

УДК 621.436

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ РЕЖИМОВ ТРАКТОРНОГО ГАЗОДИЗЕЛЯ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

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. В работе представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию применения сжатого природного газа и рециркуляции отработавших газов на мощностные и экономические показатели, характеристики процесса сгорания и тепловыделения, токсичность и дымность отработавших газов тракторного дизеля на различных нагрузочных режимах при номинальной частоте вращения коленчатого вала. На основании экспериментальных исследований рабочего процесса тракторного газодизеля при работе с рециркуляцией отработавших газов установлена закономерность подачи рециркулируемых газов и определены параметры оптимальных регулировочных показателей.

Ключевые слова: тракторный дизель, сжатый природный газ, рециркуляция отработавших газов, отработавшие газы, токсичность, мощность, экономичность, процесс сгорания, тепловыделение.

INVESTIGATING THE LOAD MODES OF A TRACTOR GAS DIESEL WITH THE EXHAUST GAS RECIRCULATION

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 paper presents the results of experimental studies on the effect of using the compressed natural gas and the exhaust gas recirculation on power and economic indicators, characteristics of the combustion and heat generation process, toxicity and smokiness of exhaust gases of a tractor diesel under various load modes at the crankshaft nominal speed. Based on the experimental studies of the working process of a tractor gas diesel when operating with the exhaust gas recirculation, the regularity of the recycled gases supply has been established and the parameters of the optimal adjustment indicators have been determined.



Keywords: tractor diesel, compressed natural gas, exhaust gas recirculation, exhaust gases, toxicity, power, efficiency, combustion process, heat generation.

В Вятском государственном агротехнологическом университете проведены исследования по переводу тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 для работы на сжатом природном газе (КПГ) [1-4]. Применение в дизеле КПГ приводит к значительному увеличению содержания в отработавших газах (ОГ) оксидов азота [5-8]. Поэтому для снижения содержания оксидов азота в ОГ газодизеля была применена рециркуляция отработавших газов (РОГ). Исследования проводились на двух углах опережения впрыскивания топлива (УОВТ) ($\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ – оптимальный для газодизельного с РОГ процесса и $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ – оптимальный для дизельного процесса [9, 10]). Зависимости эффективных показателей работы тракторного дизеля по дизельному, газодизельному и газодизельному с РОГ процессам на оптимальном для газодизельного с РОГ процессе установочном УОВТ 23° в зависимости от изменения нагрузки представлены на рисунке 1а.

Применение РОГ на газодизельном процессе приводит к росту удельного эффективного расхода топлива. Причем, при малом эффективном давлении в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа удельный эффективный расход топлива, например, при работе с 20%-й РОГ, возрастает на 2,3%, тогда как при номинальной нагрузке g_e выше на 6,6% газодизельного процесса, но ниже на 10,1% дизельного процесса. Применение 40%-й РОГ в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа приводит к росту g_e на 3,5%. Снижение же степени рециркуляции до 10% на номинальном режиме приводит к росту g_e всего на 2,8% относительно газодизельного процесса, что на 13,5% ниже дизельного процесса.

Эффективный КПД при работе на газе с 40%-й РОГ в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа снижается на 3,0...3,5% относительно



чисто газодизельного процесса. При работе на номинальной нагрузке с 20%-й РОГ η_e ниже на 6,6%. Снижение же степени рециркуляции до 10% на номинальном режиме приводит к снижению η_e на 3,0% относительно газодизельного процесса, что на 4,2% выше дизельного процесса. Часовой расход топлива на номинальном режиме при работе на газе с 20%-й РОГ увеличивается на 6,4%, при работе с 10%-й РОГ увеличивается на 2,7%, что ниже на 12,5% дизельного процесса.

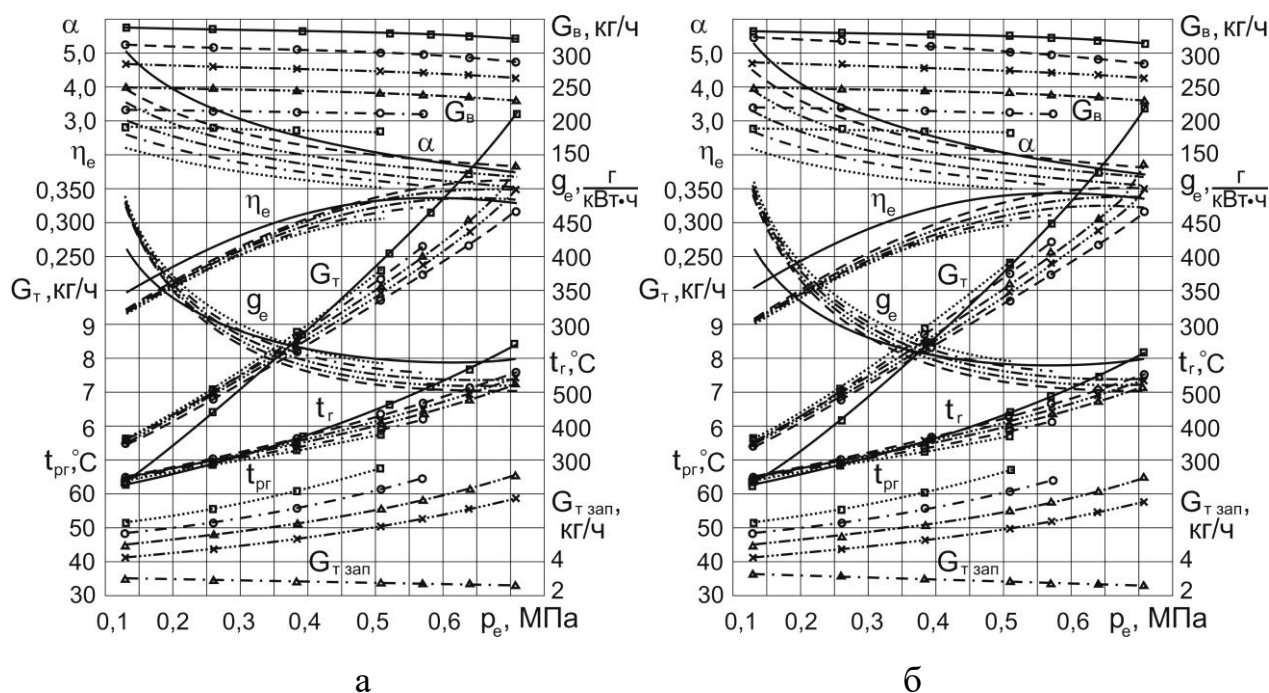


Рисунок 1 – Влияние применения КПГ и РОГ на эффективные показатели работы тракторного дизеля 4С 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$: а) $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$; б) $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$;

- — ■ — дизельный процесс; ○ — — ○ — газодизельный процесс;
- × — — — × — рециркуляция 10%; ▲ — — — ▲ — рециркуляция 20%;
- — · — · ○ — рециркуляция 30%; ■ — · — · ■ — рециркуляция 40%;
- ▲ · · · · ▲ — расход запального ДТ



Температура ОГ при работе с РОГ снижается незначительно на больших нагрузках с увеличением степени РОГ. Расход воздуха снижается пропорционально количеству присаженных во впускной коллектор ОГ. Температура рециркулируемых ОГ увеличивается с увеличением степени рециркуляции и во всём диапазоне изменения нагрузок при степени рециркуляции $\rho = 40\%$ не превышает 68°C . Рост удельного эффективного расхода топлива и снижение эффективного КПД при работе на газодизельном процессе с РОГ относительно чисто газодизельного процесса связаны с ухудшением процесса сгорания в результате ограниченности необходимого количества воздуха для окисления топлива [11, 12].

Нагрузочные характеристики работы тракторного газодизеля по дизельному, газодизельному и газодизельному с РОГ процессам на установочном угле опережения впрыскивания топлива 26° представлены на рисунке 1б. Из графиков видно, общая картина изменения показателей работы дизеля не изменилась. Применение РОГ на газодизельном процессе приводит также к росту удельного эффективного расхода топлива и снижению эффективного КПД, причём кривые η_e лежат несколько ниже аналогичных кривых при $\Theta_{\text{впр}} = 23^{\circ}$.

Содержание токсичных компонентов в ОГ тракторного газодизеля в зависимости от изменения нагрузки при частоте вращения 2200 мин^{-1} и установочном УОВТ 23° представлено на рисунке 2а.

Из графиков видно, что применение КПП в тракторном дизеле приводит к увеличению содержания оксидов азота в ОГ. Так, на номинальном режиме работы это увеличение составляет $24,1\%$, а при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ выброс оксидов азота увеличивается на $60,5\%$. Применение РОГ снижает содержание оксидов азота в ОГ во всём диапазоне изменения нагрузок. При работе по



газодизельному процессу с 40%-й РОГ в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа происходит снижение NO_x до 63,4%.

При работе газодизеля на номинальном режиме с 10%-й РОГ содержание NO_x в ОГ ниже на 24,1% газодизельного процесса и соответствует дизельному процессу. Применение РОГ вызывает неоднозначное влияние на содержание суммарных углеводородов в ОГ. Так, при работе тракторного газодизеля с 40%-й РОГ на малых нагрузках от 0,13 до 0,26 МПа происходит снижение C_nH_m на 8,7...14,5%, но при $p_e = 0,51$ МПа происходит увеличение на 42,5%.

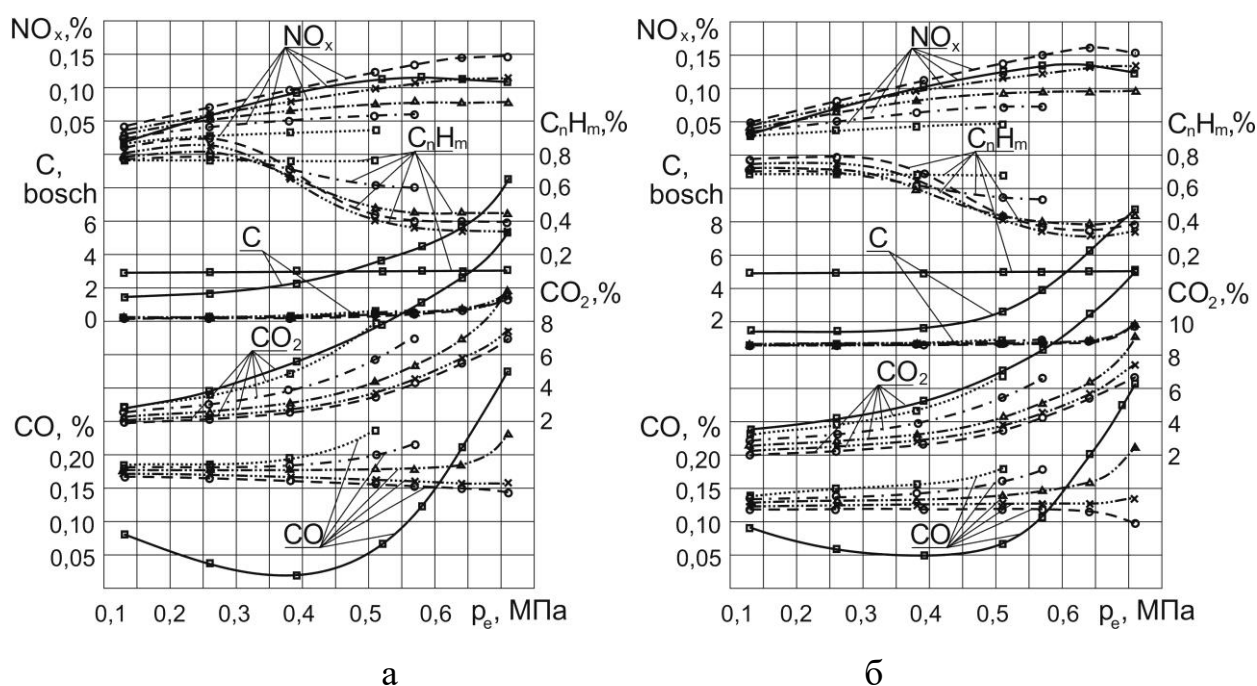


Рисунок 2 - Влияние применения КПГ и РОГ на показатели токсичности и дымности ОГ тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$: а – $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$; б – $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$;

- – дизельный процесс; ○—○ – газодизельный процесс;
- ×—× – рециркуляция 10%; ▲—▲ – рециркуляция 20%;
- – рециркуляция 30%; □—□ – рециркуляция 40%



При работе на номинальном режиме с 10%-й РОГ происходит снижение C_nH_m на 9,9%, а при увеличении степени РОГ до 20% происходит увеличение выброса C_nH_m с ОГ на 10,2% относительно чисто газодизельного процесса. Существенно снижается содержание в ОГ сажи при работе по газодизельному процессу. При работе газодизеля с 40%-й РОГ на малых нагрузках увеличение сажесодержания в ОГ не превышает 5%. При работе на номинальном режиме с 10%-й РОГ происходит увеличение выбросов сажи на 4,1%, при $\rho = 20\%$ – на 12,5%. Применение РОГ на газодизеле приводит к росту CO и CO₂ во всём диапазоне изменения нагрузок. Так, при работе с 40%-й РОГ при средних нагрузках от 0,26 до 0,38 МПа рост составляет от 12,3 до 17,1% и от 42,2 до 48,8% для CO и CO₂ соответственно. При работе с 20%-й РОГ на номинальной нагрузке рост составляет 18,9 и 20,0%, при снижении РОГ до 10% увеличение составляет 6,3 и 5,1% для CO и CO₂ соответственно. Необходимо отметить, что значительный рост суммарных углеводородов на больших нагрузках обусловлен неполнотой сгорания топлива в условиях недостатка окислителя с увеличением степени РОГ [3].

Содержание токсичных компонентов в ОГ тракторного дизеля в зависимости от изменения нагрузки при частоте вращения 2200 мин⁻¹ и установочном УОВТ 26° представлено на рисунке 2б. Закономерности изменения содержания токсичных компонентов в ОГ при работе по газодизельному и газодизельному с РОГ процессам аналогичны рассмотренным выше. Изменяются лишь абсолютные значения.

Показатели процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе по дизельному, газодизельному и газодизельному с РОГ процессам в зависимости от изменения нагрузки для частоты вращения 2200 мин⁻¹ и установочных углов 23 и 26° представлены на рисунке 3.



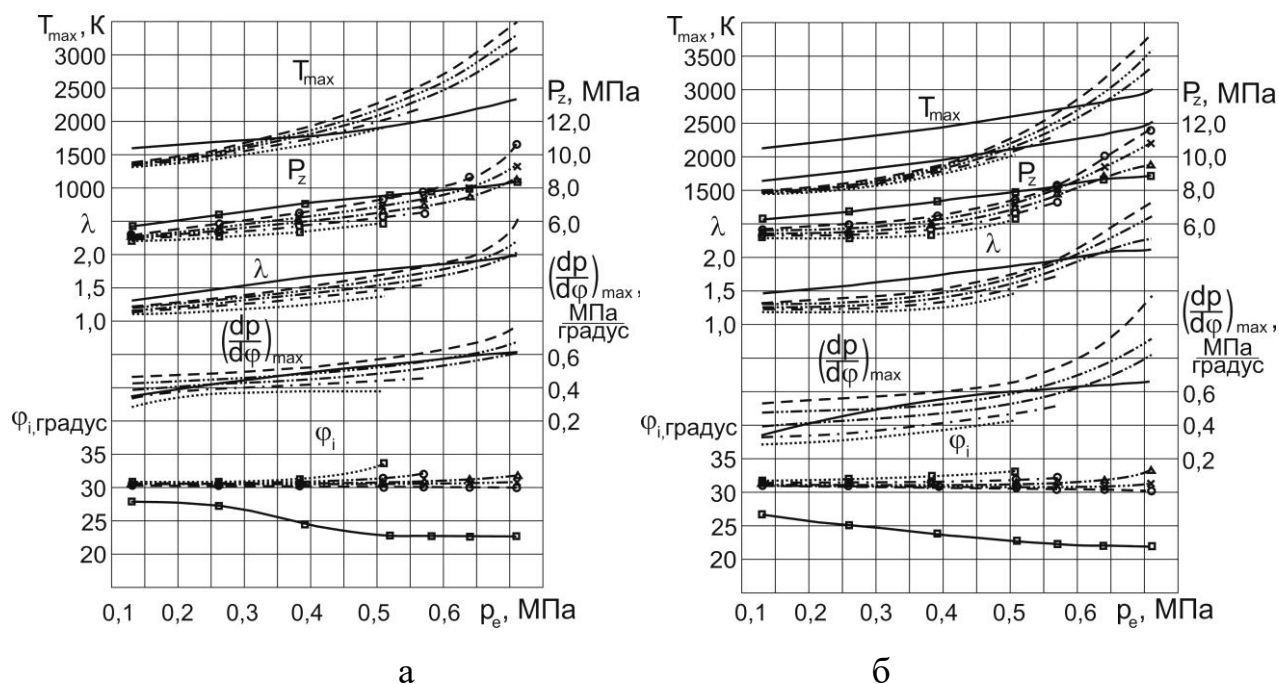


Рисунок 3 – Влияние применения КПГ и РОГ на показатели процесса сгорания дизеля 4С 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$:

а – $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$; б – $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$;

- — — ■ — дизельный процесс; ○ — — ○ — газодизельный процесс;
- × — — — × — рециркуляция 10%; ▲ — — — ▲ — рециркуляция 20%;
- — — — ○ — рециркуляция 30%; ■ — — — ■ — рециркуляция 40%

Из графиков видно, что кривые максимальной температуры газов в цилиндре, максимального давления, степени повышения давления и жесткости процесса сгорания при работе по газодизельному с РОГ процессу лежат ниже кривых чисто газодизельного процесса во всем диапазоне изменения нагрузок и уменьшаются с увеличением степени РОГ. Так, при работе по газодизельному процессу с 40%-й РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ в диапазоне изменения нагрузок от 0,13 до 0,51 МПа происходит снижение по сравнению с газодизельным процессом максимальной температуры газов на 100...400 К, максимального давления на 7,9...19,2% и жесткости процесса сгорания на 40,4...34,5%. При работе по газодизельному процессу с 10%-й РОГ на номинальной нагрузке происходит



снижение по сравнению с газодизельным процессом максимальной температуры газов на 150°K , максимального давления на 3,5% и жесткости процесса сгорания на 15,5%. При работе с 20%-й РОГ – максимальной температуры газов на 300°K , максимального давления на 9,4% и жесткости процесса сгорания на 18,8%. Угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, при газодизельном с РОГ процессе выше, чем при газодизельном на всех нагрузочных режимах и увеличивается с увеличением степени РОГ.

Характеристики тепловыделения и содержания оксидов азота в цилиндре газодизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе по дизельному, газодизельному и газодизельному с РОГ процессам при частоте вращения 2200 мин^{-1} и установочных УОВТ 23 и 26° в зависимости от изменения нагрузки представлены на рисунке 4.

Из графиков видно, что применение КПП приводит к увеличению максимального содержания оксидов азота в цилиндре. Так, на номинальном режиме работы это увеличение составляет 23,2%, а при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ максимальное содержание оксидов азота увеличивается на 42,0%. Применение РОГ снижает максимальное содержание оксидов азота в цилиндре газодизеля во всём диапазоне изменения нагрузок. При работе по газодизельному процессу с 40%-й РОГ в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа происходит снижение максимального содержания оксидов азота на 45,0-57,6%.

Характер протекания характеристик тепловыделения, как при газодизельном, так и при газодизельном с РОГ процессам отличный от характеристик дизельного процесса. Значения активного выделения тепла при максимальном давлении газов, активного выделения тепла при максимальной температуре и максимума скорости активного тепловыделения при работе по газодизельному с РОГ процессу уменьшаются с увеличением степени



рециркуляции во всем диапазоне изменения нагрузок. Значения φ_{TZ} на всех нагрузочных режимах с увеличением степени РОГ увеличиваются по отношению к чисто газодизельному процессу.

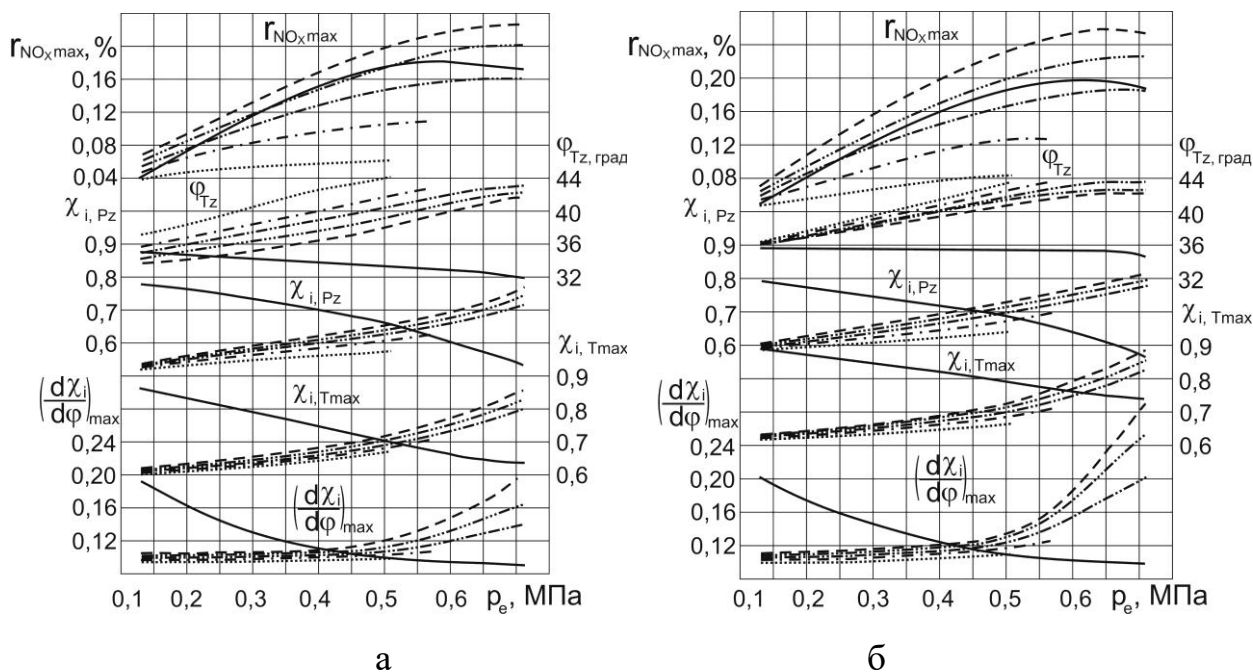


Рисунок 4 – Влияние применения КПГ и РОГ на характеристики тепловыделения и содержание оксидов азота в цилиндре дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$:

а – $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$; б – $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$;

- — дизельный процесс; - - - - газодизельный процесс;
- · - · - · — рециркуляция 10%; - · - · - · — рециркуляция 20%;
- · - · - · — рециркуляция 30%; · - · - · - · — рециркуляция 40%

Выводы. На основании экспериментальных стендовых исследований рабочего процесса тракторного дизеля при работе КПГ с РОГ установлена закономерность подачи рециркулируемых газов в зависимости от нагрузки дизеля, позволяющая регулировать до 40% ОГ, и определены параметры оптимальных регулировочных показателей (таблица 1, 2).



Таблица 1 – Мощностные и экономические показатели работы тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 на номинальном режиме ($p_e = 0,64$ МПа, $n=2200$ мин⁻¹)

Дизель 4Ч 11,0/12,5	Показатели		
	N_e , кВт	g_e , г/(кВт·ч)	G_T , кг/ч
Дизельный процесс	55,2	243	13,4
Применение КПП	55,2 (соответствует ДТ)	207 (снижение на 14,8%)	11,4 (снижение на 14,9%)
Применение КПП и РОГ (10%)	55,2 (соответствует ДТ)	212 (снижение на 12,8%)	11,7 (снижение на 12,7%)
Применение КПП и РОГ (20%)	55,2 (соответствует ДТ)	218 (снижение на 10,3%)	12,0 (снижение на 10,5%)

Таблица 2 – Показатели токсичности и дымности ОГ тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 на номинальном режиме ($p_e = 0,64$ МПа, $n = 2200$ мин⁻¹)

Дизель 4Ч 11,0/12,5	Показатели				
	Оксиды азота, NO _x , %	Сажа, С, ед. по шкале bosch	Диоксид углерода, CO ₂ , %	Оксид углерода, CO, %	Суммарные углеводороды, CH _x , %
Дизельный процесс	1100	5,8	10,9	0,21	0,11
Применение КПП	1450 (увеличение на 31,8%)	0,9 (снижение в 6,4 раза)	5,6 (снижение на 48,6 %)	0,15 (снижение на 28,6 %)	0,40 (увеличение в 3,6 раза)
Применение КПП и РОГ (10%)	1100 (соответствует ДТ)	1,0 (снижение в 5,8 раз)	5,9 (снижение на 45,9%)	0,16 (снижение на 23,8%)	0,36 (увеличение в 3,3 раза)
Применение КПП и РОГ (20%)	750 (снижение на 31,8%)	1,1 (снижение в 5,3 раза)	7,0 (снижение на 35,8%)	0,18 (снижение на 14,3%)	0,45 (увеличение в 4,1 раза)

Список источников

1. Марков В. А., Баширов Р. М., Габитов И. И. Токсичность отработавших газов дизелей. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.



2. 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.
3. 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.
4. Lopatin O. P. Development of a methodology for assessing the impact of vehicles on the acoustic environment // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 548. 2020. 062049.
5. Гусаков С. В. Перспективы применения в дизелях альтернативных топлив из возобновляемых источников : учебное пособие. М.: РУДН, 2008. 288 с.
6. Агафонов Г. Л., Власов П. А., Рябиков О. Б. Численное моделирование снижения образования твердых частиц сажи в камере сгорания дизелях // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. № 3. С. 15–21.
7. Кожин Д. В. Физико-химические основы математического моделирования процесса образования и выгорания сажи в дизельных ДВС : монография. Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2015. 176 с.
8. Гремячкин В. М. Гетерогенное горение частиц твердых топлив. М. : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 230 с.
9. 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.
10. 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.



11. Кульчицкий А. Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей. Владимир : Изд-во Владимирского государственного университета, 2000. 256 с.
12. Мансуров З. А. Сажеобразование в процессах горения (обзор) // Физика горения и взрыва. 2005. № 6. С. 137–156.

