11,0/12,5), устанавливаемый на автомобиле ГАЗ-3307, автобусы ПАЗ-3205. Данный дизель – с турбонаддувом и промежуточным охлаждением воздуха на впуске. Газодизельный процесс на этом двигателе был реализован следующим образом. Природный

газ подавался во впускной патрубке двигателя через дополнительно установленный смеситель-дозатор, запальное дизельное топливо подавалось штатными топливными форсунками. Нагрузочный режим двигателя изменялся количеством подаваемого природного газа, цикловое количество впрыскиваемого запального дизельного топлива на всех режимах работы оставалось неизменным [1, 2]. Экспериментальная установка (рис. 1) была оснащена комплектом приборов и оборудования, позволяющим определять мощностные, экономические, экологические показатели дизеля. Индикаторные диаграммы рабочего процесса снимались прибором МАИ-5А. Нагрузочный момент на коленчатом валу создавался электротормозным стендом SAK-N670.

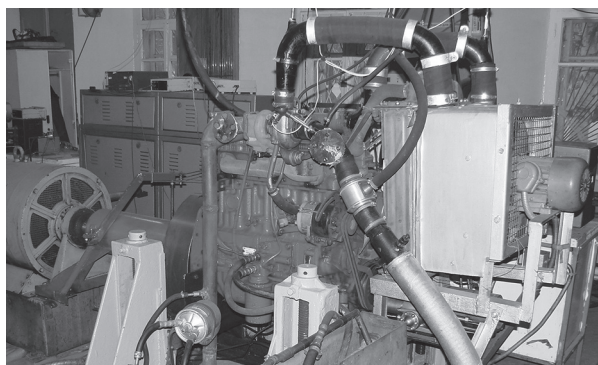


Рис. 1. Экспериментальная установка

Результаты и обсуждение

При проведении исследований одним из этапов было снятие нагрузочных характеристик. При снятии нагрузочных характеристик были определены показатели процесса сгорания, характеристики тепловыделения, эффективные показатели дизеля.

Показатели процесса сгорания

На рис. 2, а представлены совмещенные графики показателей процесса сгорания при номинальной частоте вращения ($n = 2400 \text{ мин}^{-1}$) в зависимости от изменения нагрузки для двух рабочих процессов. Первый процесс – дизельный, работа только на дизельном топливе. Второй процесс – газодизельный, работа на природном газе с подачей запальной порции дизельного топлива. Показатели процесса сгорания определялись при обработке индикаторных диаграмм [3].

На графиках представлены: максимальная осредненная температура газов в цилиндре

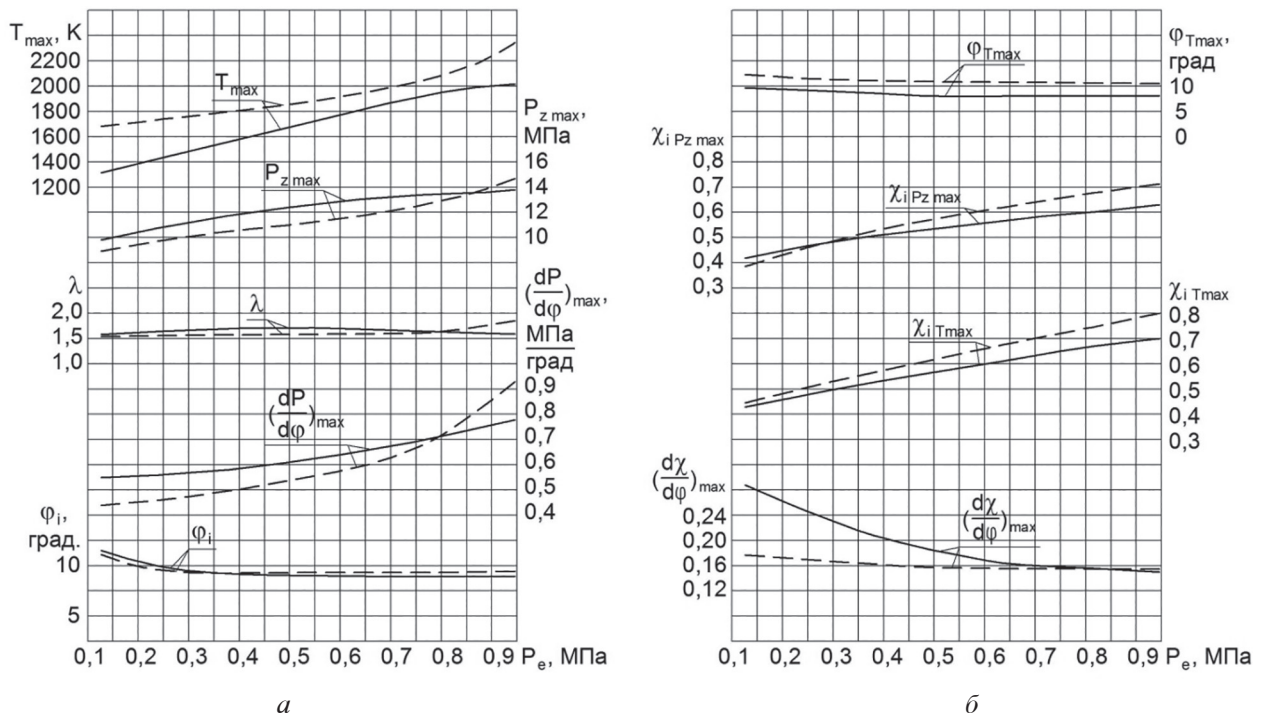


Рис. 2. Показатели процесса сгорания (а) и характеристики тепловыделения (б) дизеля Д-245.7 при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$:
 — — — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс

T_{\max} ; максимальное давление сгорания $p_{z \max}$; степень повышения давления λ ; максимальная скорость увеличения давления газов $(dp/d\phi)_{\max}$; период задержки воспламенения ϕ_i ; среднее эффективное давление p_e .

Анализируя показатели газодизельного процесса, можно отметить следующее. Значения максимальной температуры газов T_{\max} газодизельного процесса лежат выше значений дизельного. Так, на малой нагрузке ($p_e = 0,126 \text{ МПа}$) величина T_{\max} составляет 1680 К (увеличение на 28 %), на номинальной нагрузке ($p_e = 0,947 \text{ МПа}$) величина T_{\max} составляет 2350 К (увеличение на 16 %). Максимальное давление сгорания $p_{z \max}$ при $p_e = 0,126 \text{ МПа}$ составляет 8,9 МПа (на 9 % ниже дизельного процесса), а при $p_e = 0,947 \text{ МПа}$ составляет 14,6 МПа (на 6 % выше). Величина степени повышения давления λ в интервале нагрузок от $p_e = 0,126 \text{ МПа}$ до $p_e = 0,947 \text{ МПа}$ у газодизельного процесса соответственно изменяется от 1,55 до 1,85. Величина $(dp/d\phi)_{\max}$ изменяется от 0,44 до 0,93 МПа/градус поворота коленчатого вала (п.к.в.). Период задержки воспламенения изменяется от 10,8 до 9,5 градусов п.к.в.

Причиной отличия графиков газодизельного процесса от графиков дизельного является объемный механизм воспламенения и сгорания природного газа. Существенное повышение показателей наблюдается в основ-

ном на режиме больших нагрузок, когда доля природного газа в суммарном количестве подаваемого в цилиндр топлива становится значительной.

Также необходимо отметить, что достигаемые значения температуры T_{\max} и давления газов в цилиндре $p_{z \max}$ при газодизельном процессе лежат ниже максимальных значений допустимых для двигателей внутреннего сгорания. То есть повышение температуры и давления в цилиндре не должно отразиться на ресурсе двигателя. Величина $(dp/d\phi)_{\max}$ газодизельного процесса также не превышает установленного заводом-изготовителем максимального допустимого значения в 1,0 МПа/град.

Характеристики тепловыделения

На рис. 2, б представлены характеристики тепловыделения дизельного и газодизельного процессов. Данные характеристики рассчитаны на основании полученных индикаторных диаграмм и показателей процесса сгорания в соответствии с методикой ЦНИДИ.

На графиках представлены: угол поворота коленчатого вала относительно верхней мертвой точки в момент достижения в цилиндре максимальной температуры $\phi_{T_{\max}}$; активное выделение теплоты в момент достижения в цилиндре максимального давления сгорания $\chi_i p_{z \max}$; активное выделение теплоты в момент

достижения максимальной температуры $\chi_{i T_{max}}$; максимальная скорость относительного тепловыделения $(d\chi/d\varphi)_{max}$.

Как видно из рисунка, графики газодизельного процесса отличаются от графиков дизельного процесса. В интервале нагрузок от $p_e = 0,126$ МПа до $p_e = 0,947$ МПа угол $\varphi_{T_{max}}$ на газодизельном процессе изменяется, соответственно, от 12,5 до 10,5 градуса п.к.в. Величина $\chi_{i Pz_{max}}$ изменяется от 0,38 до 0,71 относительных единиц. Величина $\chi_{i T_{max}}$ изменяется от 0,45 до 0,8 относительных единиц. Величина $(d\chi/d\varphi)_{max}$ изменяется от 0,177 до 0,155 относительных единиц на градус п.к.в.

Происходящее с ростом нагрузки увеличение значений $\chi_{i Pz_{max}}$ и $\chi_{i T_{max}}$, характерное как для дизельного, так и для газодизельного процессов, объясняется интенсификацией процесса сгорания, происходящей вследствие повышения температуры и давления на впуске у двигателя турбонаддувом. Значения характеристик тепловыделения газодизельного процесса больше значений дизельного по причине перехода к объемному механизму воспламенения и сгорания. На газодизельном процессе большая часть топлива расходуется в начальные фазы процесса сгорания в цилиндре [4].

Эффективные показатели

На рис. 3 представлены эффективные показатели дизельного и газодизельного процессов [5].

На графиках представлены: эффективная мощность двигателя N_e ; часовой и удельный расходы дизельного топлива на дизельном процессе G_T и g_e , соответственно; часовой и удельный суммарные расходы дизельного топлива и природного газа на газодизельном процессе $G_{T\Sigma}$ и $g_{e\Sigma}$, соответственно; часовой расход запального дизельного топлива на газодизельном процессе $G_{T_{зап}}$; эффективный КПД η_e ; часовой расход воздуха G_B ; коэффициент наполнения η_v ; коэффициент избытка воздуха α ; температура отработавших газов t_r ; давление наддува P_k ; температуры во впускном трубопроводе на выходе из турбокомпрессора t_H и на выходе из охладителя наддувочного воздуха $t_{охл}$.

Анализируя графики, можно сказать, что мощностные показатели газодизельного процесса полностью соответствуют дизельному. Для обоих процессов эффективная мощность N_e с ростом нагрузки пропорцио-

нально увеличивается от значения 12 кВт при $p_e = 0,126$ МПа до 90 кВт при $p_e = 0,947$ МПа.

В интервале нагрузок от $p_e = 0,126$ МПа до $p_e = 0,947$ МПа часовой суммарный расход дизельного топлива и природного газа $G_{T\Sigma}$ на газодизельном процессе изменяется, соответственно, от 9,6 до 18,8 кг/ч. Расход запального дизельного топлива $G_{T_{зап}}$ на газодизельном процессе является постоянным во всем диапазоне нагрузки и составляет 3,6 кг/ч. Таким образом, легко определить, что при переходе с дизельного на газодизельный процесс экономия дизельного топлива (за счет замещения его природным газом) будет достигать от 47 до 83 %. Удельный суммарный расход топлива $g_{e\Sigma}$ при $p_e = 0,3$ МПа составляет 430 г/(кВт·ч), при $p_e = 0,947$ МПа составляет 208 г/(кВт·ч).

Из графиков видно, что расход топлива на газодизельном процессе на малой и средней нагрузке больше, чем на дизельном, а на номинальной нагрузке – меньше. Меньшее значение расхода топлива на номинальной нагрузке объясняется только тем, что природный газ имеет большую теплотворную способность единицы массы, чем дизельное топливо. Но в целом ис-

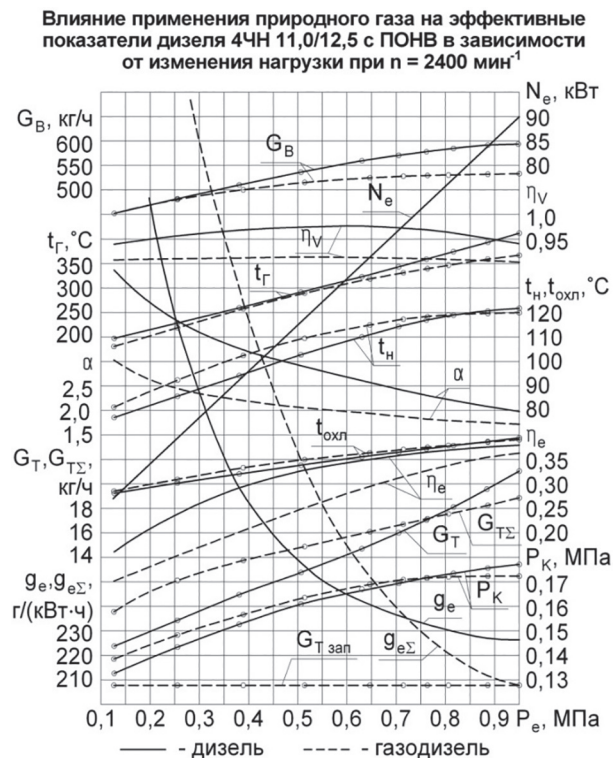


Рис. 3. Эффективные показатели дизеля Д-245.7 при $n = 2400$ мин⁻¹:
 — — — дизельный процесс;
 - - - газодизельный процесс

пользование теплотворной способности топлива на газодизельном процессе в двигателе со стандартными параметрами камеры сгорания происходит менее эффективно. Как видно из рисунка, график эффективного КПД η_e газодизельного процесса лежит ниже дизельного. Значения эффективного КПД газодизельного процесса составляют от 0,102 до 0,363.

На газодизельном процессе в интервале изменения нагрузки от $p_e = 0,126$ МПа до $p_e = 0,947$ МПа часовой расход воздуха G_B изменяется от 455 до 533 кг/ч. По сравнению с дизельным процессом часовой расход воздуха снижается вследствие замещения части воздуха во впускном трубопроводе природным газом. Снижение расхода воздуха в свою очередь приводит к снижению коэффициента наполнения η_v и коэффициента избытка воздуха α . На газодизельном процессе на всем диапазоне нагрузок величина η_v составляет около 0,91. Величина α изменяется от 3,03 до 1,69.

При переходе на газодизельный процесс снижается температура отработавших газов t_r (после турбокомпрессора). Ее значения составляют от 181 °С (при $p_e = 0,126$ МПа) до 367 °С (при $p_e = 0,947$ МПа). Давление и температура в точках впускного тракта при переходе с дизельного процесса на газодизельный практически не изменяются. Величина давления наддува P_K составляет от 0,138 до 0,172 МПа. Температура во впускном трубопроводе

на выходе из турбокомпрессора t_H составляет от 81 до 119 °С. Температура на выходе из охладителя наддувочного воздуха $t_{охл}$ составляет от 47 до 68 °С.

Результаты стендовых испытаний обобщены в таблице.

Выводы

Из представленного материала можно сделать следующие выводы:

1) адаптация серийного дизеля для работы по газодизельному процессу не требует значительной переделки его конструкции и заключается в основном только в установке на впускной патрубке газового смесителя-дозатора и перенастройке штатного ТНВД;

2) при работе дизеля по газодизельному процессу давление и температура в цилиндрах повышаются по сравнению с дизельным процессом, однако значения показателей не превышают предельных допустимых значений, установленных заводом-изготовителем, т.е. можно сказать, что ресурс двигателя сохраняется;

3) мощность двигателя на газодизельном процессе полностью соответствует дизельному процессу;

4) при работе двигателя по газодизельному процессу достигается значительное снижение расхода дизельного топлива за счет замещения природным газом, немного снижается эффективный КПД двигателя.

Таблица

Показатели работы дизеля Д-245.7 при $n = 2400$ мин⁻¹

Наименование показателя	Режим работы			
	дизельный процесс		газодизельный процесс	
	$p_e = 0,126$ МПа	$p_e = 0,947$ МПа	$p_e = 0,126$ МПа	$p_e = 0,947$ МПа
Максимальная температура газов в цилиндре, К	1310	2020	1680	2350
Максимальное давление в цилиндре, МПа	9,8	13,8	8,9	14,6
Степень повышения давления	1,58	1,60	1,55	1,85
Максимальная скорость нарастания давления, МПа/градус	0,55	0,78	0,44	0,93
Период задержки воспламенения, градусов поворота коленчатого вала	11,2	9,0	10,8	9,5
Эффективная мощность, кВт	12	90	12	90
Часовой расход топлива, кг/ч	6,8	21,0	9,6	18,8
Эффективный КПД	0,162	0,380	0,102	0,363
Часовой расход воздуха, кг/ч	455	591	455	533
Коэффициент избытка воздуха	4,86	2,0	3,03	1,69
Температура отработавших газов, °С	197	430	181	367

Литература

1. Лиханов В.А., Гребнев А.В., Бузмаков Ю.Г., Скрябин М.Л. Улучшение эффективных показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха при работе на природном газе // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 6. С. 19–21.
2. Лиханов В.А., Гребнев А.В., Скрябин М.Л., Торопов А.Е. Регулировочные характеристики дизеля при работе на природном газе // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 11. С. 3–9.
3. Гребнев А.В., Скрябин М.Л. Влияние применения природного газа на процесс сгорания дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха // Общество, наука, инновации. (НПК – 2015) [Электронный ресурс]: всерос. ежегод. науч.-практ. конф.: сб. материалов: общеконференц. секция, БФ, ХФ, ФСА, ФАМ, ЭТФ, ФАВТ, ФПМТ, ФЭМ, ФГСН, ЮФ, 13–24 апреля 2015 г. Вят. гос. ун-т. Киров, 2015. С. 948–952.
4. Лиханов В.А., Гребнев А.В., Скрябин М.Л., Торопов А.Е. Скоростные характеристики автомобильного дизеля при работе на природном газе // Известия МГТУ «МАМИ». 2017. № 4 (34). С. 39–45.
5. Лиханов В.А., Гребнев А.В., Скрябин М.Л. Улучшение эффективных и экологических показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха при работе на природном газе: монография / под общ. ред. проф. В.А. Лиханова. Киров: Вятская ГСХА, 2010. 248 с.

References

1. Lihanov V.A., Grebnev A.V., Buzmakov YU.G., Skryabin M.L. Improving the effective performance of a 4CHN 11,0/12,5 diesel engine with intermediate cooling of charge air when operating on natural gas. *Traktory i sel'sko-hozyajstvennye mashiny*. 2008. No 6, pp. 19–21.
2. Lihanov V.A., Grebnev A.V., Skryabin M.L., Tоропов A.E. Adjustment characteristics of a diesel engine operating on natural gas. *Traktory i sel'hoz-mashiny*. 2017. No 11, pp. 3–9.
3. Grebnev A.V., Skryabin M.L. The effect of the use of natural gas on the combustion process of a 4CHN 11.0 / 12.5 diesel engine with intermediate cooling of charged air. *Obshchestvo, nauka, innovacii. (NPK – 2015) [Elektronnyj resurs]: vseros. ezhegod. nauch.-prakt. konf.: sb. materialov: obshcheuniversitet. sekcija, BF, HF, FSA, FAM, ETF, FAVT, FPMT, FEM, FGSN, YUF [Society, science, innovation. (NPK – 2015) [Electronic source]: All-Russian annual scientific and practical conference: collection of materials]*, 13–24 aprelya 2015 g. Vyat. gos. un-t. Kirov, 2015, pp. 948–952.
4. Lihanov V.A., Grebnev A.V., Skryabin M.L., Tоропов A.E. High-speed characteristics of diesel engine vehicle running on natural gas. *Izvestiya MG TU «MAMI»*. 2017. No 4(34), pp. 39–45.
5. Lihanov V.A., Grebnev A.V., Skryabin M.L. Uluchshenie effektivnyh i ekologicheskikh pokazatelej dizelya 4CHN 11,0/12,5 s promezhutochnym ohlazhdeniem nadduvochnogo vozduha pri rabote na prirodnom gaze [Improving the efficient and environmental performance of a 4CHN 11,0/12,5 diesel engine with intermediate cooling of charged air when operating on natural gas: monograph]. *Pod obshch. red. prof. V.A. Lihanova. Kirov: Vyatskaya GSKHA Publ.*, 2010. 248 p.