

УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИМЕНЕНИЕМ БИОТОПЛИВА

*В.А. Лиханов, д.т.н., проф., О.П. Лопатин, к.т.н, доц.,
Вятская государственная сельскохозяйственная академия*

В работе показаны преимущества и эффективность применения биотоплива различного состава в целях снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами малоразмерных высокооборотных дизельных двигателей. Разработаны рецептуры оптимального состава спирто-топливных эмульсий на основе водного раствора метилового (МТЭ) и этилового (ЭТЭ) спиртов, а также топливной смеси, состоящей из метанола и метилового эфира рапсового масла (МЭРМ). Эффективность применения альтернативных биотоплив указанного состава подтверждена результатами стендовых моторных испытаний дизелей размерности Ч11/12,5 и Ч10,5/12. Показано, что работа двигателей на альтернативных биотопливах, по сравнению с работой на стандартном дизельном топливе, обеспечивает сокращение выбросов вредных веществ с отработавшими газами, в следующих пределах: по NO_x — на 30–47 %, по CO — на 30–48 %, по дымности ОГ — в несколько раз. При этом мощность и эффективный КПД двигателей сохраняются практически неизменными. Снижение содержания углерода в составе альтернативных биотоплив обеспечивает сокращение выбросов в атмосферу углекислого газа (CO_2) более чем на 10 %.

Производство дизелей — одно из приоритетных направлений в машиностроении, поскольку обеспечивает решение целого ряда проблем: научно-технических, экономических, оборонных и других. Поскольку характеристики дизеля во многом определяют основные потребительские свойства эксплуатируемой техники, такие как высокая экономичность, ресурс, надежность, энергоэффективность, относительно низкий уровень вредных выбросов, то дизель еще долгое время будет оставаться безальтернативной энергетической установкой [1].

Необходимо отметить, что наметившаяся в последние годы тенденция укрепления обороноспособности страны непосредственно влияет на развитие и производство силовых установок с дизелями не только для вооруженных сил, но и для подвижного железнодорожного состава, автомобильного транспорта, а также машин, ис-



пользуемых в сельском хозяйстве, строительной отрасли и дорожном хозяйстве. Развитие и совершенствование конструкции дизельных двигателей предполагает не только повышение топливной экономичности, но и соответствие постоянно ужесточающимся нормам выбросов вредных веществ с отработавшими газами (ОГ): оксидов азота (NO_x), сажи (С), суммарных углеводородов (CH_x), оксида углерода (CO) и диоксида углерода (CO_2).

Мировой опыт решения экологических проблем при использовании дизельных двигателей включает различные направления, в том числе и использование альтернативных топлив. Постоянное ужесточение законодательных норм по ограничению эмиссии указанных токсичных компонентов ОГ дизелей, а также ограниченные запасы природных топливных ресурсов способствуют развитию исследований по созданию новых альтернативных топлив, а также совершенствованию топливных систем для организации рабочего процесса при горении этих топлив в дизелях. При этом все более массовое применение находят альтернативные биотоплива, основанные на спиртах и растительных маслах (рапсовом, подсолнечном, соевом, арахисовом, пальмовом), а также их производные. Необходимо отметить, что в настоящее время проводятся исследования по переводу дизельных двигателей на биотопливо не только в странах, которые имеют ограниченный энергетический потенциал, но и в странах, где имеются большие запасы нефти, а также в финансово благополучных странах, которые могут себе позволить приобретение разных альтернативных топлив [2].

Для двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на сегодняшний день достаточно перспективными выглядят топливные смеси с добавкой спиртов, таких как этанол (C_2H_5OH) и метанол (CH_3OH). К положительным свойствам метанола для применения в дизелях можно отнести наличие в его молекуле атома кислорода, что позволяет применять его как оксигенат (кислородсодержащий компонент), способствующий повышению полноты сгорания топлива и уменьшению вредных выбросов сажи и СО в продуктах сгорания. Этанол широко используется в пищевой промышленности, парфюмерии, медицине, химической промышленности, в бытовых условиях, кожевенном производстве, радиоэлектронике и конечно же в топливной промышленности. Применение спиртов в качестве альтернативного биотоплива для ДВС стало возможным в результате получения их доступным способом из сельскохозяйственных и пищевых отходов, и из природного газа. Но большие перспективы применения метанола и этанола в качестве моторных топлив состоят в снижении выбросов токсичных компонентов с ОГ [3].

Применение спиртов в качестве биотоплива в дизельных двигателях, как правило, приводит к снижению выбросов сажи. Дело в том, что в процессе диффузионного горения спирта в камере сгорания дизеля образуется меньше промежуточных продуктов (по сравнению с дизельным топливом), способствующих появлению углеводородов ацетиленового и ароматического ряда. Так же при горении спиртов (метилового и этилового) в значительной степени меньше образуется разных сернистых соединений. Спирты, обладающие более простой структурой и незначительными размерами молекул, характеризуются более «чистым сгоранием». Среди существующих альтернативных видов топлива не менее перспективны различные смеси биотоплива с дизельным топливом. Применению растительно-минеральных смесей в дизелях в какой то мере должно способствовать и то обстоятельство, что в настоящее время сельхозпредприятия вполне способны сами производить экологичное биотопливо не только для своей техники, но и для городского автотранспорта [4].

Растительные масла — это продукты, извлекаемые из растительного сырья и состоящие из триглицеридов жирных кислот и сопутствующих им веществ (фосфолипиды, свободные жирные кислоты, воски, стеролы, вещества, придающие окраску, и др.). В настоящее время альтернативное топливо в форме рапсового масла может также применяться в форме метилового и диметилового эфиров рапсового масла [5].

Работа двигателя на метиловом эфире рапсового масла (МЭРМ) характеризуется меньшим коксованием деталей камеры сгорания по сравнению с работой на этиловом эфире рапсового масла вследствие меньших значений молекулярной массы и вязкости. Однако распространение МЭРМ в странах Европы определяется, скорее всего, низкой себестоимостью метанола, используемого при его производстве [6]. По сравнению с другими альтернативными топливами стоимость метанола невысока, но основной его недостаток состоит в большой теплоте испарения (1100 кДж/кг) по сравнению с теплотой парообразования дизельного топлива (250 кДж/кг). Низкое цетановое число метанола и большая теплота его испарения приводит к увеличению периода задержки воспламенения. Поэтому для воспламенения метанола используют дополнительные источники воспламенения, например подачу метанола на впуск, установки различных катализаторов и другие методы, способствующие снижению температуры воспламенения и ускоряющие процесс воспламенения и горения. Еще одним эффективным способом воспламенения метанола является подача запальной порции штатного дизельного топлива в камеру сгорания [7].

Требуемые физико-химические свойства альтернативного биотоплива обеспечиваются применением соответствующих технологий, способных обеспечить эксплуатационные, экономические и экологические показатели дизеля. При этом полученные из растительных масел биотоплива по физико-химическим показателям (некоторые из них представлены в табл. 1 [2]) должны быть приближены к показателям штатного топлива.

Так, представленные данные в табл. 1 наглядно демонстрируют близкие значения плотности биотоплива и дизельного топлива, однако существенно различаются по кинематической вязкости, низшей теплоте сгорания и цетановому числу. С учетом столь существенных различий в моторных свойствах биотоплива его применение в чистом виде нецелесообразно, поэтому было

Таблица 1

Физико-химические характеристики биотоплива и дизельного топлива

Параметры	Метанол	Этанол	Рапсовое масло	МЭРМ	Дизельное топливо
Плотность при 20 °С, кг/м ³	791–792	789	877	860–900	863
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с	0,73	1,51	80	12	3,0–6,0
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	19,7	26,8	36,7	37,2	42,5
Цетановое число	3	8	44	51	45

принято решение о применении биотоплива в форме спирто-топливных эмульсий (СТЭ) и МЭРМ в сочетании с метанолом, что позволяет приблизить значения физико-химических свойств биотоплива к свойствам штатного дизельного топлива.

Целью данной работы является улучшение экологических показателей дизельных двигателей и экономия нефтяного моторного топлива за счет применения биотоплива.

Для проведения исследований был создан экспериментальный моторный стенд в научно-исследовательской лаборатории испытаний дизелей кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов Вятской государственной сельскохозяйственной академии. Стенд оборудован электротормозом SAK-N670 с балансирным маятниковым механизмом и оснащен необходимой измерительной аппаратурой. Приготовление эмульсий осуществлялось гомогенизатором MPW-302 при частоте вращения вала 2000 об/мин. Анализ состава ОГ осуществляется автоматической системой газового анализа (АСГА-Т). Дымность ОГ измерялась с помощью дымомера «BOSCH-EFAW-68A». При работе на смеси метанола и МЭРМ дизель оборудовался дополнительной системой подачи запальной порции МЭРМ, что позволяло обеспечить полное замещение нефтяного дизельного топлива [8].

При испытаниях дизеля 4Ч11/12,5 на спирто-топливной эмульсии применялся следующий состав: спирт (метанол либо этанол) — 25 %; моюще-диспергирующая присадка сукцинимид С-5А — 0,5 %; вода — 7 %; дизельное топливо — 67,5 %. Для дизеля 2Ч10/12 было разработано экологичное биотопливо, состоящее из метанола (88 %) и запальной порции МЭРМ (12 %) [9, 10].

На рис. 1 представлены рабочие параметры дизеля 4Ч11/12,5 при работе на номинальной нагрузочной характеристике ($n = 2200$ об/мин). Анализируя эффективные параметры дизеля при работе на СТЭ, следует отметить, что его эффективная мощность сохраняется и соответствует мощности дизельного процесса при увеличении часового G_T и удельного эффективного расхода топлива g_e . Так, например, при переходе с дизельного топлива на метанолотопливную эмульсию (МТЭ) при минимальной нагрузке ($p_e = 0,13$ МПа) G_T повышается в 2,0 раза, а при нагрузке, равной 0,70 МПа, на 21,2 %. Часовой расход дизельного топлива в составе СТЭ ($G_{DTприв}$) при малых нагрузках

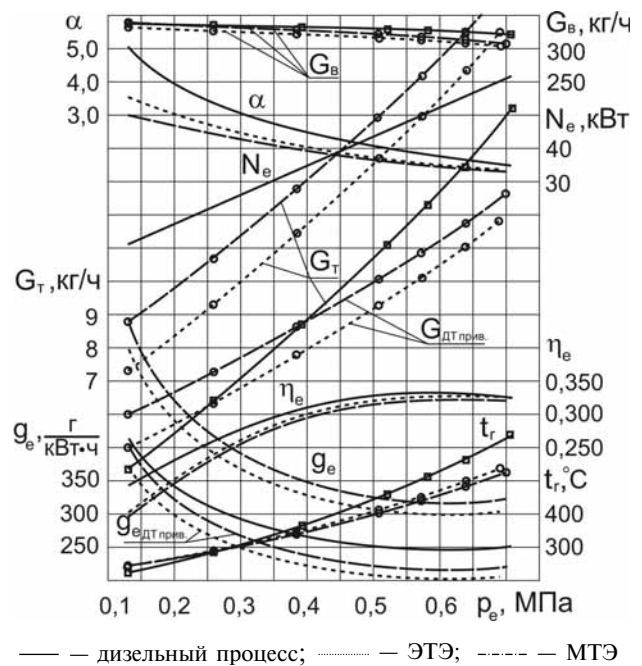


Рис. 1. Рабочие параметры номинальной нагрузочной характеристики дизеля 4Ч11/12,5 ($n = 2200$ об/мин и $\theta_{впр} = 23^\circ$)

растет по отношению к дизельному процессу, а при средних и максимальных снижается. Величина же удельного эффективного расхода топлива в составе СТЭ ($g_{e\text{ ДТприв}}$) ниже, чем в дизельном процессе во всем диапазоне нагрузок. Работа на СТЭ характеризуется снижением часового расхода воздуха G_b , коэффициента избытка воздуха α , эффективного коэффициента полезного действия η_e и температуры отработавших газов t_r .

На рис. 2 представлены характеристики выбросов вредных веществ при работе дизеля 4Ч11/12,5 на номинальной характеристике. Анализируя графики токсичности и дымности ОГ дизеля при работе на СТЭ, следует отметить уменьшение содержания во всем диапазоне нагрузок оксидов азота NO_x , дымности ОГ, диоксида углерода CO_2 и оксида углерода CO , при этом отмечен рост суммарных углеводородов CH_x .

Таблица 2

Результаты исследований показателей токсичности и дымности ОГ дизеля 4Ч11/12,5 ($\theta_{впр} = 23^\circ$, $n = 2200$ об/мин, $p_e = 0,64$ МПа)

Топливо	Показатели			
	Оксиды азота NO_x , ppm	Дымность, FSN	CO_2 , %	CO , %
Дизельное	1100	5,8	10,9	0,21
МТЭ	775 (снижение на 29,6 %)	0,9 (снижение в 6,4 раза)	9,8 (снижение на 10,1 %)	0,11 (снижение на 47,6 %)
ЭТЭ	657 (снижение на 40,3 %)	1,2 (снижение в 4,8 раза)	8,0 (снижение на 26,6 %)	0,15 (снижение на 28,6 %)

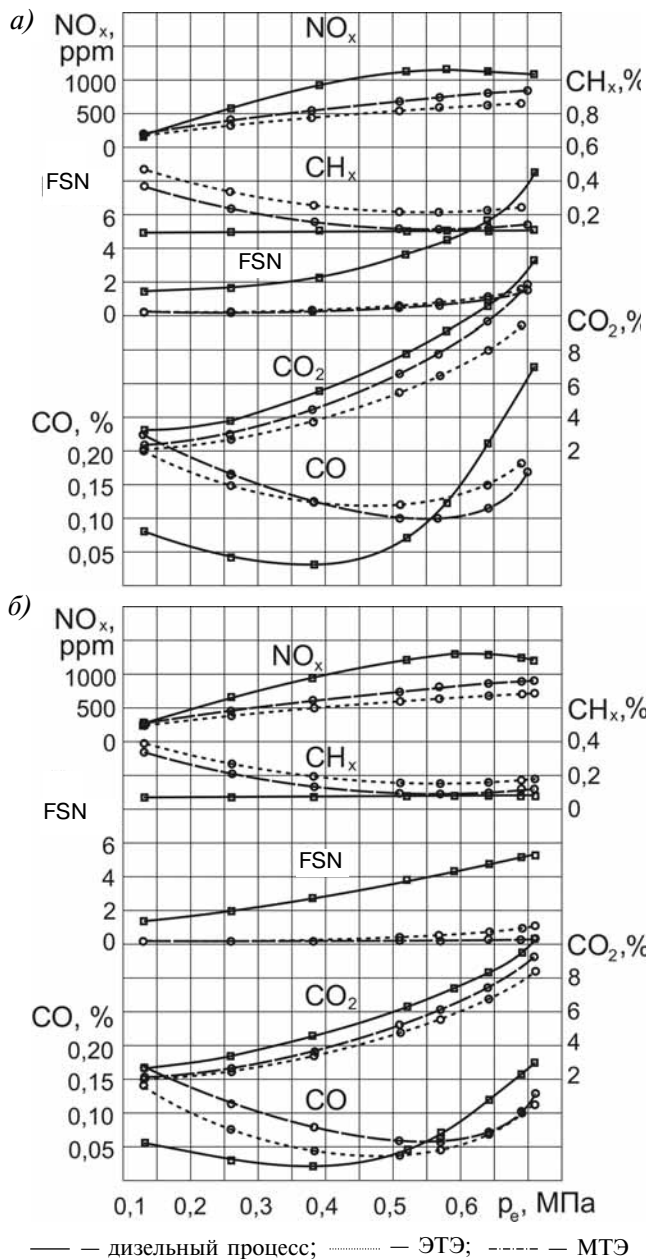


Рис. 2. Изменение концентрации токсичных компонентов при работе дизеля 4Ч11/12,5 по нагрузочным характеристикам:
 а — $n = 2200$ об/мин; б — $n = 1700$ об/мин;
 $\Theta_{\text{впр}} = 23$ град ПКВ

На рис. 3 представлены значения эффективных рабочих параметров дизеля 2Ч10,5/12 при работе на метаноле и МЭРМ по внешней скоростной характеристике. На графиках (рис. 3) показано увеличение на всех скоростных режимах суммарных часового $G_{\text{ТЭ}}$ и удельного $g_{\text{еС}}$ расходов топлива при работе на метаноле и МЭРМ, что обусловлено меньшей теплотворной способностью метанола и МЭРМ по сравнению с дизельным топливом. Работа дизеля на данном смесевом биотопливе характеризуется ростом эффективного КПД (на 6,2 %), что объясняется наличием

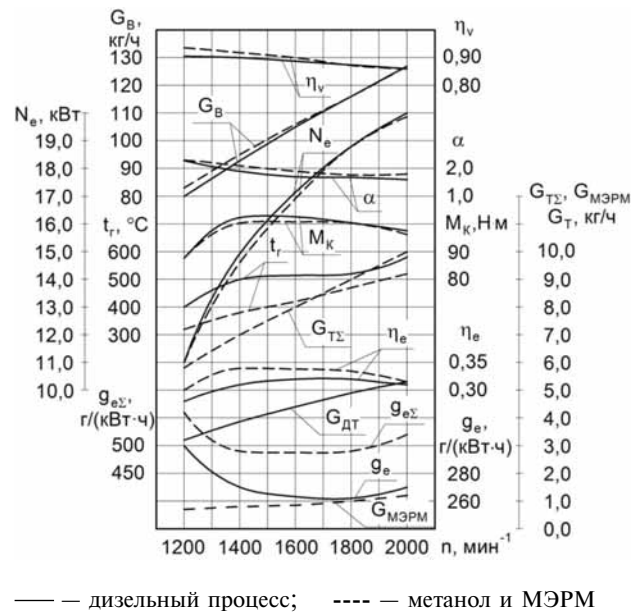


Рис. 3. Изменение эффективных рабочих параметров дизеля 2Ч10,5/12 при работе по внешней скоростной характеристике (для метанола и МЭРМ $\Theta_{\text{впр}} = 34$ град ПКВ)

кислорода в составе метанола и МЭРМ, участвующего в процессе сгорания топлива. Также можно отметить снижение температуры ОГ, незначительное увеличение коэффициента избытка воздуха α и часового расхода воздуха G_B в диапазоне частот вращения 1200–1700 об/мин, что приводит к росту коэффициента наполнения цилиндра η_v . Так, при $n = 1200$ об/мин происходит рост η_v на 4,7 % по сравнению с дизельным процессом.

На рис. 4 представлено изменение концентрации токсичных компонентов при работе дизеля 2Ч10,5/13 на смеси метанола и МЭРМ по нагрузочным характеристикам. Анализируя графики токсичности и дымности ОГ дизеля при работе на метаноле с МЭРМ на номинальном скоростном режиме ($n = 1800$ об/мин, рис. 4, а) можно наблюдать снижение содержания во всем диапазоне нагрузок оксидов азота и дымности ОГ. Работа на смеси метанола и МЭРМ характеризуется снижением оксида углерода СО при нагрузке, превышающей 0,47 МПа, и суммарных углеводородов СН_x на максимальных нагрузках при $p_e > 0,60$ МПа. При этом отмечен незначительный рост концентрации диоксида углерода СО_2 во всем диапазоне нагрузок. Работа на нагрузочной характеристике, соответствующей режиму максимального крутящего момента ($n = 1400$ об/мин, рис. 4, б) при использовании смеси метанола и МЭРМ характеризуется снижением СО_2 , NO_x и дымности ОГ (кроме режима максимальной нагрузки $p_e = 0,69$ МПа) и СО при $p_e > 0,55$ МПа, при этом отмечен рост СН_x .

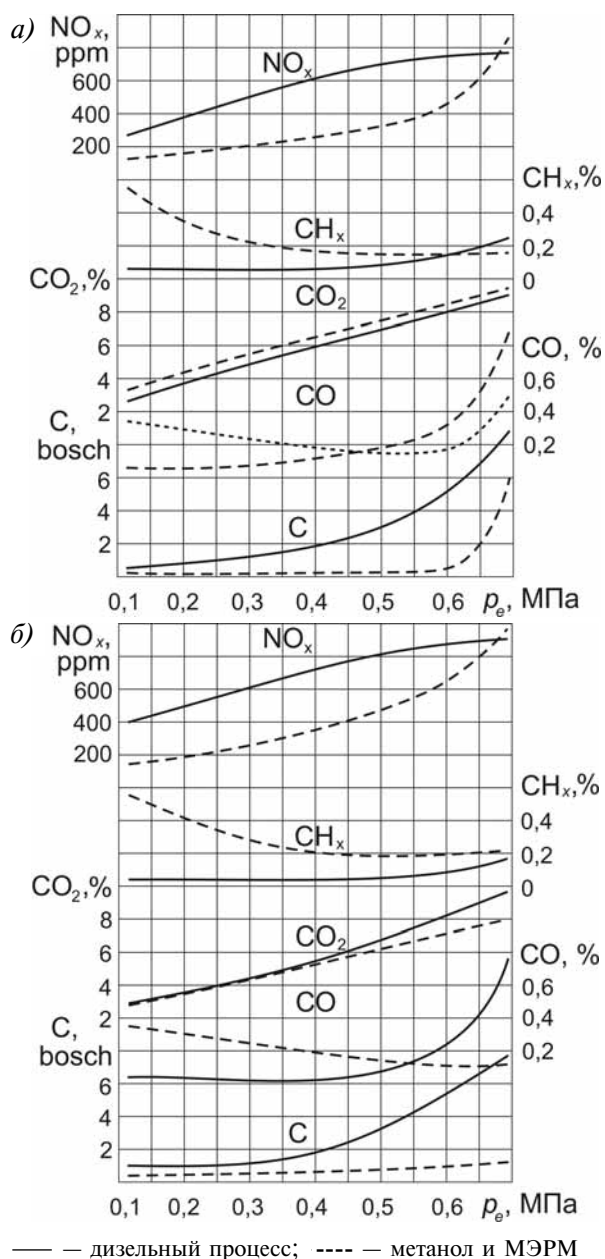


Рис. 4. Изменение концентрации токсичных компонентов при работе дизеля 2410,5/12 по нагрузочным характеристикам:

а — $n = 1800$ об/мин; б — $n = 1400$ об/мин; ($\theta_{впр} = 34^\circ$ для метанола и МЭРМ)

Таблица 3

Результаты исследований экологических показателей дизеля 2410,5/12 ($\theta_{впр} = 34^\circ$ для метанола и МЭРМ), $n = 1800$ об/мин, $p_e = 0,59$ МПа)

Топливо	Показатели		
	NO _x , ppm	C, Bosch	CO, %
Дизельное	760	5,0	0,29
Метанол 88 %, МЭРМ 12%	400 (снижение на 47,4 %)	0,48 (снижение на 90,4 %)	0,16 (снижение на 44,8 %)

Результаты измерений выбросов вредных веществ дизеля 2410,5/12 сведены в табл. 3.

Выводы

Разработано и экспериментально подтверждено перспективное предложение по улучшению экологических показателей малоразмерных, высокооборотных дизелей, работающих на биотопливе следующих составов:

- СТЭ: спирт (метанол либо этанол) — 25 %, моюще-диспергирующая присадка сукцинимид С-5А — 0,5 %, вода — 7 %, дизельное топливо — 67,5 %;
- метанол — 88 %, МЭРМ — 12 %.

При работе дизеля на биотопливах указанного состава достигнуто:

- при работе на СТЭ снижение содержания в ОГ — оксидов азота на 40,3 %, дымности ОГ в несколько раз, диоксида углерода на 26,6 %, оксида углерода на 28,6 %;
- при работе на МТЭ — оксидов азота на 29,6 %, дымности ОГ в несколько раз, диоксида углерода на 10,1 %, оксида углерода на 47,6 %;
- при работе на смеси метанола и МЭРМ — оксидов азота на 47,4 %, дымность в два раза, оксида углерода на 44,8 %.

Литература

1. Sivakumar M., Ramesh kumar R., Syed Thasthagir M.H., Shanmuga Sundaram N. Effect of aluminium oxide nanoparticles blended pongamia methyl ester on performance, combustion and emission characteristics of diesel engine // Renewable Energy. — 2018. — V. 116. — P. 518–526.
2. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях: монография / В.А. Марков, С.Н. Деянин, В.Г. Семенов, А.В. Шахов, В.В. Багров. — М.: ООО НИЦ «Инженер» (Союз НИО), ООО «Оникс-М», 2011. — 536 с.
3. Starik A.M., Savel'ev A.M., Favorskii O.N., Titova N.S. Analysis of emission characteristics of gas turbine engines with some alternative fuels // International Journal of Green Energy. — 2018. — V. 15. — № 3. — P. 161–168.
4. Romanyuk V., Likhanov V.A., Lopatin O.P. Reducing the environmental threat of motor vehicles by converting engines for operating on natural gas // Теоретическая и прикладная экология. — 2018. — № 3. — С.27–32.
5. Diesel-to-natural gas engine conversion with lower compression ratio / G.G. Ter-mkrtichyan, A.M. Saikin, K.E. Karpukhin [et al.] // Pollution Research. — 2017. — V. 36. — № 3. — P. 678–683.
6. Presser C., Nazarian A., Millo A. Laser-driven calorimetry measurements of petroleum and biodiesel fuels // Fuel. — 2018. — V. 214. — P. 656–666.
7. Лиханов В.А., Копчиков В.Н., Фоминых А.В. Применение метанола и метилового эфира рапсового масла для работы дизеля 2410,5/12,0. — Киров: Вятская ГСХА, 2017. — 226 с.
8. Likhanov V.A., Lopatin O.P. The Study of the Process of Combustion of the Alcohol-Fuel Emulsions and Natural Gas in a Diesel Engine // International Journal of Applied Engineering Research. — 2018. — V. 13. — № 3. — P.1703–1709.
9. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Use of Natural Gas, Methanol, and Ethanol Fuel Emulsions as Environmentally Friendly Energy Carriers for Mobile Heat Power Plants // Thermal Engineering. — 2017. — V. 64. — № 12. — P. 935–944.
10. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Study of Loading Regimes of Diesel Engines Operating on Natural Gas // International Journal of Applied Engineering Research. — 2018. — V. 13. — № 5. — P. 2936–2939.