

УДК 621.436

СКОРОСТНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ НА ГАЗОМОТОРНОМ ТОПЛИВЕ

Лопатин О.П., доктор технических наук, профессор

E-mail: nirs_vsaa@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Вятский государственный агротехнологический университет»,
г. Киров, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследований скоростных режимов тракторного дизельного двигателя с турбонаддувом на газомоторном топливе. Экспериментальные характеристики мощностных и экономических показателей, токсичности и дымности отработавших газов, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, процесса сгорания доказывают перспективность применения газомоторного топлива в тракторном дизельном двигателе с турбонаддувом не только с экономической стороны, но и эффективно решают экологическую проблему по снижению токсичных выбросов.

Ключевые слова: тракторный дизельный двигатель, газомоторное топливо, турбонаддув, отработавшие газы, токсичность, оксиды азота, мощность, экономичность, процесс сгорания.

HIGH-SPEED MODES OF OPERATION OF A TURBOCHARGED TRACTOR DIESEL ENGINE WITH GAS ENGINE FUEL

Lopatin O.P., doctor of technical sciences, professor

E-mail: nirs_vsaa@mail.ru

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Vyatka State Agrotechnological University», Kirov, Russia

Annotation. The results of studying the speed modes of a turbocharged tractor diesel engine with gas engine fuel are presented. The experimental characteristics of power and economic indicators, toxicity and smokiness of the exhaust gases, volume content and mass concentration of nitrogen oxides, the combustion process prove the prospects of using gas engine fuel in a turbocharged tractor diesel engine not only from the economic side, but they also solve the environmental problem of reducing toxic emissions effectively.

Keywords: tractor diesel engine, gas engine fuel, turbocharging, exhaust gases, toxicity, nitrogen oxides, power, efficiency, combustion process.



Снижение воздействия автотракторного парка на окружающую среду – насущная и актуальная задача современного общества. Последствия этого воздействия сказываются не только на нашем поколении, но могут сказаться и в будущем, если не принять серьёзных мер по снижению и даже устранению последствий воздействия [1-4]. Применение газомоторного топлива может значительно помочь как решению текущей задачи, так и в решении проблемы экономии нефтяного моторного топлива. В связи с этим во всех промышленно развитых странах мира широко развернуты работы по поиску эффективных заменителей топлив нефтяного происхождения [5-8].

В Вятском государственном агротехнологическом университете на базе кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов проведены исследования по переводу тракторного дизельного двигателя с турбонаддувом для работы на газомоторном топливе [9-12].

Скоростные характеристики изменения мощностных и экономических показателей работы тракторного дизельного двигателя с турбонаддувом при работе по штатному (дизельному) и газомоторному процессам с включенным регулятором представлены на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что при работе по дизельному процессу при изменении частоты вращения коленчатого вала от 1200 до 2400 мин⁻¹ расход воздуха G_B возрастает с 200 до 490 кг/ч, или в 2,4 раза. Температура отработавших газов (ОГ) t_r в выпускном трубопроводе увеличивается с 350 до 490°C, рост температуры составляет 40%. Температура во впускном трубопроводе после турбокомпрессора t_k возрастает с 50 до 103°C, или в 2,1 раза. Коэффициент избытка воздуха α изменяется с 2,7 до 1,7, снижение при этом составляет 59%. Часовой расход топлива G_T изменяется с 6,5 до 18,4 кг/ч, или в 2,8 раза. Удельный эффективный расход топлива g_e возрастает со 198 до 218 г/кВт·ч, или на 10,1%. Эффективная мощность N_e возрастает от 30 до



80 кВт при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, т. е. в 2,6 раза, а затем резко снижается до 50 кВт при $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$.

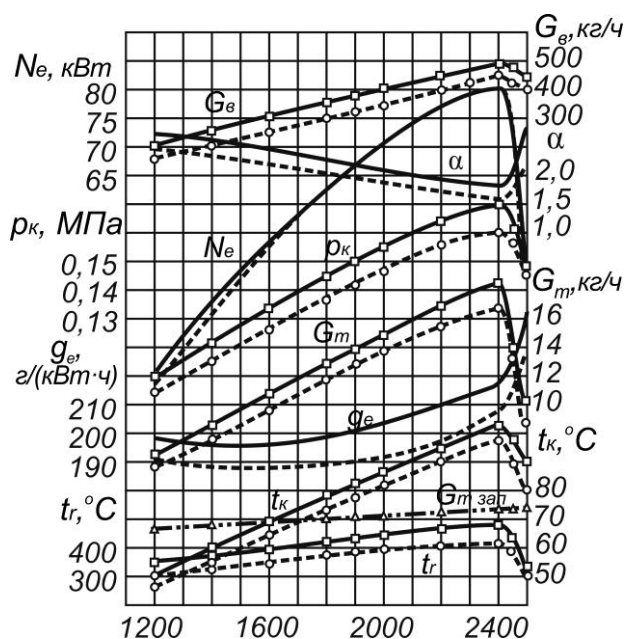


Рисунок 1 – Влияние применения газомоторного топлива на мощностные и экономические показатели работы тракторного дизельного двигателя с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала с включенным регулятором:

▣ — дизельный процесс; ○ — газомоторный процесс

При переходе на газомоторное топливо при изменении частоты вращения коленчатого вала от 1200 до 2400 мин^{-1} суммарный массовый расход топлива возрастает с 6 до 16,5 кг/ч, т. е. в 2,8 раза. Величина запального дизельного топлива возрастает с увеличением частоты вращения коленчатого вала. Так, на номинальной частоте вращения эта величина равна 3,2 кг/ч, рост составляет 77,7%. Это объясняется ростом числа циклов в единицу времени, а также повышением стабильности работы топливоподающей аппаратуры и снижением гидравлических потерь с увеличением частоты вращения. Часовой расход G_B



возрастает со 180 до 450 кг/ч, т. е. в 2,5 раза. При увеличении частоты вращения удельный эффективный расход топлива g_e растет со 190 до 209 г/кВт·ч, или на 10,5%. Температура ОГ t_r возрастает с 300 до 405°C, или на 35%.

Анализируя изменения значений эффективных показателей работы дизельного двигателя по дизельному и газомоторному процессам в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала с включенным регулятором, можно отметить следующее. При равных значениях эффективной мощности и крутящего момента (поскольку цели форсирования дизельного двигателя не было) во всем диапазоне частот вращения суммарный удельный эффективный расход топлива на газомоторном процессе ниже (при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ на 4,3%: $g_e = 209 \text{ г/кВт·ч}$ против $g_e = 218 \text{ г/кВт·ч}$), чем при дизельном процессе. С уменьшением частоты вращения коленчатого вала суммарный удельный эффективный расход топлива на газомоторном процессе также снижается (при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ на 5,2%: $g_e = 190 \text{ г/кВт·ч}$ против $g_e = 200 \text{ г/кВт·ч}$) в отличие от дизельного процесса. Это объясняется высокой удельной теплотой сгорания газа и снижением в связи с этим массового расхода топлива. Снижается также и суммарный часовой расход топлива для газодизеля, поскольку удельная теплота сгорания газа выше, чем у дизельного топлива, на 14%. При $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ $G_T = 17,1 \text{ кг/ч}$ для дизельного процесса и $G_T = 16,1 \text{ кг/ч}$ для газодизеля, снижение составляет 6,2%. При $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ $G_T = 14 \text{ кг/ч}$ для дизельного процесса и $G_T = 13 \text{ кг/ч}$ для газодизеля, снижение составляет 7,6%. Температура ОГ при газомоторном процессе ниже, чем при дизельном процессе, во всем диапазоне частот вращения. Часовой расход запального дизельного топлива изменялся от 1,7 до 2,9 кг/ч при изменении частоты вращения от $n = 200 \text{ мин}^{-1}$ до $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$. Таким образом, снижение расхода дизельного топлива за счет замещения его газом на всех скоростных режимах составило не менее 80%.



Коэффициент избытка воздуха α при работе на газомоторном топливе во всех диапазонах частот вращения имеет меньшие значения по сравнению с дизельным процессом. При $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ он имеет значения 1,6 и 1,8 соответственно, снижение составляет 12,5%. Можно сделать вывод, что газодизель работает на смеси более обогащенного состава.

Расход воздуха двигателем также снижается при переходе с дизельного на газомоторный процесс, что говорит о замещении воздуха, поступающего в цилиндры двигателя, природным газом. Расход воздуха на газомоторном процессе несколько ниже, чем на дизельном на всех частотах вращения коленчатого вала. Так, при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ для газодизеля $G_B = 450 \text{ кг/ч}$, для дизеля $G_B = 490 \text{ кг/ч}$, что на 8,8% выше.

Проведенное индицирование процесса сгорания газомоторного цикла [9] позволило установить, что сгорание газозвушной смеси при воспламенении ее запальным дизельным топливом происходит более активно, с большими скоростями и заканчивается быстрее. Это приводит, с одной стороны, к увеличению максимального давления сгорания p_z , а также характеристик сгорания и параметров тепловыделения; показывает, что при увеличении частоты вращения коленчатого вала $p_{z \text{ max}}$ снижается. С другой стороны, возрастает индикаторный КПД, поскольку потери тепла в данном случае уменьшаются. Суммарный часовой расход топлива дизельного двигателя при работе по газомоторному процессу снижается. Коэффициент избытка воздуха при газомоторном процессе лежит несколько ниже дизельного процесса во всем диапазоне изменения частот вращения коленчатого вала. Характер изменения крутящего момента M_k плавный, поскольку интервал частоты вращения, в котором работает двигатель по скоростной характеристике, достаточно велик. При работе на природном газе характер изменения крутящего момента в



зависимости от частоты вращения сохраняется. При этом значение максимального крутящего момента составляет 1900 мин^{-1} .

Скоростные характеристики изменения содержания токсичных компонентов в ОГ дизельного двигателя с турбонаддувом при работе по дизельному и газомоторным процессам представлены на рисунке 2.

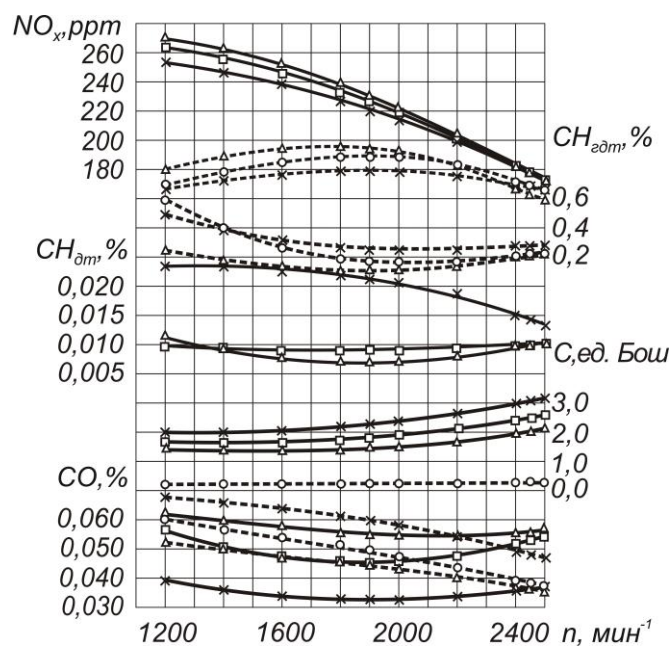


Рисунок 2 – Влияние применения газомоторного топлива на показатели токсичности ОГ тракторного дизельного двигателя с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала:

- ×—× – дизельный процесс $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$;
- – дизельный процесс $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$;
- ▲—▲ – дизельный процесс $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$;
- ×-----× – газомоторный процесс $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$;
- – газомоторный процесс $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$;
- ▲-----▲ – газомоторный процесс $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$.

Из графиков видно, что при работе по дизельному процессу изменение



значения установочного угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ) от 8 до 14° п.к.в. приводит к возрастанию содержания в ОГ оксидов азота NO_x при частоте вращения $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ с 252 до 270 ppm, т. е. на 7,1%, при увеличении частоты вращения коленчатого вала до $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ содержание оксидов азота на всех углах становится практически одинаковым и составляет 183 ppm. При $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ увеличение частоты вращения коленчатого вала от 1200 до 2500 мин^{-1} приводит к снижению содержания в ОГ NO_x с 265 до 170 ppm, т. е. на 35,8%.

При уменьшении $\Theta_{\text{впр}}$ от 14 до 8° содержание СН в ОГ возрастает во всем рассматриваемом диапазоне частот вращения. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 8^\circ$ содержание СН в ОГ меняется от 0,023% при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до 0,013% при $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$, т. е. снижается в 1,8 раза. А при $\Theta_{\text{впр}} = 14^\circ$ содержание СН в ОГ снижается от 0,012 до 0,007% при увеличении частоты вращения от 1200 до 1900 мин^{-1} , т. е. снижается в 1,7 раза, а затем возрастает до 0,010%, т. е. в 1,4 раза. При $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ содержание СН в ОГ практически не зависит от частоты вращения и составляет порядка 0,010%.

Анализируя изменения значений показателей токсичности ОГ в зависимости от частоты вращения на различных установочных УОВТ можно отметить следующее. При работе по газомоторному процессу содержание NO_x в ОГ ниже, чем при работе по дизельному процессу, во всем диапазоне частот вращения. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ увеличение частоты вращения от 1200 до 1800 мин^{-1} приводит к росту содержания NO_x в ОГ от 170 до 190 ppm, т. е. на 11,8%, а при повышении частоты вращения до 2500 мин^{-1} содержание NO_x в ОГ снова снижается до 170 ppm, т. е. на 10,5%. Чем больше установочный УОВТ, то есть раньше подается топливо, тем меньше содержание сажи в ОГ дизеля. При этом с увеличением частоты вращения содержание сажи в ОГ дизеля с турбонаддувом возрастает. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ при изменении частоты вращения от 1200 до 2500 мин^{-1} содержание сажи в ОГ возрастает от 1,7 до 2,5 ед. по шкале Bosch, т. е. в 1,5 раза.

При работе на газомоторном топливе содержание сажи практически не



зависит от частоты вращения и от значений установочного УОВТ и составляет 0,1 ед. по шкале Bosch. Содержание СО в ОГ дизеля также сильно зависит от значения установочного УОВТ. При $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ изменение частоты вращения от 1200 до 1900 мин^{-1} приводит к снижению содержания СО от 0,057 до 0,046%, т. е. в 1,2 раза, а затем возрастает до 0,055% при $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$, т. е. в 1,2 раза. Содержание СН в ОГ с увеличением частоты вращения снижается. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ содержание СН в ОГ снижается с 0,6 до 0,2%, т. е. в 3 раза, при повышении частоты вращения от 1200 до 2500 мин^{-1} . Содержание оксида углерода СО в ОГ с увеличением частоты вращения снижается. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ содержание СО в ОГ снижается с 0,060 до 0,038%, т. е. в 1,6 раза, при возрастании частоты вращения от 1200 до 2500 мин^{-1} .

При переходе с дизельного на газомоторный процесс при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ и $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, принятого нами за оптимальный, содержание NO_x в ОГ снижается со 183 до 172 ppm, т. е. на 6%. При $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$, $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,84 \text{ МПа}$ содержание оксидов азота NO_x при переходе с дизельного на газодизельный процесс снижается с 225 до 190 ppm, т. е. на 15,6%. Содержание сажи в ОГ снижается с 2,5 до 0,1 ед. по шкале Bosch, т.е. в 25 раз. При $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$, $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,84 \text{ МПа}$ содержание сажи в ОГ снижается с 2 до 0,1 ед. по шкале Bosch, т. е. в 20 раз. Содержание CH_x в ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ и $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ возрастает 0,010 до 0,17 %, т. е. в 17 раз. При уменьшении частоты вращения до $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ содержание СН в ОГ возрастает от 0,01 до 0,20 %, т. е. в 20 раз. Содержание СО при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ и $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ снижается с 0,046 до 0,039 %, т. е. в 1,2 раза, с уменьшением частоты до $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ содержание СО возрастает с 0,042 до 0,050%, т. е. на 19%.

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, максимальной температуры и давления в цилиндре тракторного дизельного двигателя с турбонаддувом при работе по дизельному и газомоторным



процессам в зависимости от изменения частоты вращения представлены на рисунке 3.

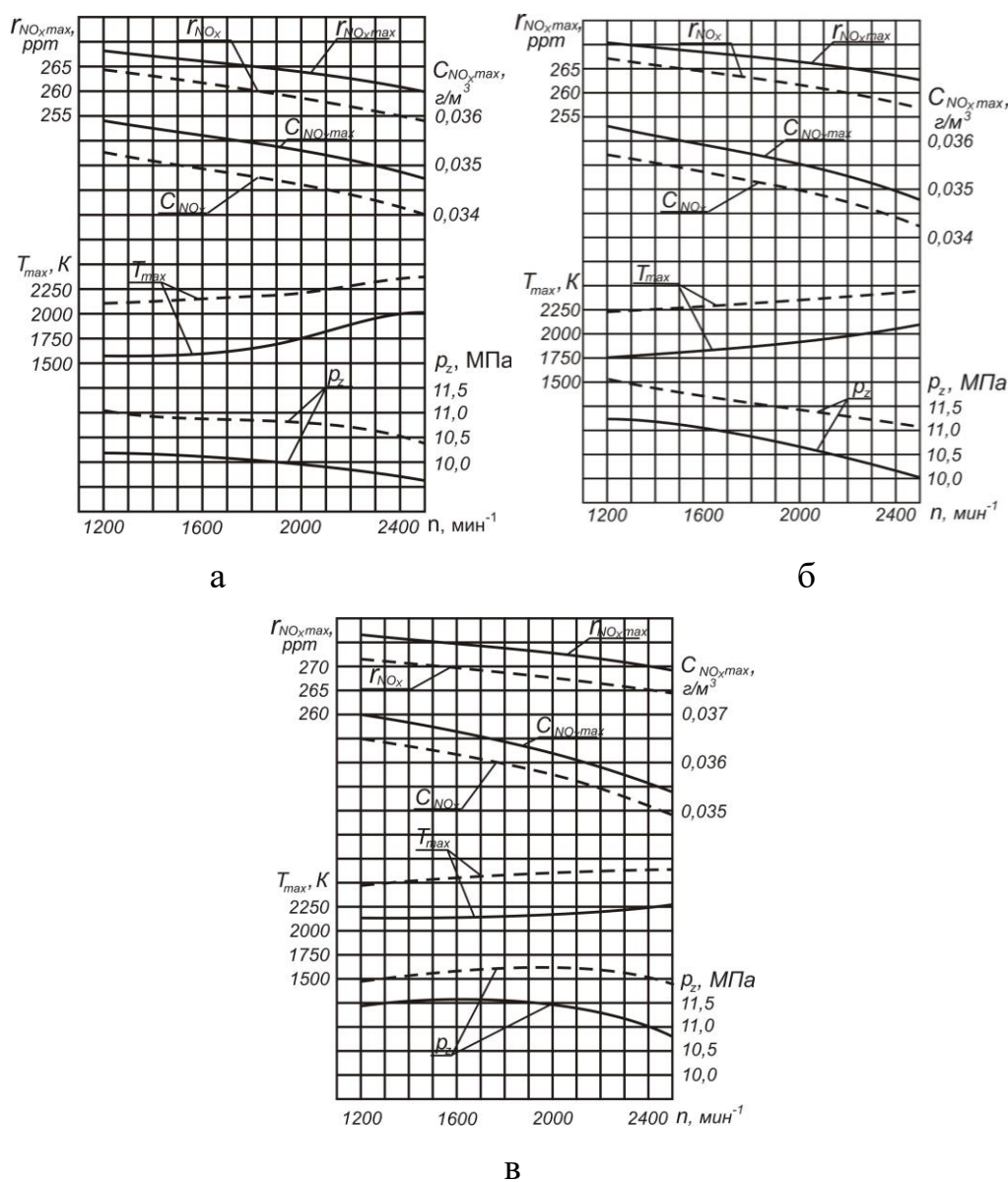


Рисунок 3 – Влияние применения газомоторного топлива на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре тракторного дизельного двигателя с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения:

а – $\Theta_{впр} = 8^\circ$; б – $\Theta_{впр} = 11^\circ$; в – $\Theta_{впр} = 14^\circ$;

— — дизельный процесс; - - - - газомоторный процесс



Из графиков видно, что с увеличением частоты вращения коленчатого вала двигателя происходит также снижение объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота и максимального давления газов в цилиндре, увеличение максимальной температуры цикла. Так, при работе по газомоторному процессу при увеличении частоты вращения коленчатого вала двигателя с 1200 до 2400 мин⁻¹ происходит уменьшение объемного содержания с 267 до 257 ppm и массовой концентрации оксидов азота с 0,0357 до 0,0344 г/м³. При переходе на газомоторный процесс объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота ниже в среднем на 3% во всем диапазоне изменения частот вращения коленчатого вала двигателя.

Выводы. На основании анализа полученных результатов можно сделать вывод, что применение газомоторного топлива в тракторном дизельном двигателе с наддувом в качестве альтернативного топлива эффективно, что позволяет надежно снизить токсичность ОГ. Так, при оптимальном установочном УОВТ при переходе на газомоторный процесс на номинальной частоте вращения происходит снижение содержания оксидов азота в отработавших газах на 6,0%, сажи – в 25 раз, оксида углерода – на 12,5%. При частоте вращения, соответствующей максимальному крутящему моменту, происходит снижение содержания оксидов азота в отработавших газах на 15,6% и сажи в 20 раз.

Список источников

1. A review on biofuels for light-duty vehicles in Europe / S. Puricellia, G. Cardellinib, S. Casadeic, D. Faedoc, A.E.M. van den Oeverb, M. Grossoa // Renewable and Sustainable Energy Reviews. V. 137. 2021. 110398.



2. Кульчицкий А. Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей. Владимир : Изд-во Владимирского государственного университета, 2000. 256 с.
3. An overview of physical and chemical features of diesel exhaust particles / Xiaochen Wang, Ying Wang, Yuanqi Baia, Peng Wang, Yuwei Zhaob // Journal of the Energy Institute. V.92. 2019. P. 1864–1888.
4. Работа дизелей на нетрадиционных топливах / В. А. Марков, А. И. Гайворонский, Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко. М. : Легион-Автодата, 2008. 464 с.
5. Regulating characteristics of a diesel engine working on natural gas / A.V. Grebnev, V. A. Likhanov, M. L. Skryabin, O. M. Kochurova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 62058.
6. Skryabin M. L., Likhanov V. A., Poyarkov M. S. Comprehensive analysis of exhaust gas toxicity of heat engines and methods for neutralizing nitrogen oxides // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. 62095.
7. Likhanov V. A., Fominykh A. V., Kopchikov V. N. Environmental performance of biofuel engine // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 62012.
8. Ways to reduce the "carbon footprint" of diesel vehicles / A. Rossokhin, V. Likhanov, G. Mikheev, P. Zaitsev, S. Alatyrev // Transportation Research Procedia. 2022. P. 224–228.
9. Lopatin O. P. Development of tractor gas-diesel modifications // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 548. 2020. 062034.
10. Analysis of the physical properties, composition and structure of soot particles / V. A. Likhanov, O. P. Lopatin, A. S. Yurlov, A. G. Terentiev, R. V. Andreev // Journal of Physics: Conf. Series 2094. 2021. 052070.



11. Lopatin O. P. Calculation of the process of nitrogen oxides formation during combustion of methanol in the engine // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 919. 2020. -062011.
12. Simulation of soot formation in a tractor diesel engine running on rapeseed oil methyl ether and methanol / V. A. Likhanov, O. P. Lopatin, A. S. Yurlov, N. S. Anfilatova // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 839. 2021. 052057.

