

УДК 621.436

Исследование содержания оксидов азота в цилиндре тракторного дизеля с турбонаддувом при работе на природном газе

Study of nitrogen oxides content in the cylinder of turbocharged tractor diesel engine operating on natural gas

В. А. ЛИХАНОВ, д-р техн. наук
О. П. ЛОПАТИН, канд. техн. наук

Вятская государственная сельскохозяйственная академия, Киров, Россия, nirs_vsaa@mail.ru

V. A. LIKHANOV, DSc in Engineering
O. P. LOPATIN, PhD in Engineering

Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russia,
nirs_vsaa@mail.ru

Статья посвящена вопросам применения сжатого природного газа в качестве альтернативного моторного топлива и снижения содержания оксидов азота в отработавших газах дизельного двигателя с турбонаддувом. Особое внимание уделено проблемам образования и разложения оксидов азота в цилиндре дизеля при работе на природном газе, его влиянию на процесс сгорания. С целью определения и оптимизации основных параметров работы дизеля с турбонаддувом на природном газе проведены его стендовые испытания по дизельному и газодизельному процессам. Испытания показали, что дизель устойчиво работает на сжатом природном газе на номинальном режиме при соотношении 80 % газа и 20 % запальной порции дизельного топлива. В дальнейшем исследования рабочего процесса проводились именно при таком соотношении. В статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния сжатого природного газа на показатели токсичности и дымности отработавших газов. Подробно исследованы и определены значения объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в цилиндре дизеля в зависимости от изменения угла поворота коленчатого вала, а также даны показатели процесса сгорания газодизеля с турбонаддувом на различных нагрузочных и скоростных режимах работы. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что применение сжатого природного газа в дизеле с турбонаддувом эффективно и позволяет снизить токсичность отработавших газов. При оптимальном установочном угле опережения впрыскивания топлива, равном 11 градусов, при переходе на газодизельный процесс происходит снижение содержания оксидов азота в отработавших газах на 15,5 %, сажи — в 19 раз, оксида углерода — на 18 %.

Ключевые слова: дизельный двигатель; турбонаддув; сжатый природный газ; оксиды азота; токсичность.

The article is devoted to the application of compressed natural gas as an alternative fuel and the reducing of nitrogen oxides content in exhaust gases of turbocharged diesel engine. Special attention is paid to the problems of formation and decomposition of nitrogen oxides in the cylinder of diesel engine operating on natural gas and its effect on the combustion process. In order to determine and optimize the main parameters of operation of turbocharged diesel engine on natural gas, the block tests for both diesel and gas-diesel processes were conducted; they showed that the diesel was running steadily on compressed natural gas under nominal mode at a ratio of 80 % of gas and 20 % of ignition portion of diesel fuel. Further, the research of working process was carried out exactly in that ratio. The article presents the results of experimental studies of the effect of compressed natural gas on the indices of exhaust toxicity and smoke opacity. The values of volume content and mass concentration of nitrogen oxides in the cylinder of diesel engine depending on the crank angle change are analyzed and determined. The indices of combustion process of turbocharged gas diesel engine under different load and speed operating modes are given. Analysing the obtained results, one can conclude that the application of compressed natural gas as an alternative fuel in turbocharged diesel engine is efficient and allows to reduce exhaust toxicity. Thus, with optimum advance angle of fuel injection of 11 degrees, when switching to gas-diesel process, the nitrogen oxides content in exhaust gases reduces by 15.5 %, the soot — by 19 times, and the carbon oxide — by 18 %.

Keywords: diesel engine; turbocharging; compressed natural gas; nitrogen oxides; toxicity.

Введение

Сжигание топливовоздушной смеси в цилиндре двигателя внутреннего сгорания в условиях высоких температур при локальном или общем недостатке окислителя в смеси приводит к значительному загрязнению окружающей среды токсичными веществами и сажей. Вред, наносимый экологической системе загрязняющими веществами, может быть обусловлен изменением концен-

трации компонентов газа в атмосфере и накоплением в ней частиц и химически активных веществ.

Оксиды азота входят в число наиболее токсичных химических соединений, содержащихся в отработавших газах (ОГ) дизельных двигателей. Они образуются в процессе горения, главным образом как результат химических реакций атмосферного кислорода и азота. Взаимодействуя с парами воды в воздухе, оксиды азота образу-

ют азотную кислоту, которая разрушает легочную ткань, вызывая хронические заболевания.

Цель исследования

Анализ проблемы загрязнения атмосферы ОГ дизелей и определение наиболее опасных из их токсичных компонентов позволяют сделать вывод о необходимости снижения содержания оксидов азота в ОГ. Внедрение эффективных методов снижения содержания этого токсичного компонента — важная научная задача, требующая практического решения.

Материалы и методы

В Вятской ГСХА на кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов проведены исследования по переводу тракторного дизеля с турбонаддувом Д-245.12С (4ЧН 11,0/12,5) на компримированный природный газ (КПГ) [1, 2]. Дизель используется на тракторах МТЗ-100, МТЗ-102, гусеничных тягачах ГАЗ-34031, ГАЗ-34039.

Исследования дизеля с турбонаддувом при работе на КПГ предусматривали проведение стендовых испытаний по дизельному и газодизельному процессам с целью определения и оптимизации основных параметров работы двигателя. Испытания показали, что дизель устойчиво работает на КПГ на номинальном режиме при соотношении 80 % газа и 20 % запальной порции дизельного топлива. Исследования рабочего процесса проводились в дальнейшем именно при таком соотношении.

В качестве загрузочного устройства при испытаниях дизеля применялся электротормозной стенд SAK-N670 (рис. 1, а, б) с балансирной маятниковой машиной. Установка была оснащена необходимым измерительным оборудованием и приборами. Частоту вращения коленчатого вала дизеля измеряли электронным цифровым тахометром ТЦ-1; расход основного топлива — электронным расходомером АИР-50; время опыта — электронным секундомером. Расход газа определяли объемным способом с помощью газового расходомера ГФК-6 с модернизированной системой отсчета на базе счетчика МЭС-66; расход потребляемого дизелем воздуха —

с помощью газового счетчика РГ-400, установленного перед впускным ресивером и счетчиком импульсов МЭС-66. Для индизирования процесса сгорания в цилиндре дизеля применяли электропневматический индикатор МАИ-5А.

Двухступенчатый газовый редуктор для снижения давления газа смонтировали непосредственно рядом со счетчиком для измерения расхода газа. Здесь же расположили фильтр с электромагнитным клапаном для обеспечения безаварийной работы, управляемый с пульта управления. Разрежение во впускном трубопроводе до и после смесителя-дозатора измеряли U-образными жидкостными манометрами; влажность и барометрическое давление окружающего воздуха — психрометром и барометром-анероидом; температуры окружающего воздуха и топлива — ртутными термометрами; температуру ОГ дизеля — хромель-алюмелевыми термопарами. В качестве вторичного прибора применяли логометр М-64. Для проведения стендовых испытаний на КПГ использовали передвижную заправочную станцию на базе тракторного прицепа 2ПТС-4.

Отбор проб ОГ производили газозаборниками системы АСГА-Т (рис. 1, в), установленными на выпускном трубопроводе двигателя. Дымность ОГ измеряли дымомером Bosch EFAW-68А. Регулировку и проверку топливного насоса осуществляли на бестормозном стенде для испытаний топливной аппаратуры КИ-22205; форсунок — на стенде для проверки форсунок КИ-3333.

Результаты и их обсуждение

В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния КПГ на показатели токсичности и дымности ОГ, характеристики процесса сгорания, содержание и массовую концентрацию оксидов азота NO_x в цилиндре дизельного двигателя [3, 4].

Были сняты регулировочные характеристики дизеля в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива (ОВВТ) $\Theta_{\text{впр}}$ при работе по дизельному и газодизельному процессам с одновре-

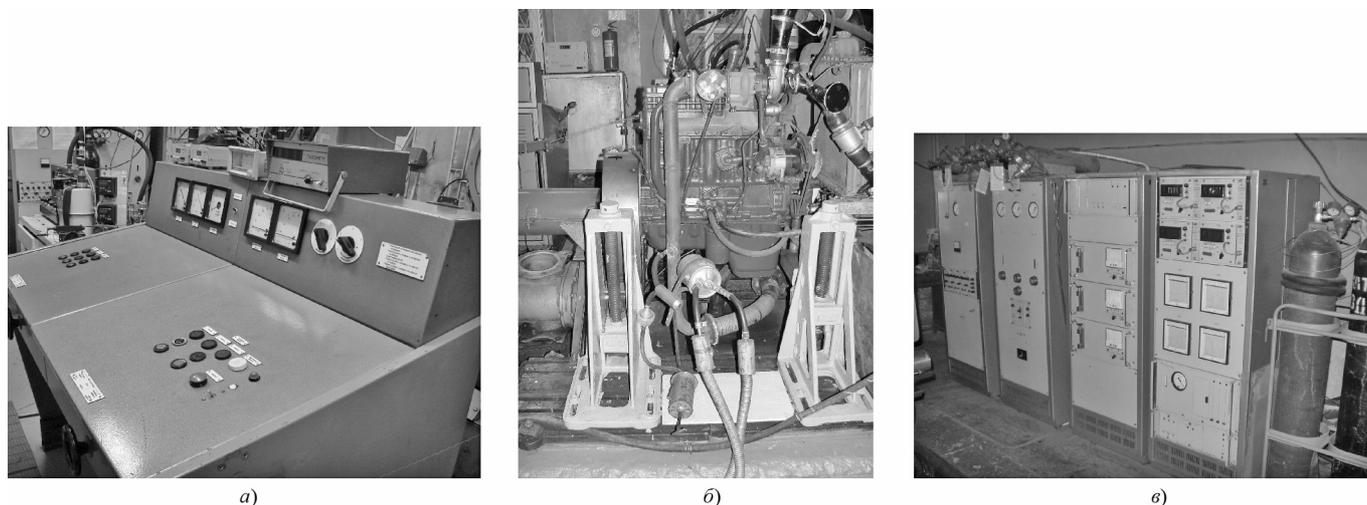


Рис. 1. Общий вид тормозного стенда SAK-N670 (а), установленного на нем двигателя 4ЧН 11,0/12,5 (б) и системы газового анализа АСГА-Т (в)

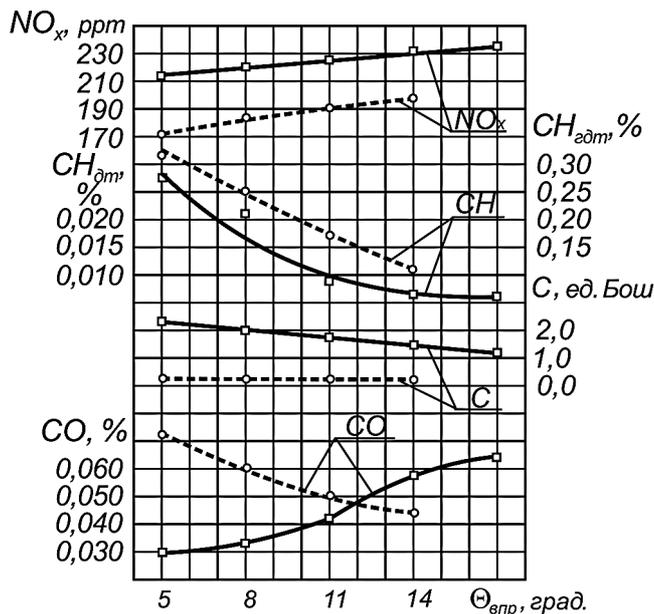


Рис. 2. Влияние применения КПГ на содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от изменения установочного УОВТ при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$:

—■— дизельный процесс; ○---○— газодизельный процесс

менным индицированием рабочего процесса [5] и определением токсичности и дымности ОГ (рис. 2).

Характеристики снимались для определения оптимального значения установочного УОВТ при работе по дизельному и газодизельному процессам при равных значениях средних эффективных давлений, а также для оптимизации экологических и эффективных показателей дизеля и показателей процесса сгорания.

Из представленных на рис. 2 графиков токсичности ОГ для частоты вращения коленчатого вала двигателя $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$, соответствующей максимальному крутящему моменту, видно, что с увеличением установочного УОВТ содержание NO_x в ОГ при работе двигателя по дизельному процессу возрастает от 205 ppm при $\Theta_{впр} = 5^\circ$ до 244 ppm при $\Theta_{впр} = 17^\circ$. При работе двигателя по газодизельному процессу содержание NO_x в ОГ составляет 173 ppm при $\Theta_{впр} = 5^\circ$ и 197 ppm при $\Theta_{впр} = 14^\circ$. Во всем диапазоне изменения установочного УОВТ содержание оксидов азота в ОГ при газодизельном процессе на 14–15 % меньше, чем при дизельном. Так, при $\Theta_{впр} = 11^\circ$ содержание NO_x снижается с 225 до 190 ppm, т. е. на 15,5 %. Это связано с уменьшением коэффициента избытка воздуха, что приводит к меньшему окислению азота кислородом.

Содержание суммарных углеводородов CH_x с увеличением установочного УОВТ в целом снижается как у дизеля, так и у газодизеля, но при этом газодизельный процесс сопровождается увеличением содержания CH_x в ОГ в 11–18 раз по сравнению с дизельным процессом. Так, при $\Theta_{впр} = 11^\circ$ при работе по дизельному процессу содержание CH_x в ОГ составляет 0,01 %, а при работе на природном газе — 0,17 %, т. е. в 17 раз выше. Это вызвано нарушением процесса сгорания при работе на КПГ.

Содержание сажи при работе по дизельному процессу с увеличением установочного УОВТ снижается с 2,2 ед. по шкале Bosch при $\Theta_{впр} = 5^\circ$ до 1,1 ед. по шкале Bosch при $\Theta_{впр} = 17^\circ$. При работе по газодизельному процессу содержание сажи практически не зависит от установочного УОВТ и составляет 0,1 ед. по шкале Bosch. При $\Theta_{впр} = 11^\circ$ при газодизельном процессе содержание сажи в ОГ в 19 раз ниже, чем при дизельном на том же установочном УОВТ. Это объясняется высокой турбулизацией заряда, приводящей к интенсификации процессов выгорания сажевых частиц в цилиндре газодизеля.

Содержание СО при дизельном процессе с увеличением установочного УОВТ возрастает с 0,03 % при $\Theta_{впр} = 5^\circ$ до 0,064 % при $\Theta_{впр} = 17^\circ$. При работе двигателя на КПГ содержание СО, наоборот, снижается. При $\Theta_{впр} = 11^\circ$ оно составляет 0,05 %, что на 18 % ниже, чем при дизельном процессе при том же установочном УОВТ.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что с точки зрения снижения токсичности ОГ дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам оптимален установочный УОВТ, равный 11° , поскольку на этом угле минимальна суммарная токсичность ОГ.

На рис. 3 представлены объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота и показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ для частоты вращения коленчатого вала $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$, соответствующей максимальному крутящему моменту.

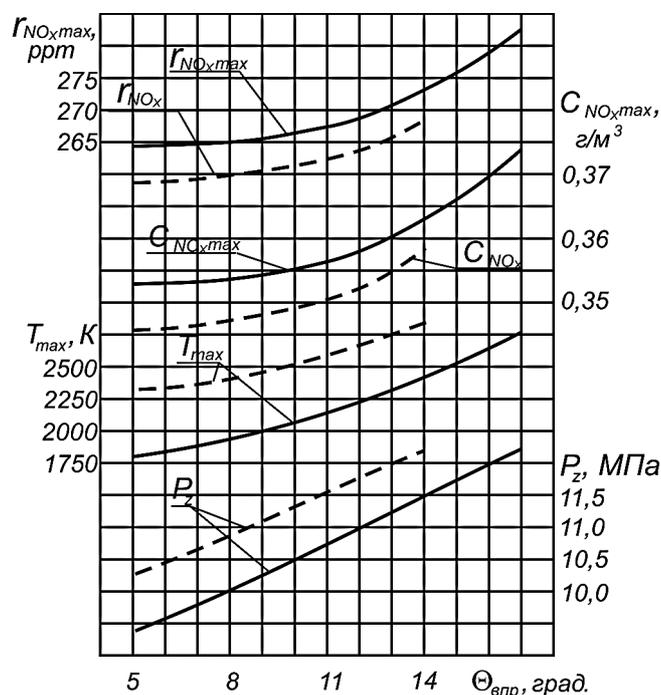


Рис. 3. Влияние применения КПГ на объемное содержание и массовую концентрацию NO_x и показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля в зависимости от изменения установочного УОВТ при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$:

—■— дизельный процесс; ○---○— газодизельный процесс

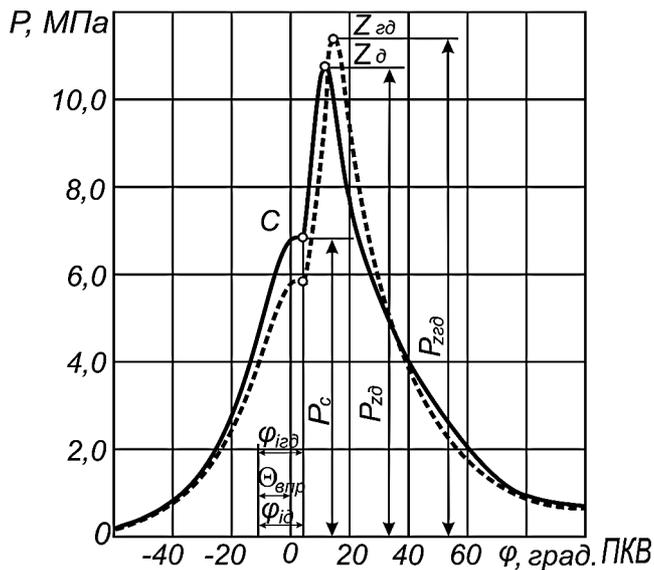


Рис. 4. Влияние применения КПГ на индикаторные диаграммы дизеля при $\Theta_{впр} = 11^\circ$ и $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$:

— — дизельный процесс; ---- — газодизельный процесс

Из графиков на рис. 3 видно, что с увеличением УОВТ при работе по дизельному и газодизельному процессам возрастают объемное содержание и массовая концентрация NO_x , а также максимальные давление газов и температура в цилиндре двигателя.

При всех значениях установочных УОВТ при переходе на газодизельный процесс происходит снижение объемного содержания и массовой концентрации NO_x , увеличение максимальных давления газов и температуры в цилиндре двигателя [6, 7].

Так, при работе по газодизельному процессу при $\Theta_{впр} = 5^\circ$ значения объемного содержания и массовой концентрации NO_x составляют соответственно 258 ppm и $0,0346 \text{ г/м}^3$, что на 2,6 % ниже, чем при дизельном процессе. При работе по газодизельному процессу при $\Theta_{впр} = 11^\circ$ значения объемного содержания и массовой концентрации NO_x составляют соответственно 262 ppm и $0,035 \text{ г/м}^3$, что на 2,2 % ниже, чем при дизельном процессе. Это связано с неравномерным распределением температуры в зоне горения, что значительно влияет на выход оксидов азота.

Таким образом, по показателям объемного содержания и массовой концентрации NO_x и показателям процесса сгорания для газодизеля необходимо принять оптимальный установочный УОВТ, равный 11° .

Увеличение показателей процесса сгорания и характеристик тепловыделения при работе по газодизельному процессу на всех исследуемых УОВТ объясняется в первую очередь тем, что при работе на КПГ увеличивается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, т. е. процесс сгорания происходит за меньший период времени и более интенсивно, что, в свою очередь, препятствует окислению азота. Метано-воздушная смесь в условиях недостатка кислорода замедляет процесс образования оксидов азота в цилиндре, и их содержание в ОГ дизеля снижается.

Индикаторные диаграммы дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при установочном УОВТ, равном 11° , частоте вращения коленчатого вала $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ и нагрузке, соответствующей максимальному крутящему моменту, представлены на рис. 4.

Из графиков на рис. 4 видно, что при работе по газодизельному процессу увеличивается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, и значительно возрастает максимальное давление в цилиндре. Угол наклона кривой давления увеличивается, что свидетельствует о возрастающей жесткости процесса сгорания. На линии расширения кривая давления газодизельного процесса проходит ниже аналогичной кривой дизельного процесса.

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, осредненной температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла ПКВ при работе по дизельному и газодизельному процессам для оптимального установочного УОВТ, равного 11° , и частоты вращения $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ представлены на рис. 5.

Из графиков на рис. 5 видно, что максимальные значения объемного содержания и массовой концентрации NO_x в цилиндре следуют сразу за максимальной температурой цикла, значительно превышают концентрацию NO_x в ОГ и увеличиваются с увеличением максимальной температуры цикла. Так, при $\Theta_{впр} = 11^\circ$ и $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ при работе по газодизельному процессу максимальное объемное содержание NO_x в цилиндре составляет 277 ppm , что на 4 % выше содержания NO_x в цилиндре при работе по дизельному процессу и на 37 %

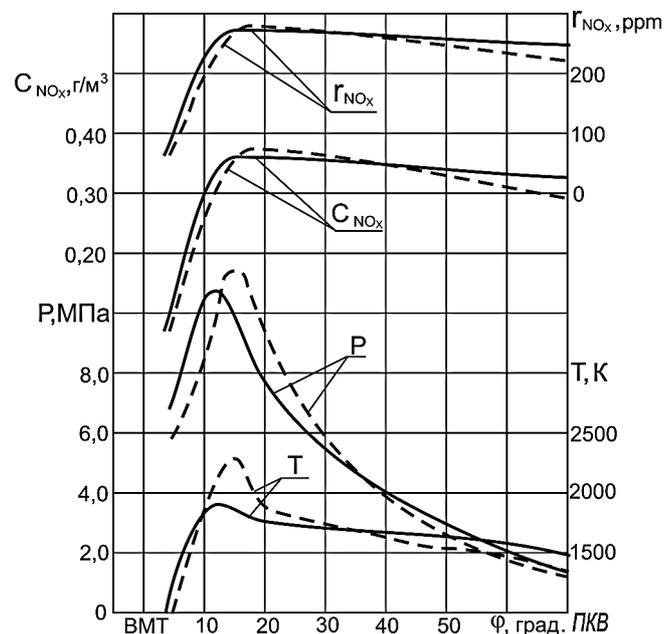


Рис. 5. Влияние применения КПГ на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию NO_x в цилиндре дизеля в зависимости от изменения угла ПКВ при $\Theta_{впр} = 11^\circ$ и $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$:

— — дизельный процесс; ---- — газодизельный процесс

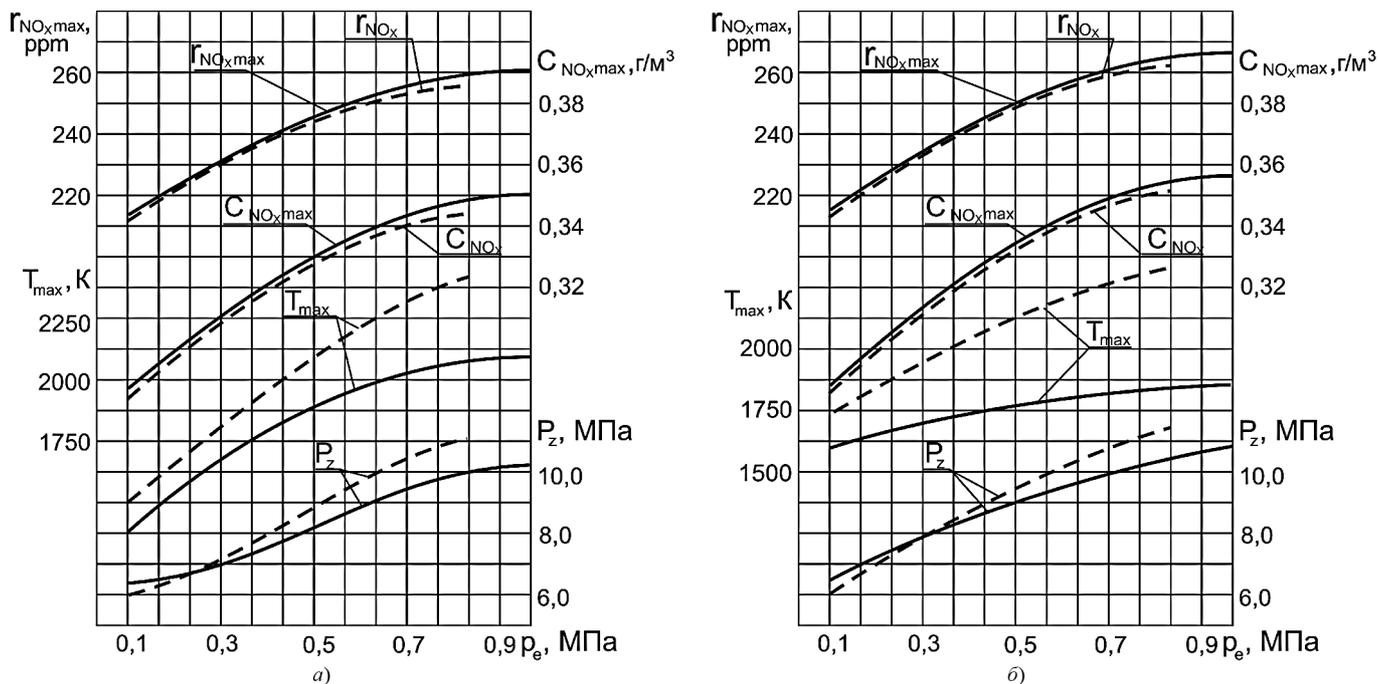


Рис. 6. Влияние применения КПГ на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию NO_x в цилиндре дизеля в зависимости от изменения нагрузки при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$:

a — при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$; *б* — при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$; — — дизельный процесс; ---- — газодизельный процесс

выше содержания NO_x в ОГ газодизеля на этом же режиме.

Максимальное значение объемного содержания NO_x при работе по дизельному процессу составляет 267 ppm; при этом же значении угла ПКВ объемное содержание NO_x при работе по газодизельному процессу составляет 262 ppm, что на 2 % ниже, чем при дизельном процессе. Максимальное значение массовой концентрации NO_x при работе по дизельному процессу составляет 0,0357 г/м³; при этом же значении угла ПКВ массовое содержание NO_x при работе по газодизельному процессу составляет 0,035 г/м³, что на 2 % ниже, чем при дизельном процессе.

Увеличение процентного выгорания топлива в начальный период при работе по газодизельному процессу приводит к снижению доли потерь тепла в этот период. Это вызывает увеличение коэффициента активного тепловыделения, что предопределяет более эффективное использование тепла в цилиндре дизеля в начальный период сгорания основной части топлива [8–10].

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, максимальных температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки для установочного УОВТ, равного 11° , представлены на рис. 6.

Из графиков на рис. 6 видно, что с увеличением нагрузки при работе по дизельному и газодизельному процессам возрастают объемное содержание и массовая концентрация NO_x , максимальные давление газов и температура в цилиндре двигателя. Во всем диапазоне изменения нагрузок при переходе на газодизельный процесс происходит снижение объемного содержания и массовой концентрации NO_x , увеличение максималь-

ных давления газов и температуры в цилиндре. Так (см. рис. 6, *a*), при работе по газодизельному процессу при $p_e = 0,84 \text{ МПа}$ значения объемного содержания и массовой концентрации NO_x составляют соответствен-

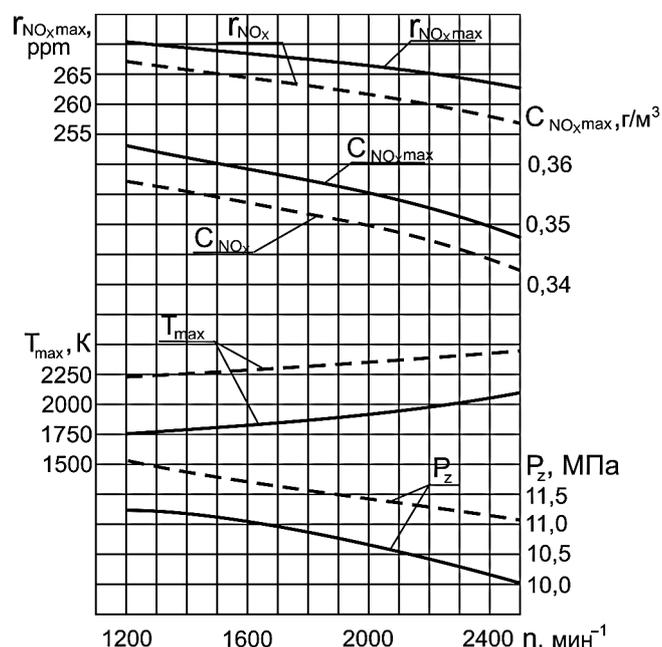


Рис. 7. Влияние применения КПГ на показатели процесса сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию NO_x в цилиндре дизеля в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала при $\Theta_{\text{впр}} = 11^\circ$:

— — дизельный процесс; ---- — газодизельный процесс

но 257 ppm и 0,0345 г/м³, что на 3 % ниже, чем при дизельном процессе.

Графики объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, максимальных температуры и давления газов в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе по дизельному и газодизельному процессам при установочном УОВТ, равном 11°, в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя представлены на рис. 7.

Из графиков на рис. 7 видно, что с увеличением частоты вращения коленчатого вала двигателя происходят снижение объемного содержания и массовой концентрации NO_x и максимального давления газов в цилиндре, а также увеличение максимальной температуры цикла [11].

Так, при работе по газодизельному процессу при увеличении частоты вращения коленчатого вала с 1200 до 2400 мин⁻¹ происходит уменьшение объемного содержания оксидов азота с 267 до 257 ppm и их массовой концентрации с 0,0357 до 0,0344 г/м³. При переходе на газодизельный процесс объемное содержание и массовая концентрация NO_x ниже в среднем на 3 % во всем диапазоне изменения частот вращения коленчатого вала.

Выводы

Представленные графики достаточно убедительно свидетельствуют о возможности снижения содержания оксидов азота в ОГ дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с наддувом при работе на КПП. Так, при оптимальном установочном УОВТ, равном 11°, при переходе на газодизельный процесс на режиме максимального крутящего момента происходит снижение содержания оксидов азота в ОГ на 15,5 %, сажи — в 19 раз, оксида углерода — на 18 %.

Литература и источники

1. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование показателей процесса сгорания в тракторном дизеле при применении природного газа и рециркуляции, метано- и этано-топливных эмульсий // Тракторы и сельхозмашины. 2015, № 9. С. 3—5.
2. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Модель расчета содержания оксидов азота в цилиндре газодизеля // Общество, наука, инновации: Мат-лы Всерос. ежегод. науч.-практ. конф. Киров: Вятский ГУ, 2014. С. 2001—2004.
3. Лопатин О. П. Влияние степени рециркуляции на характеристики процесса сгорания тракторного газодизеля // Молодой ученый. 2015, № 14. С. 166—168.
4. Лопатин О. П. Влияние степени рециркуляции отработавших газов на эффективные и экологические показатели дизеля // Приволжский научный вестник. 2015, № 5—1 (45). С. 90—92.
5. Лопатин О. П. Разработка программы по применению оборудования для испытания газодизелей // Молодой ученый. 2015, № 12 (92). С. 229—232.
6. Лопатин О. П. Химизм процесса образования оксидов азота в цилиндре газодизеля // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2015, № 3 (16). С. 28—30.
7. Лопатин О. П. Исследование индикаторных показателей газодизеля при работе с рециркуляцией отработавших газов // Молодой ученый. 2015, № 10 (90). С. 253—255.
8. Лопатин О. П. Результаты индицирования рабочего процесса газодизеля на режиме максимального крутящего мо-

мента // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2015, № 5 (18). С. 8—9.

9. Лопатин О. П. Улучшение экологических показателей тракторного дизеля путем применения природного газа и рециркуляции // Инновационные направления развития АПК и повышение конкурентоспособности предприятий, отраслей и комплексов — вклад молодых ученых: Мат-лы 18-й междунар. науч.-практ. конф. Ярославль, Ярославская ГСХА, 2015. С. 30—34.

10. Лопатин О. П. Моделирование процесса образования оксидов азота в цилиндре газодизеля // Молодой ученый. 2015, № 11. С. 370—372.

11. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование содержания оксидов азота в цилиндре газодизеля в зависимости от изменения частоты вращения // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2015, № 6 (19). С. 34—36.

References

1. Likhonov V. A., Lopatin O. P. Investigation of indicators of combustion process in tractor diesel engine with the use of natural gas and recirculation, methanol and ethanol fuel emulsions. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2015, no. 9, pp. 3—5 (in Russ.).
2. Likhonov V. A., Lopatin O. P. Model for calculation of nitrogen oxides level in the cylinder of gas-diesel engine. *Obshchestvo, nauka, innovatsii: Mat-ly Vseros. ezhegod. nauch.-prakt. konf.* [Society, science, innovation. Proc. of all-Russian annual sci. and pract. conf.]. Kirov, Vyatka State University, 2014, pp. 2001—2004 (in Russ.).
3. Lopatin O. P. Influence of the degree of recirculation on the characteristics of combustion process of tractor gas-diesel engine. *Molodoy uchenyy*, 2015, no. 14, pp. 166—168 (in Russ.).
4. Lopatin O. P. Influence of the degree of exhaust gases recirculation on efficiency and environmental performance of a diesel engine. *Privolzhskiy nauchnyy vestnik*, 2015, no. 5—1 (45), pp. 90—92 (in Russ.).
5. Lopatin O. P. Development of a program for the use of equipment for gas-diesel engines testing. *Molodoy uchenyy*, 2015, no. 12 (92), pp. 229—232 (in Russ.).
6. Lopatin O. P. Chemistry of nitrogen oxides formation in the cylinder of gas-diesel engine. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya*, 2015, no. 3 (16), pp. 28—30 (in Russ.).
7. Lopatin O. P. Investigation of indicator parameters of gas-diesel engine operating with exhaust gases recirculation. *Molodoy uchenyy*, 2015, no. 10 (90), pp. 253—255 (in Russ.).
8. Lopatin O. P. Results of indexing of gas-diesel engine operating process at maximum torque. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya*, 2015, no. 5 (18), pp. 8—9 (in Russ.).
9. Lopatin O. P. Improving the environmental performance of tractor diesel engine by the use of natural gas and recirculation. *Innovatsionnye napravleniya razvitiya APK i povyshenie konkurentosposobnosti predpriyatiy, otrasley i kompleksov — vklad molodykh uchenykh. Mat-ly 18-y mezhdukar. nauch.-prakt. konf.* [Innovative trends of development of agroindustrial complex and improvement of competitiveness of enterprises, industries and complexes — the contribution of young scientists. Proc. of the 18th int. sci. and pract. conf.]. Yaroslavl, Yaroslavl State Agricultural Academy, 2015, pp. 30—34 (in Russ.).
10. Lopatin O. P. Simulation of the process of nitrogen oxides formation in the cylinder of gas-diesel engine. *Molodoy uchenyy*, 2015, no. 11, pp. 370—372 (in Russ.).
11. Likhonov V. A., Lopatin O. P. Investigation of nitrogen oxides level in the cylinder of gas-diesel engine depending on the change of rotation frequency. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya*, 2015, no. 6 (19), pp. 34—36 (in Russ.).