

## Исследование скоростного режима дизелей Минского моторного завода при работе на природном газе

© В.А. Лиханов, О.П. Лопатин

Вятская государственная сельскохозяйственная академия,  
г. Киров, 610017, Россия

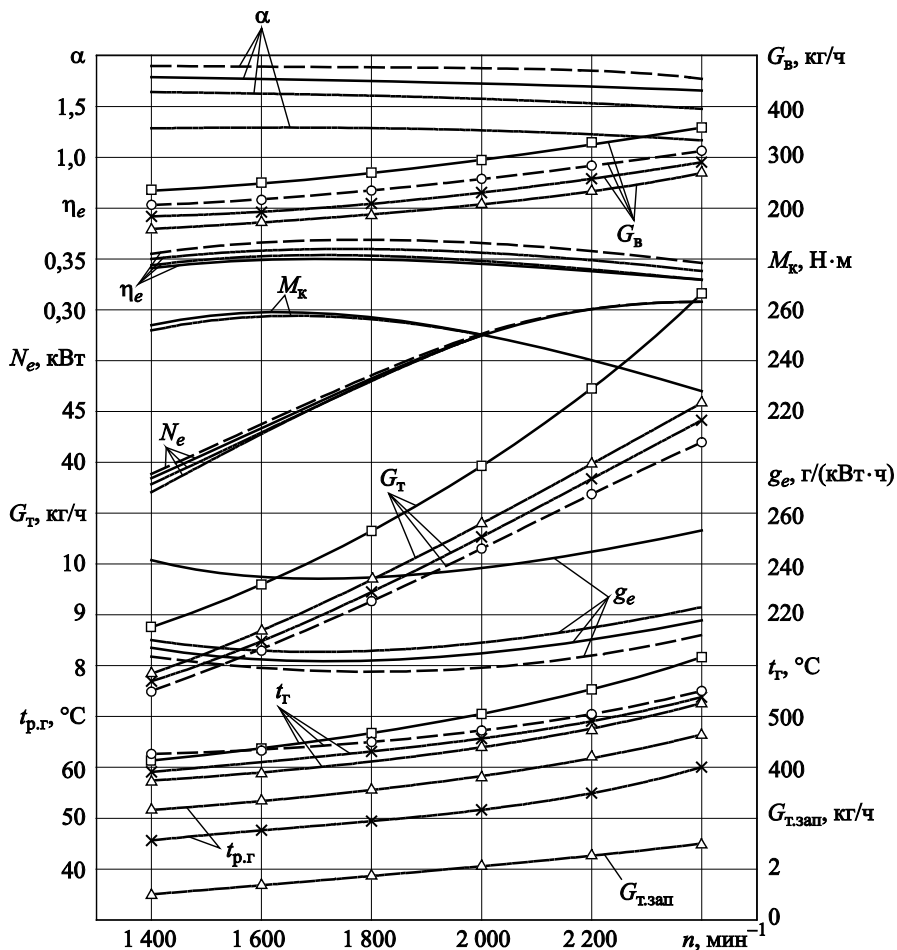
*Рассмотрены вопросы применения компримированного природного газа в качестве альтернативного моторного топлива и снижения токсичности отработавших газов дизелей. Особое внимание уделено исследованиям скоростных режимов дизелей Д-240 (4Ч 11,0/12,5), Д-245.12С (4ЧН 11,0/12,5) с турбонаддувом, Д-245.7 (4ЧН 11,0/12,5) с охлаждением наддувочного воздуха. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния компримированного природного газа на мощностные и экономические характеристики, показатели токсичности и дымности отработавших газов дизелей. Показано, что применение компримированного природного газа во всех типах дизелей снижает на номинальном режиме работы содержание токсичных компонентов в отработавших газах.*

**Ключевые слова:** дизель, компримированный природный газ, турбонаддув, токсичность, отработавшие газы

Неизбежное увеличение цен на нефтепродукты и ухудшающаяся экологическая обстановка, связанная прежде всего с увеличением количества энергоустановок, работающих на жидком нефтяном топливе, приводят к острой необходимости исследования альтернативных источников энергии в целях дальнейшего их внедрения [1–5].

В Вятской государственной сельскохозяйственной академии на базе кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов проведены исследования, посвященные переводу работы дизелей Д-240 (4Ч 11,0/12,5), Д-245.12С (4ЧН 11,0/12,5) с турбонаддувом, Д-245.7 (4ЧН 11,0/12,5) с охлаждением наддувочного воздуха на природный газ. С целью определить и оптимизировать основные параметры дизелей были проведены их стендовые испытания при работе на дизельном топливе и природном газе. Результаты исследования показали, что дизели устойчиво работают на природном газе при соотношении 80 % газа и 20 % запальной порции дизельного топлива [6]. В дальнейшем исследования рабочего процесса проводились именно при таком их соотношении.

Эффективные показатели работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на установочном угле опережения впрыскивания топлива  $\Theta = 23^\circ$  (оптимальном для природного газа и природного газа с рециркуляцией отработавших газов (ОГ)) в зависимости от частоты вращения  $n$  коленчатого вала без регуляторной ветви представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Зависимость эффективных показателей работы дизеля 4С 11,0/12,5 от частоты вращения коленчатого вала без регуляторной ветви при  $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ :  
 ■ — дизельный процесс; ○ — газодизельный процесс;  
 × — газодизельный процесс с рециркуляцией 10 %; ▲ — газодизельный процесс с рециркуляцией 20 %; ▲ — расход запального дизельного топлива

Анализируя кривые, соответствующие работе двигателя на природном газе, можно отметить, что значение удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  минимально при частоте вращения  $1700 \text{ мин}^{-1}$  и составляет  $198 \text{ г/(кВт} \cdot \text{ч)}$ . Значение эффективного КПД  $\eta_e$  максимально при частоте вращения  $1700 \text{ мин}^{-1}$  и составляет  $0,37$ . Значение крутящего момента  $M_k$  также максимально при частоте вращения  $1700 \text{ мин}^{-1}$  и составляет  $259 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  с увеличением частоты вращения незначительно снижается [7].

Анализ графиков работы газодизеля на природном газе с рециркуляцией показывает, что при 10%-ной рециркуляции эффективная мощность  $N_e$  и крутящий момент  $M_k$  остаются практически на том же уровне, что и в случае чисто газодизельного процесса. При увеличении степени рециркуляции до 20 % происходит снижение эффектив-

ной мощности и крутящего момента. Так, применение 20%-ной рециркуляции при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  приводит к падению эффективной мощности на 2,5 % относительно чисто газодизельного процесса.

При увеличении частоты вращения с 1 400 до 2 400  $\text{мин}^{-1}$  удельный эффективный расход топлива  $g_e$  снижается с 204 при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  до 198 г/(кВт · ч) при  $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ , а затем растет до 213 г/(кВт · ч) при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ . При работе на природном газе с 10 и 20 %-ной рециркуляцией ОГ  $g_e$  изменяется в пределах 207... 218 и 214...224 г/(кВт · ч), соответственно. Таким образом, применение 10 и 20 %-ной рециркуляции в диапазоне значений частоты вращения коленчатого вала 1 400...2 400  $\text{мин}^{-1}$  приводит к увеличению  $g_e$  до 1,5...2,4 и 4,9...5,2 % соответственно. Значение эффективного КПД  $\eta_e$ , максимум которого достигается при частоте, соответствующей максимальному крутящему моменту, в случае газодизельного процесса составляет 0,37, а в случае газодизельного с 10 и 20%-ной рециркуляцией — соответственно 0,36 и 0,35, что ниже на 2,7 и 5,4 %.

При работе газодизеля с рециркуляцией часовой расход воздуха и  $G_b$  и коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  уменьшаются пропорционально увеличению степени рециркуляции. Температура ОГ  $t_r$  при работе с рециркуляцией снижается незначительно с увеличением степени рециркуляции. Температура рециркулируемых газов  $t_{p,r}$  в случае 20%-ной рециркуляции на всех скоростных режимах не превышает 67 °С. Часовой расход  $G_{т.зап}$  запального дизельного топлива возрастает с увеличением  $n$ .

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 на установочном угле опережения впрыскивания топлива  $\Theta_{впр} = 23^\circ$  в зависимости от частоты вращения представлено на рис. 2.

Анализируя графики содержания токсичных компонентов при работе по газодизельным процессам с рециркуляцией и без рециркуляции ОГ, можно отметить, что характер кривых соответствует дизельному процессу, при этом изменяются лишь числовые значения рассматриваемых параметров.

Так, в случае газодизельного процесса с 20%-ной рециркуляцией при увеличении частоты вращения с 1 400 до 2 400  $\text{мин}^{-1}$  содержание оксидов азота снижается с 900 до 700 ppm, или на 22,2 %, что ниже, чем в случае дизельного процесса, на 30,8 и 30,0 % соответственно. Содержание суммарных углеводородов ( $\text{СН}_x$ ) увеличивается как при повышении частоты вращения, так и при использовании природного газа.

Применение природного газа при изменении частоты вращения с 1 400 до 2 400  $\text{мин}^{-1}$  приводит к увеличению содержания  $\text{СН}_x$  в ОГ в 6,8 и 4,0 раза соответственно, а использование на газодизеле 10%-ной рециркуляции — к его снижению на 11,8 и 9,1 % соответственно. Однако применение уже 20%-ной рециркуляции на газодизеле вызывает увеличение содержания  $\text{СН}_x$  в ОГ на 8,8 и 15,9 % для частот вращения 1 400 до 2 400  $\text{мин}^{-1}$  соответственно.

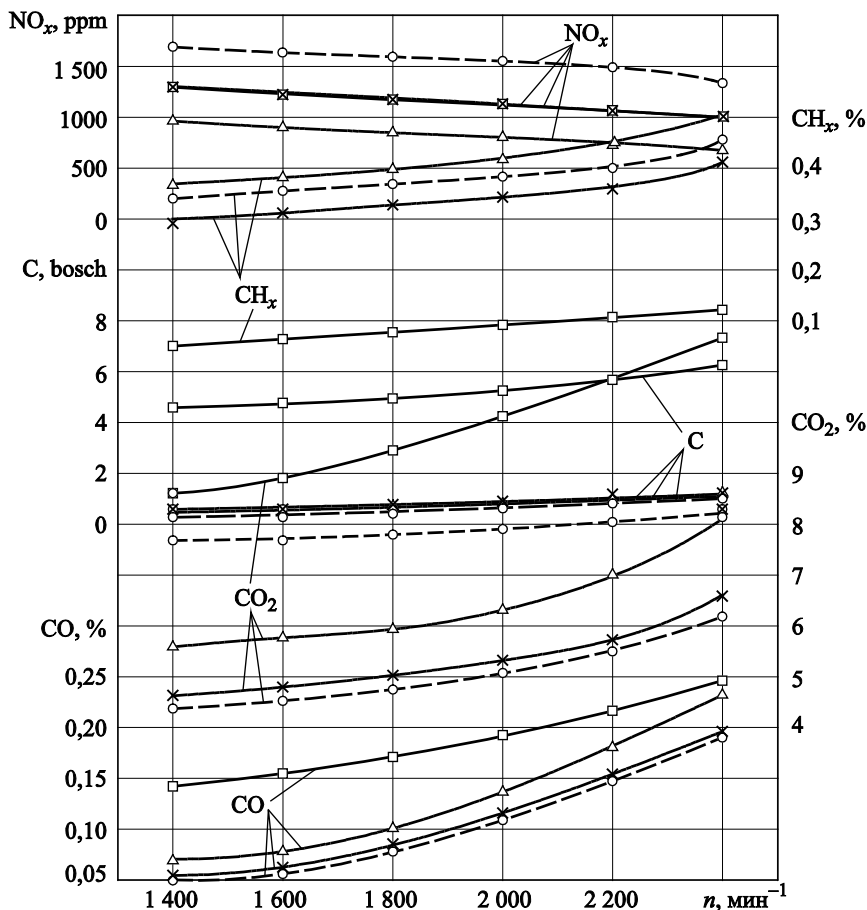


Рис. 2. Зависимости содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 от частоты вращения коленчатого вала при  $\Theta_{впр} = 23^\circ$ :

■ — дизельный процесс; ○ — газодизельный процесс; \* — газодизельный процесс с рециркуляцией 10 %; ▲ — газодизельный процесс с рециркуляцией 20 %

С увеличением частоты вращения повышается содержание CO и CO<sub>2</sub> в ОГ. Применение же природного газа вызывает снижение содержания CO и CO<sub>2</sub>, однако с увеличением степени рециркуляции оно снова возрастает. При работе газодизеля с 10%-ной рециркуляцией при изменении частоты вращения с 1 400 до 2 400 мин<sup>-1</sup> содержание CO снижается в 2,4 раза и на 20,8 % соответственно, а содержание CO<sub>2</sub> — на 46,0 и 43,6 % соответственно по отношению к дизельному процессу.

Анализируя содержание сажи (C) в ОГ, видим, что при увеличении частоты вращения происходит повышение сажесодержания как в случае газодизельного процесса, без рециркуляции ОГ, так и в случае газодизельного процесса с рециркуляцией ОГ. Применение природного газа значительно снижает содержание сажи в ОГ, а использование рециркуляции, наоборот, приводит к росту сажесодержания,

причем с увеличением степени рециркуляции сажеобразование возрастает. Так, при работе газодизеля в диапазоне изменения частот вращения  $1\,400 \dots 2\,400 \text{ мин}^{-1}$  сажеобразование снижается в 8,8 и 5,1 раза соответственно по отношению к дизельному процессу. Применение же 10%-ной рециркуляции вызывает увеличение сажеобразования, которое не превышает 10 %.

Эффективные показатели дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам на оптимальном для газодизельного процесса установочном угле опережения впрыскивания топлива  $11^\circ$  [8] в зависимости от частоты вращения коленчатого вала с включенным регулятором приведены на рис. 3.

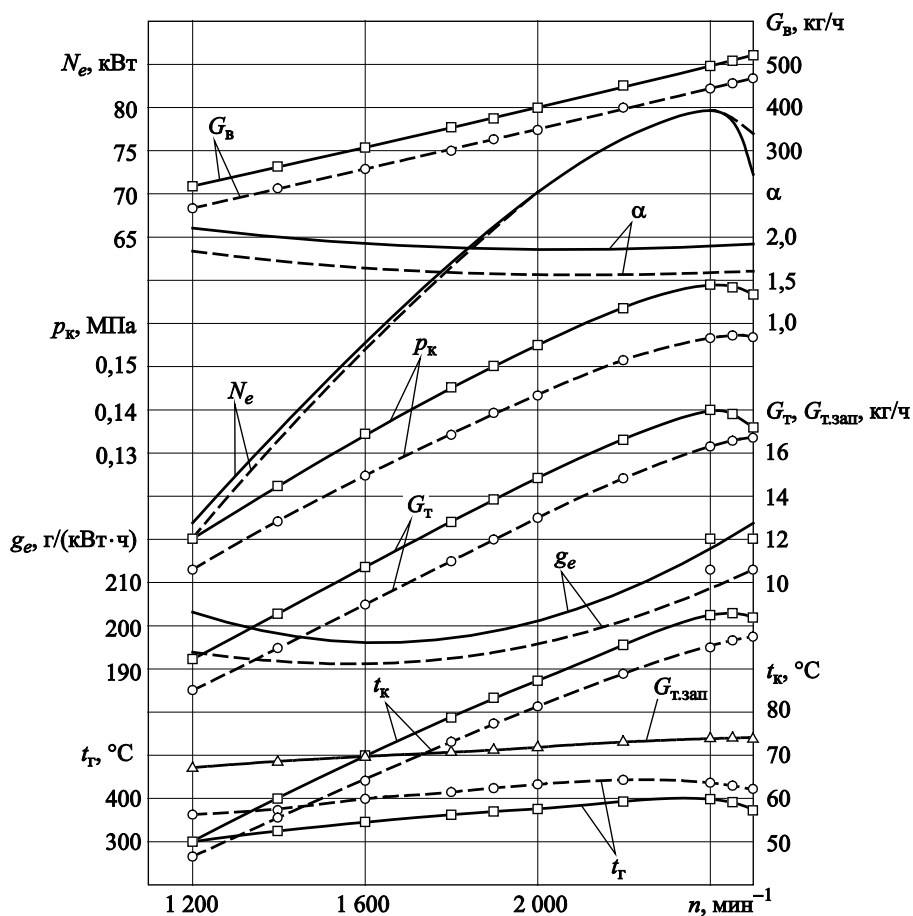


Рис. 3. Зависимости эффективных показателей работы дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 от частоты вращения коленчатого вала с включенным регулятором при  $\Theta_{впр} = 11^\circ$ :

—□— — дизельный процесс; —○—○— — газодизельный процесс; —△—△— — расход запального дизельного топлива

По кривым, представленным на рис. 3, видно, что при переходе дизеля на природный газ на оптимальном установочном угле опережения впрыскивания топлива  $11^\circ$  при изменении частоты вращения коленчатого вала от 1 200 до 2 400  $\text{мин}^{-1}$  суммарный массовый расход топлива возрастает с 6,0 до 16,5  $\text{кг/ч}$ , т. е. в 2,8 раза.

Расход запального дизельного топлива  $G_{\text{т.зап}}$  возрастает с повышением частоты вращения коленчатого вала. Так, на номинальной частоте вращения ( $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$ ) эта величина достигает значения 3,2  $\text{кг/ч}$ , ее рост составляет 77,7 %. Это объясняется увеличением числа циклов в единицу времени, а также повышением стабильности работы топливоподающей аппаратуры и снижением гидравлических потерь с увеличением частоты вращения. Часовой расход  $G_{\text{в}}$  возрастает со 180 до 450  $\text{кг/ч}$ , т. е. в 2,5 раза. При повышении частоты вращения удельный эффективный расход топлива  $g_e$  увеличивается со 190 до 209  $\text{г/(кВт} \cdot \text{ч)}$ , или на 10,5 %, а температура ОГ  $t_{\text{г}}$  — с 300 до 405  $^\circ\text{C}$ , или на 35 %. Вместе с тем при работе на природном газе во всем диапазоне нагрузок снижается значение коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  с 2,5 до 1,6, снижение составляет 56 % [9]. На рис. 3 приведена также зависимость давления наддува  $p_{\text{к}}$  (давления после компрессора) от  $n$ .

Анализируя изменения значений эффективных показателей работы дизеля при дизельном и газодизельном процессе в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала с включенным регулятором при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$ , можно отметить следующее. При равных значениях эффективной мощности и равных значениях крутящего момента (поскольку цели форсирования дизеля не было) во всем диапазоне частот вращения суммарный удельный эффективный расход топлива при газодизельном процессе ниже, чем при дизельном. Так, при  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$   $g_e$  на 4,3 %: 209 против 218  $\text{г/(кВт} \cdot \text{ч)}$ .

С уменьшением частоты вращения коленчатого вала суммарный удельный эффективный расход топлива в случае газодизельного процесса также снижается (при  $n = 1\,900 \text{ мин}^{-1}$   $g_e$  ниже на 5,2 %: 190 против 200  $\text{г/(кВт} \cdot \text{ч)}$ ) в отличие от случая 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  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$   $G_{\text{т}} = 17,1 \text{ кг/ч}$  для дизельного процесса и  $G_{\text{т}} = 16,1 \text{ кг/ч}$  для газодизеля; снижение составляет 6,2 %. При  $n = 1\,900 \text{ мин}^{-1}$   $G_{\text{т}} = 14 \text{ кг/ч}$  для дизельного процесса и  $G_{\text{т}} = 13 \text{ кг/ч}$  для газодизеля; снижение составляет 7,6 %. Температура ОГ при газодизельном процессе ниже, чем при дизельном, во всем диапазоне частот вращения. Часовой расход запального дизельного топлива  $G_{\text{т.зап}}$  изменяется от 1,7 до 2,9  $\text{кг/ч}$  при увеличении частоты вращения с 1 200 до 2 500  $\text{мин}^{-1}$ .

Таким образом, снижение расхода дизельного топлива за счет замещения его газом на всех скоростных режимах составило не менее 80 %.

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  при работе дизеля на природном газе во всех диапазонах частот вращения имеет меньшие значения по сравнению с аналогичным показателем в случае дизельного процесса. Так, при  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$  коэффициент  $\alpha$  имеет значения 1,6 и 1,8 соответственно; снижение составляет 12,5 %. Можно сделать вывод, что газодизель работает на смеси более обогащенного состава. Расход  $G_b$  воздуха двигателем также уменьшается при переходе с дизельного на газодизельный процесс, что свидетельствует о замещении воздуха, поступающего в цилиндры двигателя, природным газом. Расход воздуха при газодизельном процессе несколько ниже расхода воздуха при дизельном процессе на всех частотах вращения коленчатого вала. Так, при  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$  для газодизеля  $G_b = 450 \text{ кг/ч}$ , для дизеля  $G_b = 490 \text{ кг/ч}$ , что на 8,8 % выше.

Суммарный часовой расход топлива дизеля при работе по газодизельному процессу снижается. Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  при газодизельном процессе имеет более низкие значения, чем при дизельном процессе, во всем диапазоне изменения частоты вращения коленчатого вала. Характер изменения крутящего момента  $M_k$  плавный, поскольку интервал частот вращения, в котором работает двигатель по скоростной характеристике, довольно велик. При работе на природном газе характер изменения крутящего момента в зависимости от частоты вращения сохраняется. При этом максимум крутящего момента достигается при  $n = 1\,900 \text{ мин}^{-1}$ .

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам на установочном угле опережения впрыскивания топлива  $11^\circ$  в зависимости от частоты вращения коленчатого вала приведено на рис. 4.

При переходе с дизельного на газодизельный процесс при  $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$  и  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$ , принятого за оптимальный, содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ снижается со 183 до 172 ppm, т. е. на 6 %. При  $n = 1\,900 \text{ мин}^{-1}$  и среднем эффективном давлении  $p_e = 0,84 \text{ МПа}$  содержание оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) при переходе с дизельного на газодизельный процесс снижается с 225 до 190 ppm, т. е. на 15,6 %. Содержание сажи в ОГ уменьшается с 2,5 до 0,1 единицы по шкале Bosch, т. е. в 25 раз. При  $n = 1\,900 \text{ мин}^{-1}$  и  $p_e = 0,84 \text{ МПа}$  содержание сажи в ОГ снижается с 2,0 до 0,1 единицы по шкале Bosch, т. е. в 20 раз. Содержание  $\text{CH}_x$  при  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$  возрастает с 0,01 до 0,17 %, т. е. в 17 раз. При уменьшении частоты вращения до  $1\,900 \text{ мин}^{-1}$  содержание  $\text{CH}$  в ОГ возрастает с 0,01 до 0,20 %, т. е. в 20 раз. Содержание  $\text{CO}$  при  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$  снижается с 0,046 до 0,039 %, т. е. в 1,2 раза, а с уменьшением частоты до  $n = 1\,900 \text{ мин}^{-1}$  — возрастает с 0,042 до 0,050 %, т. е. на 19 % [10].

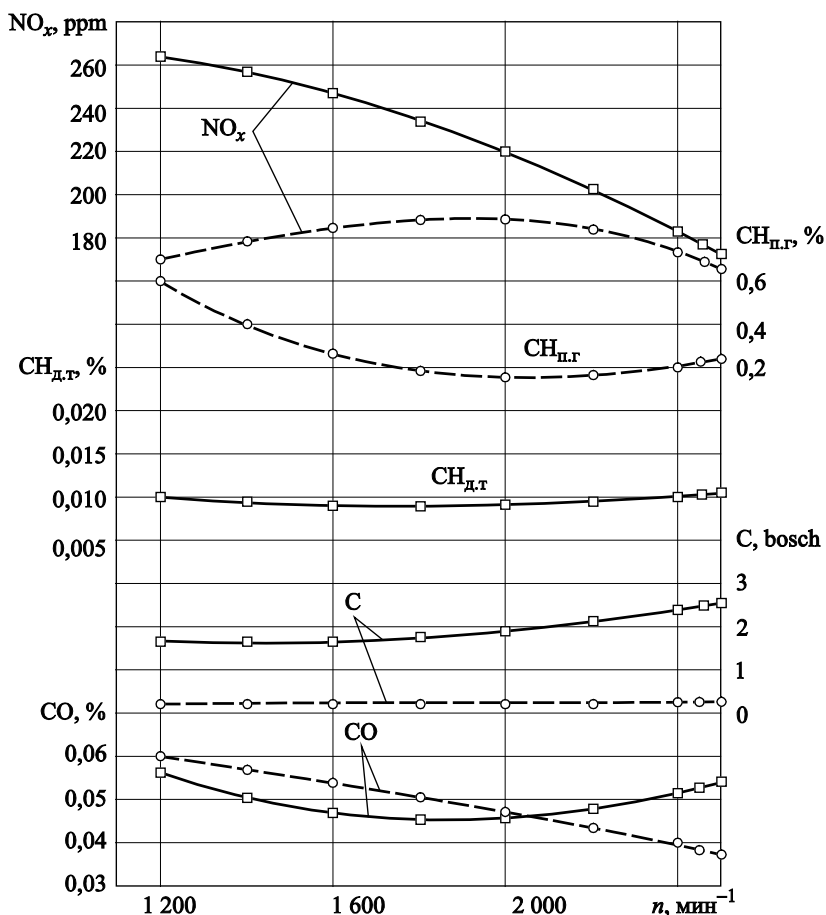


Рис. 4. Зависимость показателей токсичности ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 от частоты вращения коленчатого вала при  $\Theta_{впр} = 11^\circ$ :  
 □ — дизельный процесс; ○ — газодизельный процесс

Эффективные показатели дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с охлаждением наддувочного воздуха в зависимости от частоты вращения коленчатого вала при оптимальных установочных углах опережения впрыскивания топлива представлены на рис. 5.

Анализ графиков работы дизеля на природном газе показал, что при увеличении частоты вращения коленчатого вала возрастает часовой расход суммарного топлива  $G_{т\Sigma}$  с 11,0 кг/ч при  $n = 1\ 400\ \text{мин}^{-1}$  до 18,8 кг/ч при  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$ ; увеличение составляет 7,8 кг/ч, или 70,9 %. С ростом частоты вращения повышается часовой расход запального топлива  $G_{т.зап}$  от 1,6 кг/ч при  $n = 1\ 400\ \text{мин}^{-1}$  до 3,6 кг/ч при  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$ . Удельный эффективный расход суммарного топлива  $g_{e\Sigma}$  составляет 200 г/(кВт·ч) при  $n = 1\ 400\ \text{мин}^{-1}$  и 208 г/(кВт·ч) при  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$ .



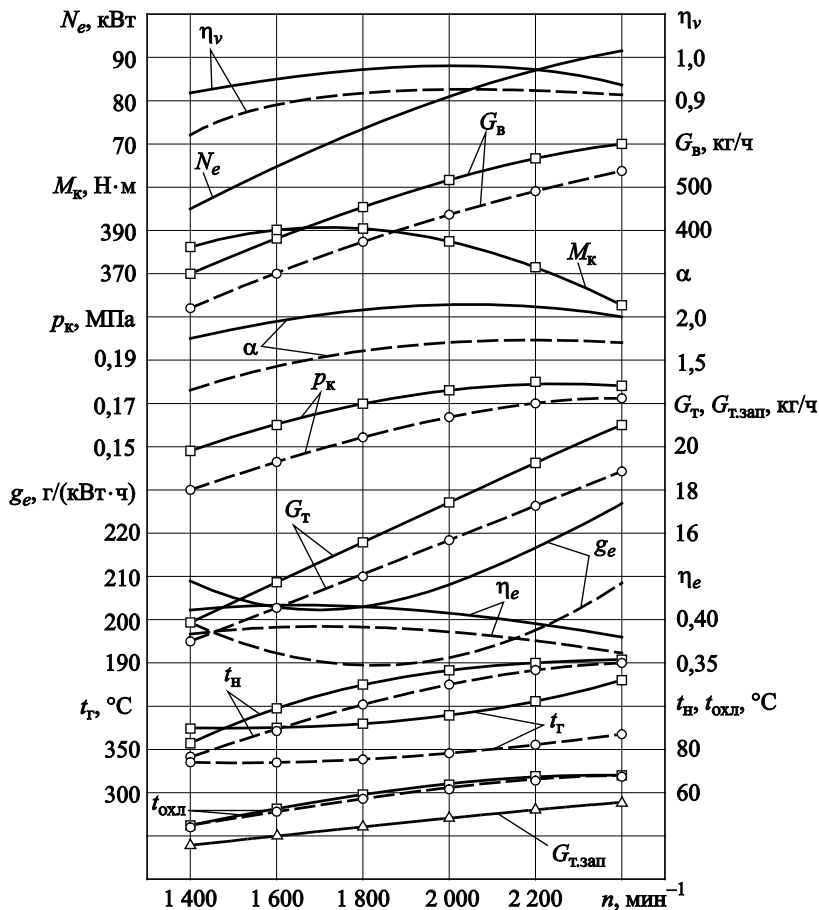


Рис. 5. Зависимость эффективных показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с охлаждением наддувочного воздуха от частоты вращения коленчатого вала:  
 □ —  $N_e$ , —  $N_e$  — дизельный процесс; ○ —  $\eta_e$ , ○ —  $\eta_e$  — газодизельный процесс;  
 △ —  $G_{t.zap}$  — расход запального дизельного топлива

Минимальное значение суммарного удельного расхода топлива достигается при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и составляет  $g_{e\Sigma} = 189 \text{ г/(кВт·ч)}$ . Значение  $\eta_e$  при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  равно 0,385, а при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$   $\eta_e = 0,363$ . Часовой расход воздуха  $G_b$  при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  составляет 228 кг/ч и увеличивается до 533 кг/ч при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ; увеличение составляет 133,8 %. Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  равен 1,16, а при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  составляет 1,69, при этом максимальное значение достигается при  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$  и составляет 1,74. Коэффициент наполнения  $\eta_v$  при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  равен 0,820, а при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  составляет 0,909 [11].

При повышении частоты вращения увеличивается температура ОГ. Например, при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  температура  $t_g = 335 \text{ °C}$ , а при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$   $t_g = 367 \text{ °C}$ ; увеличение составляет 32 °C, или 9,6 %. Давление наддува  $p_k$  при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  составляет 0,130 МПа и уве-

личивается до 0,172 МПа при  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$ . Температура  $t_n$  во впускном трубопроводе на выходе из турбокомпрессора при  $n = 1\ 400\ \text{мин}^{-1}$  составляет  $76\ ^\circ\text{C}$  и увеличивается до  $119\ ^\circ\text{C}$  при  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$ . Температура  $t_{\text{охл}}$  во впускном трубопроводе на выходе из охладителя при  $n = 1\ 400\ \text{мин}^{-1}$  составляет  $45\ ^\circ\text{C}$  и увеличивается до  $68\ ^\circ\text{C}$  при  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$ .

Сравнивая графики работы дизеля на дизельном топливе и природном газе (см. рис. 5), можно отметить следующее. Кривые эффективной мощности  $N_e$  и крутящего момента  $M_k$  при работе на дизельном топливе и природном газе совпадают, т. е. при переходе на природный газ мощностные показатели дизеля полностью сохраняются. При этом значение эффективной мощности  $N_e$  при  $n = 1\ 400\ \text{мин}^{-1}$  составляет 55 кВт и увеличивается до 90 кВт при  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$ . Значение крутящего момента  $M_k$  при  $n = 1\ 400\ \text{мин}^{-1}$  составляет 381 Н·м, увеличивается до 390 Н·м при  $n = 1\ 700\ \text{мин}^{-1}$ , затем уменьшается до 358 Н·м при  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$ .

Суммарный часовой расход топлива  $G_{T\Sigma}$  на всем скоростном диапазоне работы в случае использования природного газа меньше часового расхода топлива, если применяется дизельное топливо, вследствие того, что природный газ имеет большую теплоту сгорания. Так, при  $n = 1\ 400\ \text{мин}^{-1}$  часовой расход топлива при переходе на природный газ снижается с 11,8 до 11,0 кг/ч, или на 6,8 %. При  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$  часовой расход топлива уменьшается с 21 до 18,8 кг/ч, или на 10,5 %. Аналогично значение удельного расхода  $g_{e\Sigma}$  при работе дизеля на природном газе ниже  $g_e$  при работе на дизельном топливе. С переходом на природный газ при  $n = 1\ 400\ \text{мин}^{-1}$  значение  $g_{e\Sigma}$  снижается с 209 до 200 г/(кВт·ч), или на 4,3 %, а при  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$  — с 227 до 208 г/(кВт·ч), или на 8,4 %. При  $n = 1\ 400\ \text{мин}^{-1}$  значение  $\eta_e$  снижается с 0,410 до 0,385, а при  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$  — с 0,380 до 0,363.

В случае перехода на природный газ часовой расход воздуха  $G_b$  при  $n = 1\ 400\ \text{мин}^{-1}$  уменьшается с 300 до 228 кг/ч, или на 24 %, а при  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$  — с 591 до 533 кг/ч, или на 9,8 %. Снижение происходит вследствие того, что часть воздуха на впуске замещается природным газом.

Подача природного газа таким же образом влияет на коэффициент наполнения  $\eta_v$  и коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ . Например, при переходе на природный газ при  $n = 1\ 400\ \text{мин}^{-1}$  значение  $\eta_v$  уменьшается с 0,92 до 0,82, или на 10,9 %, а при  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$  — с 0,938 до 0,909, или на 3,1 %. При  $n = 1\ 400\ \text{мин}^{-1}$  значение  $\alpha$  снижается с 1,75 до 1,16, а при  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$  — с 2,0 до 1,69.

При переходе на природный газ уменьшается температура ОГ. Так, при  $n = 1\ 400\ \text{мин}^{-1}$  значение  $t_f$  снижается с 375 до 335  $^\circ\text{C}$ , или на 10,7 %, а при  $n = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$  — с 430 до 367  $^\circ\text{C}$ , или на 14,7 %.

Уменьшение температуры ОГ свидетельствует о понижении давления и скорости в выпускном трубопроводе, что влияет на степень увеличения частоты вращения ротора турбокомпрессора. Поэтому давление наддува  $p_k$  и температура  $t_n$  на выходе из турбокомпрессора при работе на природном газе также снижаются. При  $n = 1\,400 \text{ мин}^{-1}$  значение  $p_k$  уменьшается с 0,147 до 0,130 МПа, или на 11,6 %, а при  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$  – с 0,178 до 0,172 МПа, или на 3,4 %. При  $n = 1\,400 \text{ мин}^{-1}$  значение  $t_n$  снижается с 84 до 76 °С, или на 9,5 %, а при  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$  – с 121 до 119 °С, или на 1,7 %.

Температура  $t_{\text{охл}}$  на выходе из охладителя при переходе на природный газ практически не изменяется, т. е. при  $n = 1\,400 \text{ мин}^{-1}$  при работе на дизельном топливе и на природном газе  $t_{\text{охл}} = 45 \text{ °С}$ , а при  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$  при переходе на природный газ значение  $t_{\text{охл}}$  снижается с 69 до 68 °С.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с охлаждением наддувочного воздуха на оптимальных установочных углах опережения впрыскивания топлива в зависимости от частоты вращения коленчатого вала приведено на рис. 6.

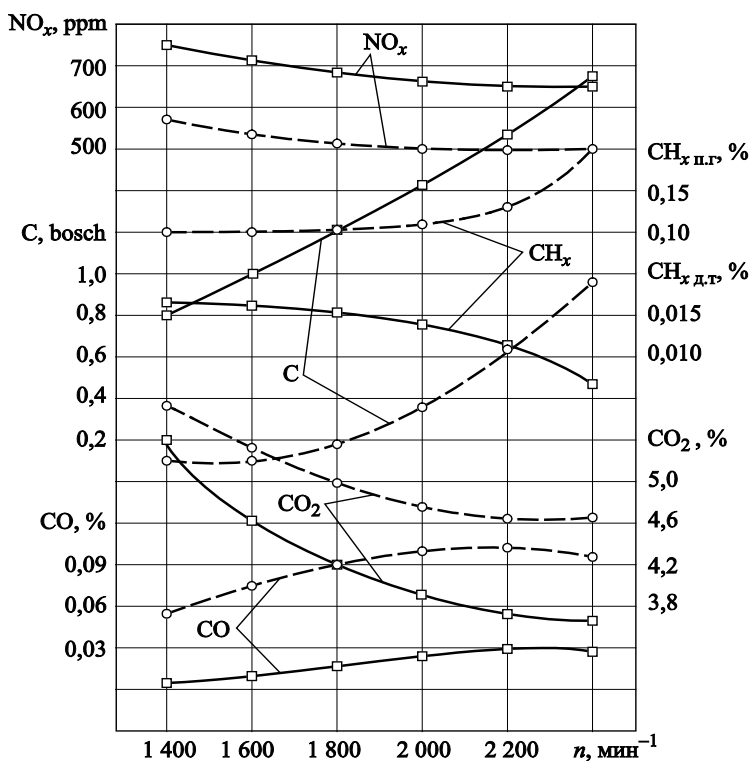


Рис. 6. Зависимость токсических показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с охлаждением наддувочного воздуха от частоты вращения коленчатого вала:

□— дизельный процесс; ○- - газодизельный процесс

Рассматривая изменение токсических показателей при работе дизеля на природном газе, можно сделать следующие выводы. При повышении частоты вращения уменьшается содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ от 583 ppm при  $n = 1\,400 \text{ мин}^{-1}$  до 499 ppm при  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$ ; уменьшение содержания  $\text{NO}_x$  составляет 14,4 %. При работе дизеля на природном газе при увеличении частоты вращения коленчатого вала содержание  $\text{CH}_x$  в ОГ возрастает с 0,1 % при  $n = 1\,400 \text{ мин}^{-1}$  до 0,2 % при  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$ , т. е. в 2 раза. С повышением частоты вращения снижается содержание  $\text{CO}_2$  в ОГ. Например, при  $n = 1\,400 \text{ мин}^{-1}$  содержание  $\text{CO}_2$  в ОГ составляет 5,78 %, а при увеличении частоты вращения до максимальной, т. е. при  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$ , содержание  $\text{CO}_2$  в ОГ составляет 4,72 %. Количество  $\text{CO}_2$  снижается на 18,3 %. Содержание CO в ОГ повышается с 0,060 % при  $n = 1\,400 \text{ мин}^{-1}$  до 0,100 % при  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$ , или на 66,7 %. Дымность ОГ (С) с увеличением частоты вращения возрастает. При  $n = 1\,400 \text{ мин}^{-1}$  дымность ОГ составляет 0,1 единицы по шкале Bosch, а при  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$  — 0,95 единицы по шкале Bosch, т. е. повышается в 9,5 раза [12].

Анализируя изменение содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с охлаждением наддувочного воздуха при переходе с дизельного топлива на природный газ в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала, можно отметить следующее. Содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ при работе дизеля на природном газе меньше, чем при работе на дизельном топливе. Так, при  $n = 1\,400 \text{ мин}^{-1}$  содержание  $\text{NO}_x$  снижается с 750 ppm при использовании в дизеле дизельного топлива до 583 ppm — в случае применения природного газа; снижение составляет 22,3 %. На большей частоте вращения коленчатого вала также происходит снижение содержания  $\text{NO}_x$ . При  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$  количество  $\text{NO}_x$  при работе дизеля на дизельном топливе составляет 650 ppm, а если используется природный газ — 499 ppm; снижение составляет 23,2 %.

Содержание  $\text{CH}_x$  в ОГ при работе дизеля на природном газе на малой частоте вращения ( $n = 1\,400 \text{ мин}^{-1}$ ) повышается и составляет 0,100 % по сравнению с содержанием  $\text{CH}_x$  при работе на дизельном топливе, которое составляет 0,016 %, т. е. увеличивается в 6,3 раза. С увеличением частоты вращения до  $2\,400 \text{ мин}^{-1}$  количество  $\text{CH}_x$  в ОГ при работе дизеля на природном газе также возрастает и составляет 0,2 % по сравнению с содержанием  $\text{CH}_x$ , которое равно 0,007 %, при использовании дизельного топлива, т. е. количество  $\text{CH}_x$  в ОГ увеличивается в 28,6 раза.

Количество  $\text{CO}_2$  в ОГ при работе дизеля на дизельном топливе при частоте вращения  $1\,400 \text{ мин}^{-1}$  составляет 5,5 %, а при работе на природном газе — 5,78 %, т. е. повышается на 5,1 %. В случае повышения частоты вращения до  $2\,400 \text{ мин}^{-1}$  содержание  $\text{CO}_2$  в ОГ при

работе дизеля на дизельном топливе составляет 3,75 %, а на природном газе — 4,72 %, т. е. увеличение содержания  $\text{CO}_2$  составляет 25,9 %.

Содержание  $\text{CO}$  в ОГ при частоте вращения  $n = 1\,400 \text{ мин}^{-1}$  при работе дизеля на дизельном топливе составляет 0,006 %, а при работе на природном газе — 0,060 %; количество  $\text{CO}$  в ОГ возрастает в 10 раз.

При увеличении частоты вращения до  $n = 2\,400 \text{ мин}^{-1}$  содержание  $\text{CO}$  в ОГ дизеля, работающего на дизельном топливе, составляет 0,029 %, а на природном газе — 0,100 %, т. е. увеличивается в 3,4 раза.

Дымность ОГ (С) при работе дизеля на природном газе по сравнению с дымностью при работе на дизельном топливе изменяется с повышением частоты вращения. Например, при  $n = 1\,400 \text{ мин}^{-1}$  у дизеля, работающего на дизельном топливе, значение дымности составляет 0,8 единицы по шкале Bosch, а при использовании в дизеле природного газа — 0,10 единицы по шкале Bosch. Увеличение частоты вращения до  $2400 \text{ мин}^{-1}$  приводит к тому, что при работе дизеля на дизельном топливе значение дымности составляет 1,95 единицы по шкале Bosch, а при работе на природном газе — 0,95 единицы по шкале Bosch, т. е. дымность снижается более чем в 2 раза.

Анализируя изменение содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с охлаждением наддувочного воздуха при переходе с дизельного топлива на природный газ, отметим, что при работе дизеля на природном газе на всем скоростном диапазоне наблюдается увеличение содержания в ОГ дизеля оксида и диоксида углерода, в несколько раз возрастает содержание суммарных углеводородов. При этом значительно снижается содержание оксидов азота и уменьшается дымность ОГ.

**Выводы.** На основании проведенных лабораторно-стендовых исследований рабочих процессов дизелей Д-240 (4ЧН 11,0/12,5), Д-245.12С (4ЧН 11,0/12,5) с турбонаддувом, Д-245.7 (4ЧН 11,0/12,5) с охлаждением наддувочного воздуха установлена возможность улучшения их эффективных и экологических показателей, экономии дизельного топлива путем применения компримированного природного газа. Так, использование природного газа в дизелях позволяет снизить на номинальном режиме работы содержание токсичных компонентов в отработавших газах: в дизеле Д-245.12С оксидов азота на 6,0 %, сажи в 25 раз, оксида углерода в 1,2 раза; в дизеле Д-245.7 оксидов азота на 23,1 %, сажи в 2,1 раза; в дизеле Д-240 (с рециркуляцией ОГ) сажи в 5,8 раза, диоксидов углерода на 45,9 %, оксидов углерода на 23,8 %.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] James C., Szybist P. A highly efficient six-stroke internal combustion engine cycle with water injection for in-cylinder exhaust heat recovery. *Energy* 35, 2010, pp. 1658–1664.

- [2] Lif A., Holmberg K. Water-in-diesel emulsions and related systems. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2006, vol. 123, no. 126, pp. 231–239.
- [3] Subramanian K.A. A comparison of water-diesel emulsion and timed injection of water into the intake manifold of a diesel engine for simultaneous control of NO and smoke emissions. *Energy Conversion and Management* 52, 2011, pp. 849–857.
- [4] Чупраков А.И. Улучшение эффективных показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на этаноле-топливной эмульсии путем совершенствования процессов сгорания и тепловыделения. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2012, 192 с.
- [5] Зонов А.В. Улучшение экологических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на этаноле-топливной эмульсии путем снижения содержания оксидов азота в отработавших газах. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2011, 215 с.
- [6] Девятьяров Р.Р. Улучшение эффективных показателей тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 (Д-240) путем применения природного газа и оптимизации процессов сгорания и тепловыделения. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2003, 220 с.
- [7] Вылегжанин П.Н. Снижение дымности отработавших газов тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 путем применения природного газа. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2003, 210 с.
- [8] Рудаков Л.В. Улучшение эффективных показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе путем оптимизации процессов сгорания и тепловыделения. Дис. ... канд. техн. наук Санкт-Петербург, 2006, 198 с.
- [9] Россохин А.В. Улучшение экологических показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе путем снижения дымности отработавших газов. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2006, 180 с.
- [10] Олейник М.А. Улучшение экологических показателей дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе путем снижения содержания оксидов азота в отработавших газах. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2007, 180 с.
- [11] Гребнев А.В. Улучшение эффективных показателей дизеля с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе путем совершенствования процессов сгорания и тепловыделения. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2009, 215 с.
- [12] Скрыбин М.Л. Улучшение экологических показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха при работе на природном газе путем снижения содержания оксидов азота в отработавших газах. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2009, 210 с.

Статья поступила в редакцию 25.10.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование скоростного режима дизелей Минского моторного завода при работе на природном газе. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-01-1573>

**Лиханов Виталий Анатольевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой тепловых двигателей, автомобилей и тракторов Вятской государственной сельскохозяйственной академии. Область научных интересов: улучшение эксплуатационных показателей дизелей путем применения альтернативных видов топлива, в первую очередь природного газа и спиртов; теоретические и экспериментальные

исследования рабочих процессов, протекающих в цилиндрах автотракторных дизелей при работе на альтернативных видах топлива, и образования основных токсичных компонентов; разработка систем дозирования и регулирования; создание новых смесевых топлив на основе спиртов. Автор более 500 научных работ.  
e-mail: lihanov.va@mail.ru

**Лопатин Олег Петрович** — канд. техн. наук, доцент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов Вятской государственной сельскохозяйственной академии. Область научных интересов: улучшение эксплуатационных показателей дизелей путем применения альтернативных видов топлива, в первую очередь природного газа и спиртов; теоретические и экспериментальные исследования рабочих процессов, протекающих в цилиндрах автотракторных дизелей при работе на альтернативных видах топлива, и образования основных токсичных компонентов; разработка систем дозирования и регулирования; создание новых смесевых топлив на основе спиртов. Автор более 300 научных работ. e-mail: nirs\_vsaa@mail.ru

## Investigating speed modes of Minsk motor plant diesels running on natural gas

© V.A. Likhanov, O.P. Lopatin

Vyatka State Academy of Agriculture, Kirov, 610017, Russia

*We discuss the matters of using compressed natural gas as an alternative engine fuel and of reducing diesel exhaust gas toxicity. We pay particular attention to investigating speed modes of the D-240, turbocharged D-245.12S and intercooled D-245.7 diesels. We present experimental results dealing with the effect of compressed natural gas on power characteristics, economic viability, toxicity and exhaust gas opacity of diesel engines. The obtained results show that the use of compressed natural gas in all types of diesel engines reduce the content of toxic components in the exhaust gases at the nominal mode of operation.*

**Keywords:** diesel, compressed natural gas, turbocharger, toxicity, exhaust gases

### REFERENCES

- [1] James C., Szybist P. *Energy*, 2010, vol. 35, pp. 1658–1664.
- [2] Lif A., Holmberg K. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2006, vol. 123, no. 126, pp. 231–239.
- [3] Subramanian K.A. *Energy Conversion and Management*, 2011, vol. 52, pp. 849–857.
- [4] Chuprakov A.I. *Uluchshenie effektivnykh pokazateley dizelya 4Ch 11,0/12,5 pri rabote na etanolo-toplivnoy emulsii putem sovershenstvovaniya protsessov sgoraniya i teplovydeleniya*. Diss. ... kand. tekhn. nauk. [Improving performance characteristics of the 4ChN 11.0/12.5 diesel running on ethanol-fuel emulsion by means of refining combustion and heat generation processes. Cand. eng. sci. diss.]. Saint Petersburg, 2012, 192 p.
- [5] Zonov A.V. *Uluchshenie ekologicheskikh pokazateley dizelya 4Ch 11,0/12,5 pri rabote na etanolo-toplivnoy emulsii putem snizheniya soderzhaniya oksidov azota v otrabotavshikh gazakh*. Diss. ... kand. tekhn. nauk. [Improving environmental performance of the 4ChN 11.0/12.5 diesel running on ethanol/fuel emulsion by means of decreasing nitrogen oxide content of exhaust gases. Cand. eng. sci. diss.]. Saint Petersburg, 2011, 215 p.
- [6] Devetyarov R.R. *Uluchshenie effektivnykh pokazateley traktornogo dizelya 4Ch 11,0/12,5 (D-240) putem primeneniya prirodnogo gaza i optimizatsii protsessov sgoraniya i teplovydeleniya*. Diss. ... kand. tekhn. nauk. [Improving performance characteristics of the 4ChN 11.0/12.5 (D-240) tractor diesel by means of using natural gas and optimising combustion and heat generation processes. Cand. eng. sci. diss.]. Saint Petersburg, 2003, 220 p.
- [7] Vylegzhanin P.N. *Snizhenie dymnosti otrabotavshikh gazov traktornogo dizelya 4Ch 11,0/12,5 putem primeneniya prirodnogo gaza*. Diss. ... kand. tekhn. nauk. [Reducing exhaust gas opacity of the 4ChN 11.0/12.5 tractor diesel by means of using natural gas. Cand. eng. sci. diss.]. Saint Petersburg, 2003, 210 p.
- [8] Rudakov L.V. *Uluchshenie effektivnykh pokazateley dizelya 4ChN 11,0/12,5 pri rabote na prirodnom gaze putem optimizatsii protsessov sgoraniya i teplovydeleniya*. Diss. ... kand. tekhn. nauk. [Improving performance characteristics of the 4ChN 11.0/12.5 diesel running on natural gas by means of optimis-



- ing combustion and heat generation processes. Cand. eng. sci. diss.]. Saint Petersburg, 2006, 198 p.
- [9] Rossokhin A.V. *Uluchshenie ekologicheskikh pokazateley dizelya 4ChN 11,0/12,5 pri rabote na prirodnom gaze putem snizheniya dymnosti otrabotavshikh gazov*. Diss. ... kand. tekhn. nauk. [Improving environmental performance of the 4ChN 11.0/12.5 diesel running on natural gas by means of decreasing exhaust gas opacity. Cand. eng. sci. diss.]. Saint Petersburg, 2006, 180 p.
- [10] Oleynik M.A. *Uluchshenie ekologicheskikh pokazateley dizelya s turbonadduvom 4ChN 11,0/12,5 pri rabote na prirodnom gaze putem snizheniya sodержaniya oksidov azota v otrabotavshikh gazakh*. Diss. ... kand. tekhn. nauk. [Improving environmental performance of the turbocharged 4ChN 11.0/12.5 diesel running on natural gas by means of decreasing nitrogen oxide content of exhaust gases. Cand. eng. sci. diss.]. Saint Petersburg, 2007, 180 p.
- [11] Grebnev A.V. *Uluchshenie effektivnykh pokazateley dizelya s promezhutochnym okhlazhdeniem nadduvochnogo vozdukha 4ChN 11,0/12,5 pri rabote na prirodnom gaze putem sovershenstvovaniya protsessov sgoraniya i teplovydeleniya*. Diss. ... kand. tekhn. nauk. [Improving performance characteristics of the intercooled 4ChN 11.0/12.5 diesel running on natural gas by means of refining combustion and heat generation processes. Cand. eng. sci. diss.]. Saint Petersburg, 2009, 215 p.
- [12] Skryabin M.L. *Uluchshenie ekologicheskikh pokazateley dizelya 4ChN 11,0/12,5 s promezhutochnym okhlazhdeniem nadduvochnogo vozdukha pri rabote na prirodnom gaze putem snizheniya sodержaniya oksidov azota v otrabotavshikh gazakh*. Diss. ... kand. tekhn. nauk. [Improving environmental performance of the intercooled 4ChN 11.0/12.5 diesel running on natural gas by means of decreasing nitrogen oxide content of exhaust gases. Cand. eng. sci. diss.]. Saint Petersburg, 2009, 210 p.

**Likhanov V.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Heat Engines, Automobiles and Tractors, Vyatka State Academy of Agriculture. Specializes in improving performance characteristics of diesel engines by using alternative fuels, primarily natural gas and alcohols; theoretical and experimental studies of work cycles of automotive diesel engine cylinders running on alternative fuels; formation of primary toxic components; developing metering and regulating systems; formulating new alcohol-based mixed fuels. Author of over 500 scientific publications in these fields.  
e-mail: lihanov.va@mail.ru

**Lopatin O.P.**, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Heat Engines, Automobiles and Tractors, Vyatka State Academy of Agriculture. Specializes in improving performance characteristics of diesel engines by using alternative fuels, primarily natural gas and alcohols; theoretical and experimental studies of work cycles of automotive diesel engine cylinders running on alternative fuels; formation of primary toxic components; developing metering and regulating systems; formulating new alcohol-based mixed fuels. Author of over 300 scientific publications in these fields. e-mail: nirs\_vsaa@mail.ru