

УДК 621.436

**СНИЖЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ОТРАБОТАВШИХ  
ГАЗАХ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ  
ЭТАНОЛО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ**

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, проведенных на базе научно-исследовательской лаборатории кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов Вятского государственного агротехнологического университета, по улучшению экологических показателей тракторного дизеля при работе на этанолю-топливной эмульсии путем снижения содержания оксидов азота в отработавших газах.

Ключевые слова: оксиды азота, отработавшие газы, тракторный дизель, этанолю-топливная эмульсия.

**REDUCTION OF NITROGEN OXIDES IN THE EXHAUST GASES OF  
TRACTOR DIESEL BY USING ETHANOL-FUEL EMULSION**

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 conducted on the basis of the research laboratory of the Department of Heat Engines, Automobiles and Tractors of the Vyatka State Agrotechnological University to improve the environmental performance of the tractor diesel when working on ethanol-fuel emulsion by reducing the content of nitrogen oxides in the exhaust gases.

Keywords: nitrogen oxides, exhaust gases, tractor diesel, ethanol-fuel emulsion.

Силовые установки тракторов, комбайнов, грузовых автомобилей, задействованных в агропромышленном комплексе, оказывают акустическое воздействие на окружающую среду и являются существенным источником её загрязнения вредными продуктами сгорания. Шумность тракторных дизелей



является их неизбежным конструктивным критерием, мало меняющимся в процессе эксплуатации. Что же касается токсичности отработавших газов (ОГ) дизелей, то она является самым сильным негативным фактором воздействия дизелей на окружающую среду [3, 4, 8, 9].

Наиболее токсичными компонентами ОГ тракторных дизелей, исходя из класса опасности и концентрации, являются оксиды серы ( $\text{SO}_2$ ) и азота ( $\text{NO}_x$ ). Токсичность углеводородов достигает несколько процентов от общей токсичности ОГ, но простота их контроля и известная зависимость их концентрации от технического состояния дизеля делают контроль  $\text{CH}_x$  равноправным с контролем дымности ОГ. Контроль же  $\text{NO}_x$  ввиду ограниченности уникальной газоаналитической аппаратуры, сложности создания тракторному дизелю надлежащего нагрузочно-скоростного режима весьма затруднителен, а для массового охвата дизелей практически не возможен [6, 7, 10].

Поэтому работы, направленные на снижение в ОГ тракторных дизелей одного из наиболее токсичных компонентов ОГ – оксидов азота, несомненно, являются актуальными и востребованными.

В Вятском ГАТУ с целью определения и оптимизации основных параметров работы тракторного дизеля на штатном дизельном топливе (ДТ) и этанола-топливной эмульсии (ЭТЭ) проведены экспериментальные исследования, показавшие устойчивую работу тракторного дизеля на ЭТЭ при соотношении на номинальном режиме: этанол – 25%; вода – 7%; ДТ – 67,5%; присадка С-5А – 0,5% [1, 2, 5].

Для исследования особенностей протекания процесса сгорания топлива в тракторном дизеле при работе тракторного дизеля на ЭТЭ было проведено индицирование процесса сгорания на номинальном скоростном режиме при частоте вращения  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$  и на режиме максимального крутящего момента при частоте вращения  $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ . Значения нагрузки при работе



тракторного дизеля на ЭТЭ устанавливались такими же, как и при работе дизеля на ДТ, чем обеспечивалось поддержание одинаковых значений среднего эффективного давления при работе дизеля на ЭТЭ и ДТ, что было необходимо для сравнения этих двух процессов.

На рисунке 1 представлены графики влияния применения ЭТЭ на показатели процесса сгорания, объемное содержание  $r_{NOx}$  и массовую концентрацию  $C_{NOx}$  оксидов азота в цилиндре тракторного дизеля в зависимости от изменения угла поворота коленчатого вала (п.к.в.) двигателя при установочном угле опережения впрыскивания топлива (УОВТ)  $\Theta_{впр} = 23^\circ$  до верхней мертвой точки (в.м.т.).

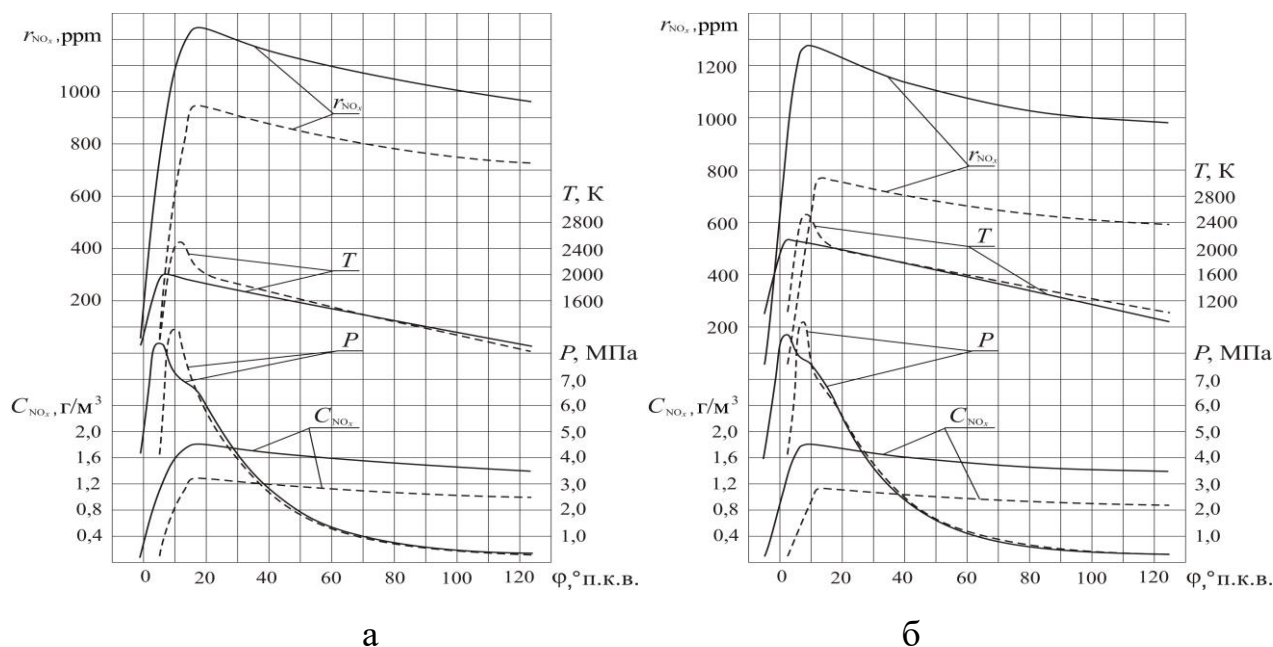


Рисунок 1 – Влияние применения ЭТЭ на показатели процесса сгорания, объемное содержание  $r_{NOx}$  и массовую концентрацию  $C_{NOx}$  оксидов азота в цилиндре тракторного дизеля в зависимости от изменения угла п.к.в. двигателя при  $\Theta_{впр} = 23^\circ$  до в.м.т.:

а –  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $p_e = 0,64 \text{ МПа}$ ; б –  $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ ,  $p_e = 0,76 \text{ МПа}$ ;

———— - дизельный процесс; - - - - - ЭТЭ



Как видно из графиков (рисунок 1а), максимальное значение объемного содержания оксидов азота  $r_{\text{NOx max}}$  в цилиндре при работе дизеля на ДТ составляет 1250 ppm, максимальная массовая концентрация оксидов азота  $C_{\text{NOx max}}$  составляет  $1,80 \text{ г/м}^3$  при  $\varphi_i = 18,2^\circ$  п.к.в. после в.м.т. Объемное содержание оксидов азота  $r_{\text{NOx}}$  в цилиндре в момент открытия выпускного клапана  $\varphi_i = 124^\circ$  п.к.в. после в.м.т. составляет 965 ppm при массовой концентрации  $C_{\text{NOx}} = 1,39 \text{ г/м}^3$ .

При работе дизеля на ЭТЭ максимальное значение объемного содержания оксидов азота  $r_{\text{NOx max}}$  в цилиндре составляет 950 ppm, максимальное значение массовой концентрации оксидов азота  $C_{\text{NOx max}}$  составляет  $1,29 \text{ г/м}^3$  при  $\varphi_i = 16,8^\circ$  п.к.в. после в.м.т. Объемное содержание оксидов азота  $r_{\text{NOx}}$  в цилиндре в момент открытия выпускного клапана  $\varphi_i = 124,0^\circ$  п.к.в. после в.м.т. составляет 730 ppm при массовой концентрации оксидов азота  $C_{\text{NOx}} 0,99 \text{ г/м}^3$ . Таким образом, при работе дизеля на ЭТЭ происходит снижение максимальных значений объемного содержания  $r_{\text{NOx max}}$  на 300 ppm, или на 24,0%; массовой концентрации  $C_{\text{NOx max}}$  – на  $0,51 \text{ г/м}^3$ , или на 28,3%. Разница между значениями объемного содержания  $r_{\text{NOx}}$  и массовой концентрации  $C_{\text{NOx}}$  оксидов азота в цилиндре в момент открытия выпускного клапана составляет 235 ppm и  $0,40 \text{ г/м}^3$ , что ниже дизельного процесса на 32,2 и 28,8% соответственно.

Для сравнения показателей содержания оксидов азота в цилиндре дизеля при переходе с ДТ на ЭТЭ рассмотрим значения объемного содержания  $r_{\text{NOx}}$  и массовой концентрации  $C_{\text{NOx}}$  оксидов азота в цилиндре для постоянного объема цилиндра, т.е. для одинакового положения коленчатого вала. При положении коленчатого вала, соответствующего  $\varphi_i = 18,2^\circ$  п.к.в. после в.м.т. при работе на ДТ,  $r_{\text{NOx max}}$  составляет 1250 ppm,  $C_{\text{NOx max}} = 1,80 \text{ г/м}^3$ . При переходе на ЭТЭ  $r_{\text{NOx}}$  составляет 948 ppm, что ниже на 24,2%;  $C_{\text{NOx}} = 1,29 \text{ г/м}^3$ , что ниже на 28,3%.

Как видно из графиков (рисунок 1б), максимальное значение объемного содержания оксидов азота  $r_{\text{NOx max}}$  в цилиндре при работе дизеля на ДТ



составляет 1280 ppm, максимальная массовая концентрация оксидов азота  $C_{NOx\ max} - 1,82\ \text{г/м}^3$ , при  $\varphi_i = 8,0^\circ$  п.к.в. после в.м.т. Объемное содержание оксидов азота в цилиндре  $r_{NOx}$  в момент открытия выпускного клапана  $\varphi_i = 124,0^\circ$  п.к.в. после в.м.т. составляет 980 ppm при массовой концентрации оксидов азота  $C_{NOx}\ 1,40\ \text{г/м}^3$ .

При работе дизеля на ЭТЭ максимальное значение объемного содержания оксидов азота  $r_{NOx\ max}$  в цилиндре составляет 770 ppm, максимальное значение массовой концентрации оксидов азота  $C_{NOx\ max} - 1,13\ \text{г/м}^3$  при  $\varphi_i = 12,5^\circ$  п.к.в. после в.м.т. Объемное содержание оксидов азота  $r_{NOx}$  в цилиндре в момент открытия выпускного клапана  $\varphi_i = 124,0^\circ$  п.к.в. после в.м.т. составляет 592 ppm при массовой концентрации оксидов азота  $C_{NOx}\ 0,87\ \text{г/м}^3$ . Таким образом, при работе дизеля на ЭТЭ происходит снижение максимальных значений объемного содержания  $r_{NOx\ max}$  на 39,8%; массовой концентрации – на 37,9%. Разница между значениями объемного содержания  $r_{NOx}$  и массовой концентрации  $C_{NOx}$  оксидов азота в цилиндре в момент открытия выпускного клапана составляет 388 ppm и  $0,53\ \text{г/м}^3$ , что ниже дизельного процесса на 39,6 и 37,9% соответственно.

На рисунке 2 представлены графики влияния применения ЭТЭ на объемное содержание  $r_{NOx}$  и массовую концентрацию  $C_{NOx}$  оксидов азота в отработавших газах и показатели процесса сгорания в цилиндре тракторного дизеля в зависимости от изменения угла п.к.в. двигателя при установочном УОВТ  $\Theta_{впр} = 26^\circ$  до в.м.т.

Как видно из графиков (рисунок 2а), максимальное значение объемного содержания оксидов азота  $r_{NOx\ max}$  в цилиндре при работе дизеля на ДТ составляет 1360 ppm, максимальная массовая концентрация оксидов азота  $C_{NOx\ max} - 1,96\ \text{г/м}^3$  при  $\varphi_i = 10,0^\circ$  п.к.в. после в.м.т. Объемное содержание оксидов азота  $r_{NOx}$  в цилиндре в момент открытия выпускного клапана  $\varphi_i = 124^\circ$



п.к.в. после в.м.т. составляет 1045 ppm при массовой концентрации  $C_{NOx} = 1,49 \text{ г/м}^3$ .

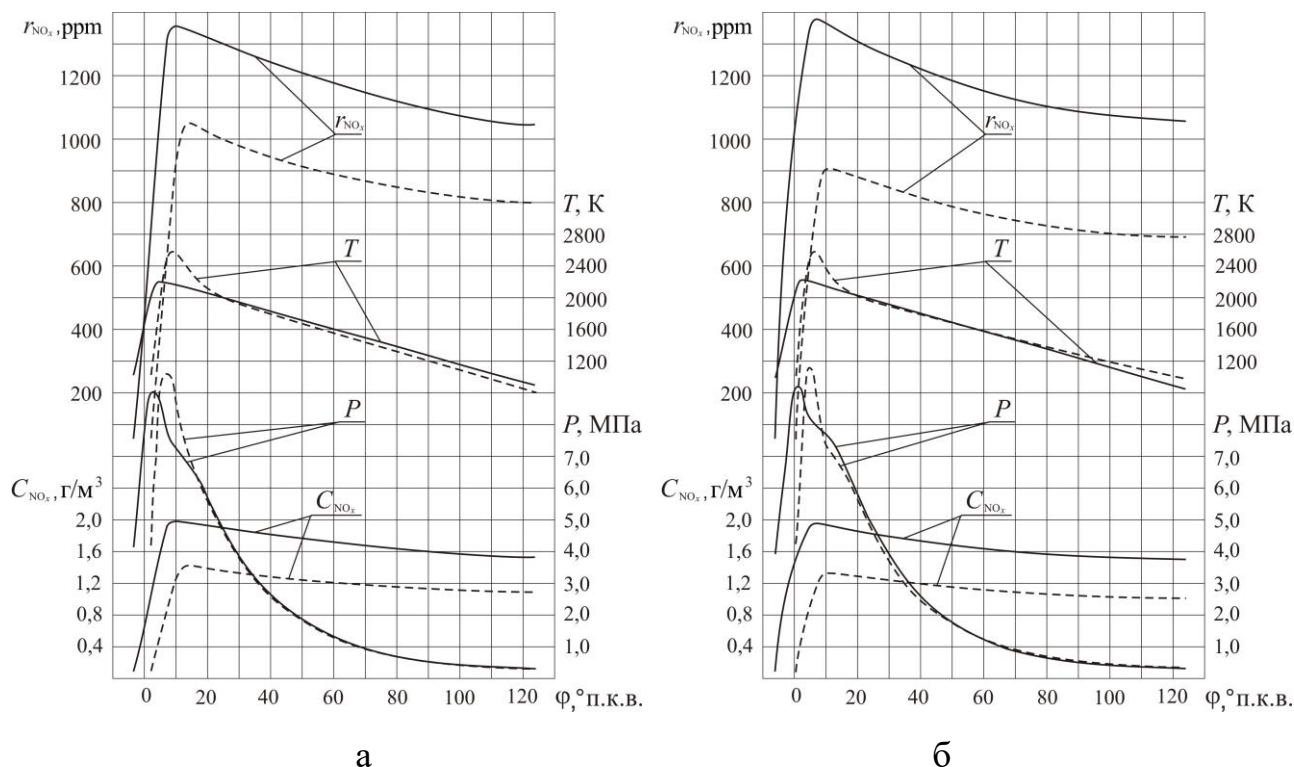


Рисунок 2 – Влияния применения ЭТЭ на объемное содержание  $r_{NOx}$  и массовую концентрацию  $C_{NOx}$  оксидов азота в отработавших газах и показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в. двигателя при  $\Theta_{впр} = 26^\circ$  до в.м.т.: а –  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $p_c = 0,64 \text{ МПа}$ ; б –  $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ ,  $p_c = 0,69 \text{ МПа}$ ; ——— - дизельный процесс; - - - - - ЭТЭ

При работе дизеля на ЭТЭ максимальное значение объемного содержания оксидов азота  $r_{NOx \text{ max}}$  в цилиндре составляет 1050 ppm, максимальное значение массовой концентрации оксидов азота  $C_{NOx \text{ max}} = 1,41 \text{ г/м}^3$  при  $\phi_i = 14,4^\circ$  п.к.в. после в.м.т. Объемное содержание оксидов азота  $r_{NOx}$  в цилиндре в момент открытия выпускного клапана  $\phi_i = 124,0^\circ$  п.к.в. после в.м.т. составляет 800 ppm при массовой концентрации оксидов азота  $C_{NOx} 1,09 \text{ г/м}^3$ . Таким образом, при работе дизеля на ЭТЭ происходит снижение максимальных значений



объемного содержания  $r_{NOx \max}$  на 310 ppm, или на 22,8%; массовой концентрации  $C_{NOx \max}$  – на 0,55 г/м<sup>3</sup>, или на 28,1%. Разница между значениями объемного содержания  $r_{NOx}$  и массовой концентрации  $C_{NOx}$  оксидов азота в цилиндре в момент открытия выпускного клапана составляет 245 ppm и 0,40 г/м<sup>3</sup>, что ниже дизельного процесса на 23,5 и 26,9% соответственно.

Как видно из графиков (рисунок 2б), максимальное значение объемного содержания оксидов азота  $r_{NOx \max}$  в цилиндре при работе дизеля на ДТ составляет 1380 ppm, максимальная массовая концентрация оксидов азота  $C_{NOx \max}$  – 1,96 г/м<sup>3</sup> при  $\phi_i = 7,2^\circ$  п.к.в. после в.м.т. Объемное содержание оксидов азота в цилиндре  $r_{NOx}$  в момент открытия выпускного клапана  $\phi_i = 124,0^\circ$  п.к.в. после в.м.т. составляет 1060 ppm при массовой концентрации оксидов азота  $C_{NOx}$  1,51 г/м<sup>3</sup>.

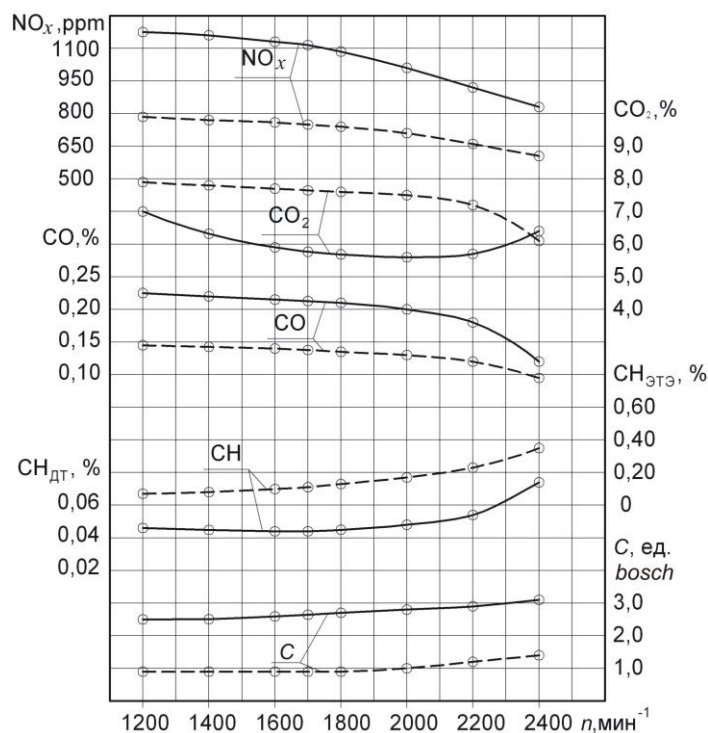


Рисунок 3 – Влияние применения ЭТЭ на токсические показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала:

— - дизельный процесс; - - - - ЭТЭ



При работе дизеля на ЭТЭ максимальное значение объемного содержания оксидов азота  $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$  в цилиндре составляет 910 ppm, максимальное значение массовой концентрации оксидов азота  $C_{\text{NO}_x \text{ max}} = 1,33 \text{ г/м}^3$  при  $\varphi_i = 10,8^\circ$  п.к.в. после в.м.т. Объемное содержание оксидов азота  $r_{\text{NO}_x}$  в цилиндре в момент открытия выпускного клапана  $\varphi_i = 124,0^\circ$  п.к.в. после в.м.т. составляет 795 ppm при массовой концентрации оксидов азота  $C_{\text{NO}_x} 1,02 \text{ г/м}^3$ . Таким образом, при работе дизеля на ЭТЭ происходит снижение максимальных значений объемного содержания  $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$  на 34,1%; массовой концентрации – на 32,1%. Разница между значениями объемного содержания  $r_{\text{NO}_x}$  и массовой концентрации  $C_{\text{NO}_x}$  оксидов азота в цилиндре в момент открытия выпускного клапана составляет 265 ppm и  $0,49 \text{ г/м}^3$ , что ниже дизельного процесса на 25,0 и 32,5% соответственно.

Скоростные характеристики изменения содержания токсичных компонентов в ОГ тракторного дизеля на оптимальном установочном УОВТ в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала представлены на рисунке 3.

Анализируя изменение содержания токсичных компонентов в ОГ тракторного дизеля при переходе с ДТ на ЭТЭ при работе дизеля на оптимальном установочном УОВТ в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала, можно отметить следующее. Происходит значительное снижение содержания оксидов азота при работе дизеля на ЭТЭ во всем диапазоне изменения частоты вращения. Так, при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  содержание  $\text{NO}_x$  снижается с 1175 ppm при работе дизеля на ДТ до 785 ppm при работе дизеля на ЭТЭ. Снижение составляет 33,2%. При  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  содержание  $\text{NO}_x$  при работе дизеля на ДТ составляет 830 ppm, а при работе дизеля на ЭТЭ составляет 605 ppm. Снижение составляет 27,1%. Содержание СН в ОГ при работе дизеля на ЭТЭ повышается. Так, при работе на дизельном топливе на частоте вращения  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  содержание СН составляет 0,046%,





а при работе на ЭТЭ – 0,07%. При работе на частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  на дизельном топливе содержание СН составляет 0,074%, а при работе на ЭТЭ – 0,35%. Содержание  $\text{CO}_2$  при работе на дизельном топливе на частоте вращения  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  составляет 7,0%, а при работе на ЭТЭ – 7,9%. При работе на частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  на дизельном топливе содержание  $\text{CO}_2$  составляет 6,4%, а при работе на ЭТЭ – 6,1%, т.е. снижение 4,7%.

При переходе тракторного дизеля для работы на ЭТЭ происходит снижение содержания СО. Так, при работе на дизельном топливе на частоте вращения  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  содержание СО составляет 0,23%, а при работе на ЭТЭ – 0,15%, что ниже на 34,78%. На частоте вращения  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  при работе на дизельном топливе содержание СО составляет 0,12%, а при работе на ЭТЭ – 0,10%, т.е. снижение 16,7%.

Существенно уменьшается в ОГ содержание сажи при работе дизеля на ЭТЭ во всем диапазоне изменения частоты вращения. Так, при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  при работе дизеля на ДТ значение дымности составляет 2,5 ед. по шкале Bosch, а при работе дизеля на ЭТЭ – 0,9 ед. по шкале Bosch. При увеличении частоты вращения до  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  значение дымности при работе дизеля на ДТ составляет 3,1 ед. по шкале Bosch, а при работе дизеля на ЭТЭ – 1,4 ед. по шкале Bosch, т.е. дымность снижается более чем в 2 раза.

Анализируя изменение содержания токсичных компонентов в ОГ тракторного дизеля при переходе с ДТ на ЭТЭ, отметим, что при работе дизеля на ЭТЭ на всем скоростном диапазоне уменьшается содержание в ОГ дизеля оксида углерода СО, происходит увеличение диоксида углерода  $\text{CO}_2$ , возрастает содержание суммарных углеводородов СН. При этом значительно снижается содержание оксидов азота  $\text{NO}_x$  и уменьшается дымность ОГ.

Выводы. На основании проведенных лабораторно-стендовых и теоретических исследований влияния применения альтернативного топлива – ЭТЭ – на процессы образования и разложения оксидов азота, на токсические,



мощностные и экономические показатели работы тракторного дизеля с камерой сгорания в поршне типа ЦНИДИ с непосредственным впрыскиванием топлива установлена возможность улучшения его экологических показателей, в частности, снижения содержания оксидов азота в ОГ, экономии ДТ, повышения эффективных показателей.

Экспериментальными исследованиями для снижения содержания оксидов азота в ОГ, объемного содержания  $r_{NOx}$  и массовой концентрации  $C_{NOx}$  оксидов азота в цилиндре тракторного дизеля при работе на ЭТЭ определены значения оптимальных установочных углов опережения впрыскивания топлив: для ДТ –  $23^\circ$  п.к.в., для ЭТЭ –  $23^\circ$  п.к.в.

При работе дизеля на ЭТЭ содержание оксидов азота в ОГ, объемное содержание  $r_{NOx}$  и массовая концентрация  $C_{NOx}$  оксидов азота в цилиндре тракторного дизеля ниже на всех режимах его работы.

#### Список источников

1. 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.
2. Analysis of the physical properties, composition and structure of soot particles / V. A. Likhanov, O. P. Lopatin, A. S. Yurlov [et al] // Journal of Physics : Conf. Series 2094. 2021. 052070.
3. Comparing Investigations on Exhaust Gas Emissions of Different Diesel Engines Running with Diesel Fuel and Rapeseed Oil Methyl Ester / May H., Hattingen U., Klee P. [et al] // MTZ. 1997. Jg. 58. № 1. P. 42-52.
4. Tat M.E., Van Gerpen J. H. The Kinematic Viscosity of Biodiesel and Its Blends with Diesel Fuel // Journal of the American Oil Chemists' Society. 1999. Vol. 76. № 12. P. 1511-1513.



5. Моделирование процессов испарения и смесеобразования в цилиндре тракторного дизеля при работе на этанола-топливной эмульсии / В. А. Лиханов, О. П. Лопатин, А. И. Чупраков, Г. С. Юнусов // Известия МГТУ «МАМИ». 2017. № 1 (31). С. 23-27.
6. Оптимизация состава смесевых биотоплив на основе растительных масел для дизельных двигателей / В. А. Марков [и др.] // Вестник Волгоградского государственного университета. Сер. 10. Инновационная деятельность. 2014. № 4 (13). С. 86-98.
7. Применение топлива на основе рапсового масла в дизелях / Д. Д. Матиевский [и др.] // Ползуновский вестник. 2006. № 4. С. 118-127.
8. Рапсовое биотопливо – альтернатива нефтяному моторному топливу / А. П. Уханов, Д. А. Уханов, В. А. Рачкин, Н. С. Киреева // Нива Поволжья. 2007. № 2 (3). С. 37-40.
9. Савельев Г. С., Кочетков М. Н. Использование рапсового масла в качестве топлива в дизельных двигателях // Транспорт на альтернативном топливе. 2009. № 1. С. 62-66.
10. Сравнительная оценка эффективности применения растительных топлив в дизельном двигателе / А. П. Марченко, А. А. Прохоренко, А. А. Осетров [и др.] // Двигатели внутреннего сгорания. 2004. № 1. С. 46-51.

