

Улучшение экологических показателей дизеля при работе на природном газе с рециркуляцией

© 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 дизеля. При этом особое внимание уделено проблемам образования и разложения оксидов азота в цилиндре дизеля при работе на природном газе и его влиянию на процесс сгорания. Представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию компримированного природного газа и рециркуляции на эффективные характеристики, показатели токсичности и дымности отработавших газов. Подробно исследованы и определены характеристики тепловыделения, получены значения объемного содержания оксидов азота в цилиндре в зависимости от изменения угла поворота коленчатого вала.

Ключевые слова: дизель, компримированный природный газ, рециркуляция, оксиды азота, токсичность.

Сжигание топливовоздушной смеси в цилиндре дизеля в условиях высоких температур при локальном или общем недостатке окислителя в смеси приводит к значительному загрязнению природной среды токсичными веществами и сажей. Вред, наносимый экологической системе загрязняющими веществами, обусловлен изменением концентрации компонентов газа в атмосфере и накоплением в ней частиц и химически активных веществ. Отсюда и возникает острая необходимость исследования таких альтернативных источников энергии, которые позволят не только надежно снизить весь спектр токсичных компонентов отработавших газов, но и сохранить или улучшить мощностные и экономические показатели работы дизелей [1–8].

В Вятской государственной сельскохозяйственной академии на кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов проведены исследования по переводу дизеля 4Ч 11,0/12,5 (Д-240) на работу на компримированном природном газе с рециркуляцией отработавших газов.

В целях определения и оптимизации основных параметров работы дизеля при работе на компримированном природном газе с рециркуляцией отработавших газов проведены его стендовые испытания по дизельному, газодизельному и газодизельному с рециркуляцией отработавших газов процессам. Было установлено, что дизель устойчиво работает на компримированном природном газе при соотношении в номинальном режиме, %: газа — 80, запальной порции дизель-

ного топлива — 20. В дальнейшем исследования рабочего процесса проводились именно в таком соотношении.

В качестве загрузочного устройства при испытаниях дизеля применялся электротормозной стенд САК-N670 с балансирующей маятниковой машиной (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Электротормозной стенд:
а — стенд; б — балансирующая маятниковая машина

Установка была оборудована необходимым комплексом, включающим в себя:

электронные измерительные приборы

- цифровой тахометр ТЦ-1;
- расходомер АИР-50;
- секундомер (ЭС);

газовые приборы

- расходомер ГФК-6 с модернизированной системой отсчета на базе счетчика импульсов МЭС-66;
- счетчик РГ-400, установленный перед впускным ресивером и счетчиком импульсов МЭС-66.

С помощью комплекса осуществляли измерения частоты вращения коленчатого вала двигателя (ТЦ-1), расхода основного топлива (АИР-50), времени опыта (ЭС), расхода газа объемным способом (ГФК-6) и воздуха, потребляемого дизелем, (РГ-400).

Степень рециркуляции отработавших газов регулировали заслонкой, установленной в рециркуляционном трубопроводе, и определяли в зависимости от температуры окружающего воздуха (T_o), температуры рециркулируемых газов (T_p) и температуры смеси во впускной системе газодизеля (T_s):

$$\rho = \left(\frac{T_s - T_o}{T_p - T_s} \right) / \left[1 + \left(\frac{T_s - T_o}{T_p - T_s} \right) \right].$$

Дополнительный контроль степени рециркуляции отработавших газов осуществляли газовым счетчиком РГ-400. Охлаждали рециркулируемые газы посредством теплообменника путем передачи тепла охлаждающей жидкости в систему охлаждения дизеля и радиатора, установленного перед масляным радиатором, и в атмосферу (рис. 2). Для индицирования процесса сгорания в цилиндре дизеля применяли электропневматический индикатор МАИ-5А.



Рис. 2. Общий вид двигателя, установленного на стенд:

а — вид на систему рециркуляции отработавших газов; *б* — вид на смеситель-дозатор природного газа и подвод рециркулируемых газов

Двухступенчатый газовый редуктор для снижения давления газа монтировали непосредственно рядом со счетчиком для измерения расхода газа. Здесь же расположили фильтр с электромагнитным клапаном для обеспечения безаварийной работы, управляемый с пульта управления. Давление рециркулируемых и отработавших газов, разрежение во впускном трубопроводе до и после смесителя-дозатора измеряли с помощью *U*-образных жидкостных манометров. Влажность и барометрическое давление окружающего воздуха измеряли психрометром и барометром-анероидом. Температуру окружающего воздуха и температуру топлива измеряли ртутными термометрами. Температуру рециркулируемых и отработавших газов дизеля замеряли с помощью хромель-алюмелевых термопар. В качестве вторичного прибора применяли логомер М-64 для отработавших газов и электронный цифровой вольтметр Ф-4202 для рециркулируемых газов. Для проведения стендовых испытаний на природном газе была использована передвижная заправочная станция на базе тракторного прицепа 2ПТС-4.

Отбор проб отработавших газов проводили газозаборниками системы АСГА-Т, установленными на выпускном трубопроводе двигателя (см. рис. 2). Дымность отработавших газов измеряли с помощью дымомера BOSCH-EFAW-68A. Регулировку и проверку топливного насоса осуществляли на бестормозном стенде для испытаний топ-

ливной аппаратуры КИ-22205. Регулировку и проверку форсунок проводили на стенде для проверки форсунок КИ-3333.

Регулировочные характеристики, в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива, при работе дизеля 4Ч 11,0/12,5 по дизельному, газодизельному и газодизельному с рециркуляцией отработавших газов процессам на номинальной частоте вращения ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$) и частоте вращения при максимальном крутящем моменте ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$) для эффективных показателей представлены на рис. 3.

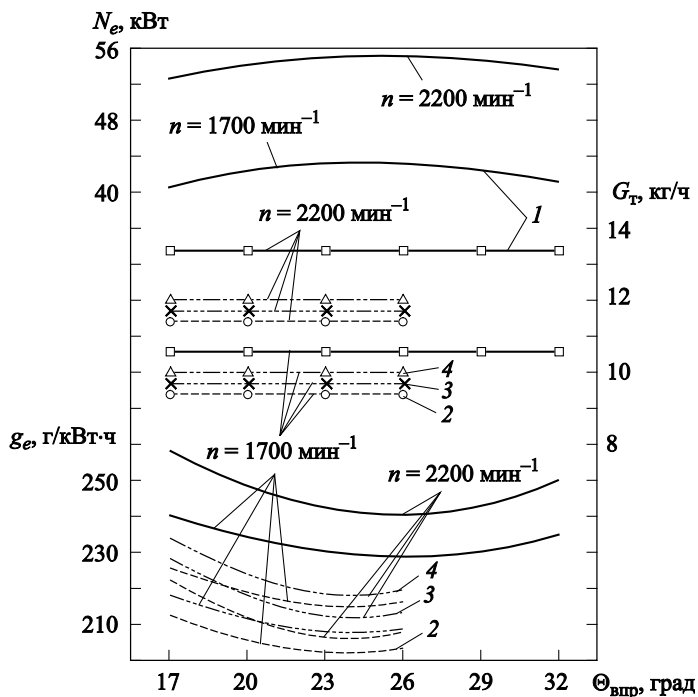


Рис. 3. Влияние применения компримированного природного газа и рециркуляции отработавших газов на эффективные показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5, в зависимости от изменения $\Theta_{впр}$, при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$:

1 — дизельный процесс; 2 — газодизельный процесс; 3 — рециркуляция 10 %; 4 — рециркуляция 20 %

Характеристики снимали для определения оптимального значения регулировочного угла опережения впрыскивания топлива для газодизельного процесса при работе с рециркуляцией отработавших газов для равных значений эффективных давлений. Из данных, приведенных на рис. 3, следует, что при работе на газодизельном режиме с охлаждаемой рециркуляцией отработавших газов установочный угол опережения впрыскивания топлива при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, по условию наилучшей экономичности, составляет $\Theta_{впр} = 23$ град [9]. Часо-

вой расход топлива при газодизельном процессе на оптимальном установочном угле опережения впрыскивания топлива составляет 11,41 кг/ч, а для газодизельного процесса с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов — 11,73 кг/ч, что на 2,8 % больше. Удельный эффективный расход топлива на оптимальном для газодизельного процесса угле составляет 205 г/кВт·ч, а при газодизельном процессе с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов — 211 г/кВт·ч, что на 2,8 % выше.

Когда угол опережения впрыскивания топлива равен 26° , при газодизельном с рециркуляцией отработавших газов процессе увеличивается удельный расход топлива, мощность двигателя остается на том же уровне. Если угол 20° , то удельный расход топлива увеличивается, а мощность двигателя снижается. При частоте вращения на максимальном крутящем моменте и при тех же условиях оптимальный угол опережения впрыскивания топлива на газодизельном режиме с рециркуляцией отработавших газов будет составлять 23° до ВМТ. В случае газодизельного процесса с рециркуляцией отработавших газов ($\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, частота вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$), по условиям обеспечения качественного процесса сгорания, возникает необходимость уменьшения установочного угла опережения впрыскивания топлива из-за повышения максимального давления и жесткости процесса сгорания по отношению к углу 23° .

На рис. 4 представлены показатели процесса сгорания в газодизеле 4Ч 11,0/12,5, в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива, для номинальной частоты вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$.

Максимальное давление p газов в цилиндре уменьшается, когда работа осуществляется по газодизельному процессу с рециркуляцией отработавших газов, и при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и 10%-ной рециркуляции отработавших газов $p = 9,7 \text{ МПа}$, что на 3,9 % ниже, чем в случае чисто газодизельного процесса, и на 9,2 % выше по сравнению с дизельным процессом (см. рис. 4). Снижается жесткость процесса сгорания (условия те же: $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, 10%-ная рециркуляция отработавших газов), $dp/d\phi$ составляет 0,95 МПа/град. Незначительно увеличивается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения [10]. Установочный угол опережения впрыскивания топлива 23° , максимальное давление в цилиндре дизеля в условиях газодизельного процесса составляет 8,5 МПа, но с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов — 8,2 МПа, что на 3,5 % ниже, чем в случае чисто газодизельного процесса, и всего на 1,2 % отличается от дизельного процесса. Жесткость процесса сгорания, если установочный угол опережения впрыскивания топлива 23° при газодизельном процессе с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов, составляет 0,60 МПа/град, что на 15,5 % ниже чисто

газодизельного процесса и на 36,8 % ниже, чем при работе с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов при установочном угле опережения впрыскивания топлива, равном 26° .

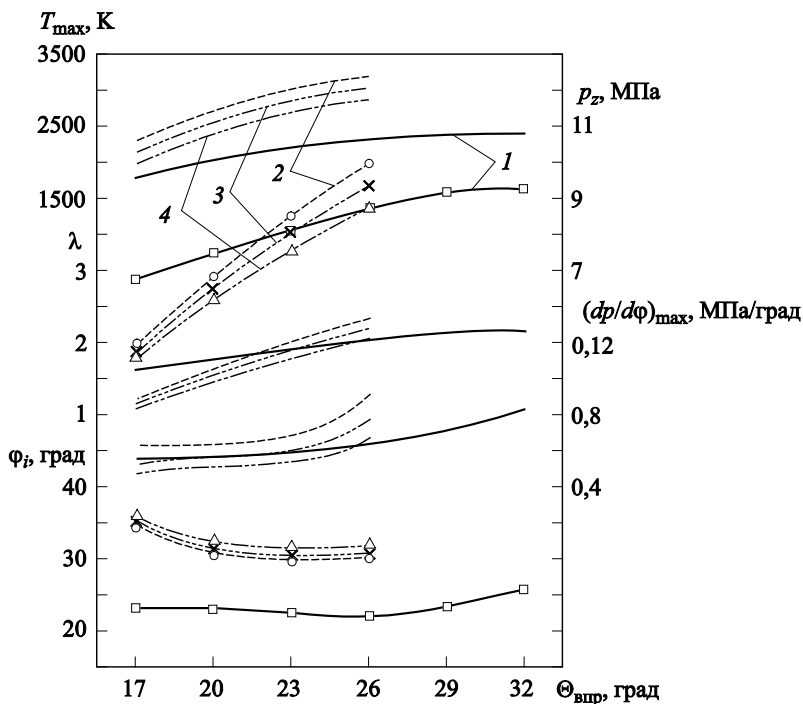


Рис. 4. Влияние применения компримированного природного газа и рециркуляции отработавших газов на показатели процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения $\Theta_{впр}$ при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$. Условные обозначения 1–4 см. на рис. 3

Уменьшение показателей процесса сгорания и характеристик тепловыделения при работе на компримированном природном газе с рециркуляцией отработавших газов на всех исследуемых углах объясняется, в первую очередь, ограниченностью коэффициента избытка воздуха, что приводит к увеличению угла, соответствующего периоду задержки воспламенения, т. е. процесс сгорания протекает за меньший период времени и менее интенсивно, что, в свою очередь, препятствует окислению азота МВС в условиях недостатка кислорода, замедляет процесс образования оксидов азота в цилиндре и, соответственно, снижает содержание оксидов азота в отработавших газах газодизеля.

Содержание токсичных компонентов в отработавших газах газодизеля 4Ч 11,0/12,5, в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива для частоты вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, представлено на рис. 5.

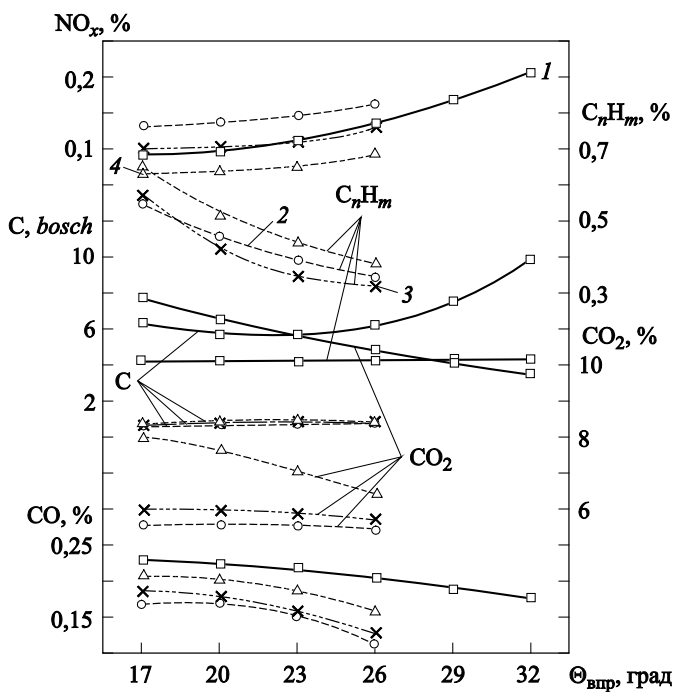


Рис. 5. Влияние применения компримированного природного газа и рециркуляции отработавших газов на содержание токсичных компонентов в отработавших газах дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$.
Условные обозначения 1–4 см. на рис. 3

Изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива обуславливает увеличение содержания оксидов азота в случае работы по газодизельному с рециркуляцией отработавших газов процессу по зависимости, аналогичной для дизельного процесса, т. е. при увеличении угла возрастает и выход оксидов азота (см. рис. 5). Так, при работе газодизеля с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов и угле $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ содержание NO_x в отработавших газах составляет 0,13 %, что на 21,2 % в случае газодизельного процесса и ниже на 3,7 % по сравнению с дизельным процессом. При работе газодизеля с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов и угле $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ содержание NO_x в отработавших газах составляет 0,11 %, что на 24,1 % ниже по сравнению с газодизельным процессом, соответствует дизельному процессу и на 15,4 % ниже, чем в газодизеле с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов, если $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$. Дальнейшее увеличение степени рециркуляции отработавших газов приводит к еще большему снижению содержания оксидов азота, но вызывает увеличение продуктов

неполного сгорания [11]. Газодизельный процесс сопровождается повышением выбросов суммарных углеводородов — их содержание в отработавших газах в 4–5 раз выше по сравнению с дизельным процессом. Концентрация C_nH_m , в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива при газодизельном процессе с рециркуляцией отработавших газов и без нее, уменьшается при увеличении угла опережения впрыскивания топлива. В случае работы газодизеля с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов ($\Theta_{впр} = 26^\circ$) содержание C_nH_m в них составляет 0,32 %, что на 5,9 % ниже по сравнению с газодизельным процессом. Однако если $\Theta_{впр} = 23^\circ$, содержание C_nH_m в них составляет 0,36 %, что на 9,9 % ниже по сравнению с газодизельным процессом. Применение 20%-ной рециркуляции отработавших газов приводит к увеличению содержания C_nH_m до более высоких значений, чем в условиях чисто газодизельного процесса.

Анализ содержания сажи в отработавших газах при работе на газодизельном режиме с рециркуляцией и без нее показывает, что с увеличением угла опережения впрыскивания топлива содержание сажи практически не увеличивается [12]. Применение рециркуляции отработавших газов приводит к незначительному увеличению содержания сажи, в то время как при работе по дизельному процессу содержание сажи существенно повышается. Дымность отработавших газов при газодизельном процессе с рециркуляцией отработавших газов и без нее в 4–5 раз ниже, чем при дизельном процессе. Содержание СО с увеличением угла при работе по газодизельному процессу с рециркуляцией отработавших газов также уменьшается.

В случае газодизельного процесса работы с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов ($\Theta_{впр} = 23^\circ$) содержание СО в отработавших газах на 6,3 % выше в сопоставлении с чисто газодизельным процессом, на 25,6 % ниже, чем при дизельном процессе, и на 23,1 % выше при использовании газодизеля с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов, когда $\Theta_{впр} = 26^\circ$. Содержание CO_2 с увеличением угла на газодизельном режиме с рециркуляцией отработавших газов уменьшается, и с увеличением рециркуляции происходит уменьшение в большей степени [13]. Так, при работе газодизеля с 10%-ной рециркуляцией ($\Theta_{впр} = 23^\circ$) содержание CO_2 в отработавших газах на 5,1 % выше, чем при чисто газодизельном процессе, на 45,4 % ниже, чем в случае дизельного процесса, и на 3,4 % выше в сравнении с работой газодизеля с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов, если $\Theta_{впр} = 26^\circ$.

Таким образом, по результатам регулировочных характеристик, в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива, влияния его на мощностные и экономические показатели

содержание токсичных компонентов в отработавших газах и содержание оксидов азота в цилиндре, параметры процесса сгорания и тепловыделения при частотах вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ был выбран установочный угол опережения впрыскивания топлива, равный 23° до ВМТ, в качестве оптимального для газодизельного процесса с рециркуляцией отработавших газов. Поскольку двигатель не имеет какого-либо устройства для быстрого изменения установочного угла, это же значение рекомендовано и для дизельного процесса.

Содержание токсичных компонентов в отработавших газах газодизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при частоте вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и установочном угле опережения впрыскивания топлива 23° представлено на рис. 6.

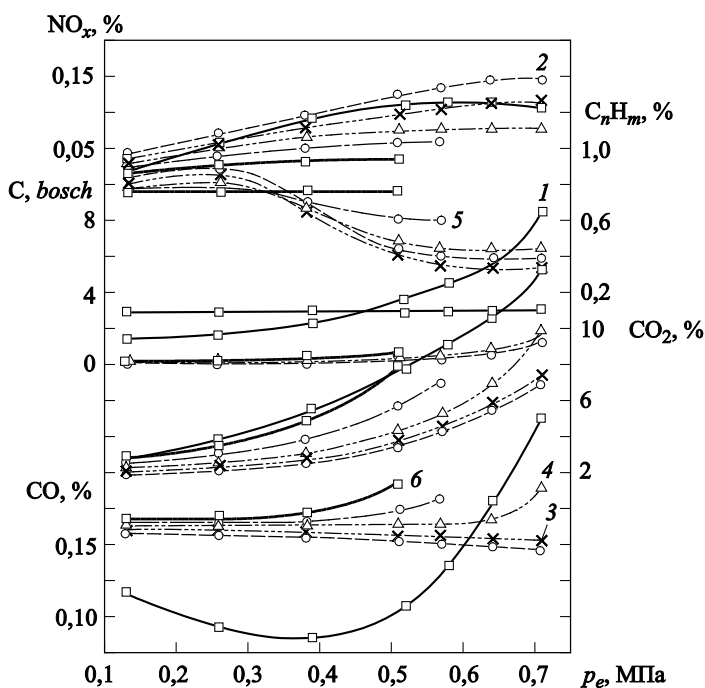


Рис. 6. Влияние применения компримированного природного газа и рециркуляции отработавших газов на показатели их токсичности и дымности для дизеля 4Ч 11,0/12,5, в зависимости от изменения нагрузки, при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{впр} = 23^\circ$.

Условные обозначения 1-4 см. на рис. 3; 5 — рециркуляция 30%; 6 — рециркуляция 40%

Применение компримированного природного газа на дизеле 4Ч 11,0/12,5 приводит к увеличению содержания в отработавших газах оксидов азота (см. рис. 6). Так, на номинальном режиме работы это увеличение составляет 24,1%, а при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ выброс оксидов азота повышается на 60,5%. Применение рециркуляции отработавших газов

снижает содержание оксидов азота в них во всем диапазоне изменения нагрузок. При работе на газодизельном режиме с 40%-ной рециркуляцией отработавших газов в диапазоне изменения нагрузки 0,13...0,26 МПа происходит снижение содержания NO_x на 63,4 %.

В случае работы газодизеля в номинальном режиме с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов содержание NO_x в них на 24,1 % ниже, чем при газодизельном процессе, и соответствует дизельному процессу. Применение рециркуляции отработавших газов вызывает неоднозначное влияние на содержание в них суммарных углеводородов. Так, при работе газодизеля с 40%-ной рециркуляцией отработавших газов на малых нагрузках 0,13...0,26 МПа происходит снижение C_nH_m на 8,7...14,5 %, но если $p_e = 0,51$ МПа, наоборот, — увеличение на 42,5 %.

Наблюдая работу в номинальном режиме с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов, отмечаем снижение содержания C_nH_m на 9,9 %, а увеличение степени их рециркуляции до 20 % обуславливает повышение выброса C_nH_m с отработавшими газами на 10,2 % относительно чисто газодизельного процесса. Существенно снижается содержание в отработавших газах сажи при работе по газодизельному процессу [14]. Работа газодизеля с 40%-ной рециркуляцией отработавших газов на малых нагрузках увеличивает содержание сажи в них не более чем на 5 %. При работе в номинальном режиме с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов происходит увеличение выбросов сажи на 4,1 %, если $\rho = 20$ % — на 12,5 %. Применение рециркуляции отработавших газов на газодизеле приводит к увеличению содержания CO и CO_2 во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при работе с 40%-ной рециркуляцией отработавших газов при средних нагрузках 0,26...0,38 МПа содержание CO и CO_2 увеличивается от 12,3 до 17,1 % и от 42,2 до 48,8 % соответственно. Работа с 20%-ной рециркуляцией отработавших газов при номинальной нагрузке обуславливает увеличение их содержания на 18,9 и 20,0 %, при снижении рециркуляции до 10 % увеличение составляет 6,3 и 5,1 % для CO и CO_2 соответственно. Отметим, что значительный рост суммарных углеводородов на больших нагрузках объясняется неполнотой сгорания топлива в условиях недостатка окислителя с увеличением степени рециркуляции отработавших газов.

Индикаторные диаграммы газодизеля 4Ч 11,0/12,5, полученные экспериментально с помощью индикатора МАИ-5А, при работе по дизельному, газодизельному и газодизельному с рециркуляцией отработавших газов процессам на установочном угле опережения впрыскивания топлива 23° , частоте вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и номинальной нагрузке представлены на рис. 7.

При переходе на газодизельный процесс с рециркуляцией отработавших газов уменьшается максимальное давление газов в цилин-

дре, жесткость процесса, увеличивается угол, соответствующий периоду задержки воспламенения [15, 16]. При работе по газодизельному с рециркуляцией отработавших газов процессу увеличивается период задержки воспламенения, снижается максимальное давление газов в цилиндре (см. рис. 7).

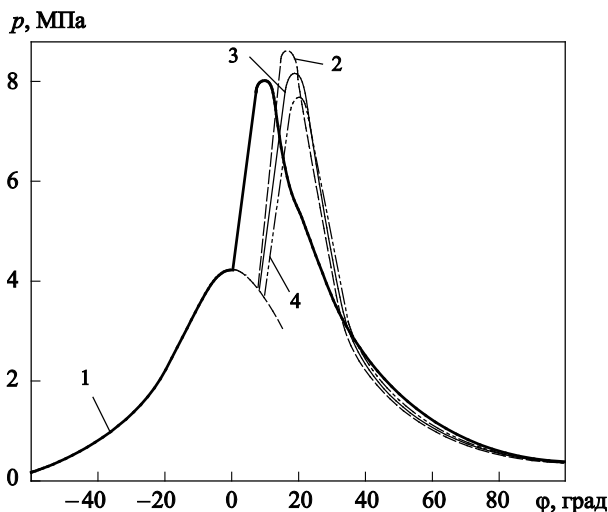


Рис. 7. Влияние применения компрессированного природного газа и рециркуляции отработавших газов на индикаторные диаграммы дизеля 4Ч 11,0/12,5 при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,63 \text{ МПа}$, $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$.
Условные обозначения 1–4 см. на рис. 3

Содержание оксидов азота, динамика выделения теплоты, температура газов, скорость отвода теплоты и полезное выделение теплоты в цилиндре дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла поворота коленчатого вала при работе по дизельному, газодизельному и газодизельному с рециркуляцией отработавших газов процессам для частоты вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, установочного угла опережения впрыскивания топлива 23° и номинальной нагрузки представлены на рис. 8.

Максимальное содержание оксидов азота в цилиндре следует сразу за максимальной температурой цикла, значительно превышает содержание оксидов азота в отработавших газах и увеличивается с повышением максимальной температуры цикла (см. рис. 8). Так, при работе по газодизельному процессу с 20%-ной рециркуляцией отработавших газов максимальное содержание оксидов азота составляет 0,16 %, что по сравнению с газодизельным и дизельным процессами на 29,8 и 8,6 % ниже соответственно и на 53,1 % выше содержания оксидов азота в отработавших газах в таком же режиме. Следовательно, с уменьшением температуры происходит активное разложение образовавшегося оксида азота. Работа по газодизельному процессу с рециркуляцией

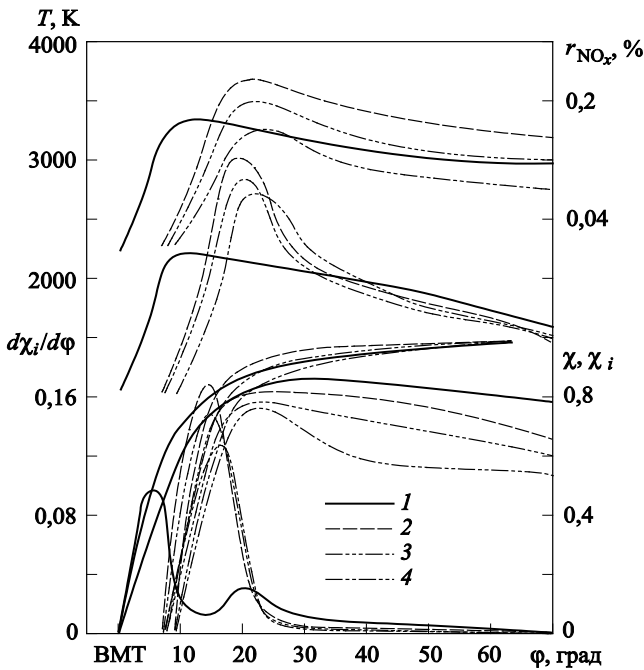


Рис. 8. Влияние применения компримированного природного газа и рециркуляции отработавших газов на характеристики тепловыделения и содержание оксидов азота в цилиндре дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла поворота коленчатого вала двигателя при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; $p_e = 0,63 \text{ МПа}$, $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$.
Условные обозначения 1–4 см. на рис. 3

отработавших газов способствует уменьшению скорости активного выделения теплоты. Газодизельный процесс с рециркуляцией отработавших газов характеризуется снижением температуры газов в цилиндре, смещением максимального значения в сторону от ВМТ. Так, при работе газодизеля с 10%-ной рециркуляцией отработавших газов на номинальном режиме происходит снижение максимальной температуры газов в цилиндре с температурой 3000 К при чисто газодизельном процессе до температуры 2850 К, при 20%-ной рециркуляции отработавших газов максимальная температура цикла составляет 2700 К, что на 300 К ниже по сравнению с применением чисто газодизельного процесса.

Выводы. В результате изучения современного состояния проблемы токсичности отработавших газов, способов снижения токсичности, проведения расчетно-теоретических и экспериментальных исследований предложено решение улучшения экологических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 (Д-240) с камерой сгорания ЦНИДИ (Центральный научно-исследовательский дизельный институт) при работе на компримированном природном газе с рециркуляцией отработавших газов.



Рис. 9. Система питания на сжатом природном газе с рециркуляцией отработавших газов для двигателя, установленного на тракторе

На основании экспериментальных стендовых исследований рабочего процесса дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на сжатом природном газе с рециркуляцией отработавших газов установлена закономерность подачи рециркулируемых газов в зависимости от нагрузки дизеля, позволяющая регулировать до 40 % отработавших газов.

Экспериментальными исследованиями рабочего процесса дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на сжатом природном газе с рециркуляцией отработавших газов установлено, что система питания на сжатом природном газе позволяет замещать до 80 % дизельного топлива, что снижает содержание токсичных компонентов в отработавших газах, %: сажевое содержание — на 80; CO — на 40; CO₂ — на 45.

Разработана система регулирования подачи рециркулируемых газов во впускной трубопровод в зависимости от режимов работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на сжатом природном газе.

Разработана техническая и конструкторская документация и создан макетный образец трактора МТЗ-80 с системой питания, модернизированной для работы на сжатом природном газе с рециркуляцией отработавших газов (рис. 9), имеющий улучшенные экологические показатели и предназначенный для работы в помещениях с ограниченным воздухообменом, в экологически экстремальных условиях; проведены его функциональные испытания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Минкин И.М., Карницкий В.В. Газодизель — силовая установка XXI века. *Автомобильная промышленность*, 2002, № 5, с. 4–8.
- [2] Долганов К.Е., Лисовал А.А., Колесник Ю.И. Система питания и регулирования для переоборудования дизелей в газодизели. *Двигателестроение*, 1999, № 1, с. 37–40.
- [3] Гуляев С.А. Сжатый газ как моторное топливо. *Автомобильная промышленность*, 1995, № 2, с. 28–30.

- [4] Фучкин С.В. Перевод двигателя на газодизельный процесс. *Автомобильная промышленность*, 1999, № 2, с. 24–27.
- [5] Whitehouse H.D. Advances in British dual fuel and gas engines. *Diesel Eng. And Esers Assoc*, 1973, no. 353, pp. 3–11.
- [6] Witzry Julis E. Ein schichtgelanderer Gasmotor. *MTZ*, 1974, no 8, s. 251–254.
- [7] Chen T.N., Alford R.N. Combustion characteristics of large gas engines. *Pap. ASME*, 1971, pp. 6–8.
- [8] Miles J.A. Power unit modification to accomodate interruptible flow of natural gas. *Trans. ASAE*, 1977, no. 3, pp. 406–407.
- [9] Лопатин О.П. Влияние применения природного газа на показатели процесса сгорания и содержание оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом. *Молодой ученый*, 2015, № 13, с. 139–141.
- [10] Лопатин О.П. Исследование индикаторных показателей газодизеля при работе с рециркуляцией отработавших газов. *Молодой ученый*, 2015, № 10 (90), с. 253–255.
- [11] Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование показателей процесса сгорания в тракторном дизеле при применении природного газа и рециркуляции, метанолю- и этанолю-топливных эмульсий. *Тракторы и сельхозмашины*, 2015, № 9, с. 3–5.
- [12] Лопатин О.П. Разработка программы по применению оборудования для испытания газодизелей. *Молодой ученый*, 2015, № 12 (92), с. 229–232.
- [13] Лопатин О.П. Влияние степени рециркуляции отработавших газов на эффективные и экологические показатели дизеля. *Приволжский научный вестник*, 2015, № 5-1 (45), с. 90–92.
- [14] Лопатин О.П. Влияние степени рециркуляции на характеристики процесса сгорания тракторного газодизеля. *Молодой ученый*, 2015, № 14, с. 166–168.
- [15] Лопатин О.П. Исследование скоростного режима газодизеля при работе с рециркуляцией. *Молодой ученый*, 2015, № 11, с. 379–383.
- [16] Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование мощностных и экономических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на природном газе, метанолю- и этанолю-топливных эмульсиях. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2016, № 2(50), с. 43–49.

Статья поступила в редакцию 08.04.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лиханов В.А., О.П. Лопатин. Улучшение экологических показателей дизеля при работе на природном газе с рециркуляцией. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-04-1479>

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 по изучению рабочих процессов, протекающих в цилиндрах автотракторных дизелей при работе на альтернативных видах топлива, образованию основных токсичных компонентов, разработке систем дозирования и



регулирования, созданию новых смесевых топлив на основе спиртов. Автор более 500 научных работ в указанной области. 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 по изучению рабочих процессов, протекающих в цилиндрах автотракторных дизелей при работе на альтернативных видах топлива, образованию основных токсичных компонентов, разработке систем дозирования и регулирования, созданию новых смесевых топлив на основе спиртов. Автор более 250 научных работ в указанной области. e-mail: nirs_vsaa@mail.ru

Improving the environmental performance indicators of a diesel engine operating on natural gas with recirculation

© V.A. Likhanov, O.P. Lopatin

Vyatka State Academy of Agriculture, Kirov, 610017, Russia

The article considers the issues of using compressed natural gas as alternative vehicle fuel and reducing the toxicity of diesel engine exhaust gases. Special attention is paid to the problems of nitrogen oxides generation and decomposition in the cylinder of a diesel engine operating on natural gas, its impact on the combustion process. The article presents the results of experimental studies of the effect of compressed natural gas and recycling on the effective characteristics, the toxicity and opacity of exhaust gases. Characteristics of heat generation are studied in details and determined, the values of volume content of nitrogen oxides in the cylinder against the change of crankshaft rotation angle are obtained.

Keywords: diesel, compressed natural gas, recirculation, nitrogen oxides, toxicity.

REFERENCES

- [1] Minkin I.M., Karnitskiy V.V. *Avtomobilnaya promyshlennost — Automotive industry*, 2002, no. 5, pp. 4–8.
- [2] Dolganov K.E., Lisoval A.A., Kolesnik Yu.I. *Dvigatellestroenie — Engine Technology*, 1999, no. 1, pp. 37–40.
- [3] Gulyaev S.A. *Avtomobilnaya promyshlennost — Automotive industry*, 1995, no. 2, pp. 28–30.
- [4] Fuchkin S.V. *Avtomobilnaya promyshlennost — Automotive industry*, 1999, no. 2, pp. 24–27.
- [5] Whitehouse H.D. Advances in British dual fuel and gas engines. *Diesel Eng. and Esers Assoc.*, 1973, no. 353, pp. 3–11.
- [6] Witzry Julis E. Ein schichtgelanderer Gasmotor. *MTZ*. 1974, no. 8, pp. 251–254.
- [7] Chen T.N., Alford R.N. Combustion characteristics of large gas engines. *ASME Papers*, 1971, pp. 6–8.
- [8] Miles J.A. Power unit modification to accommodate interruptible flow of natural gas. *Trans. ASAE*, 1977, no. 3, pp. 406–407.
- [9] Lopatin O.P. *Molodoy uchenyy — Young Scholar*, 2015, no. 13, pp. 139–141.
- [10] Lopatin O.P. *Molodoy uchenyy — Young Scholar*, 2015, no. 10 (90), pp. 253–255.
- [11] Likhanov V.A., Lopatin O.P. *Traktory i selkhoz mashiny — Tractors and Farm Machinery*, 2015, no. 9, pp. 3–5.
- [12] Lopatin O.P. *Molodoy uchenyy — Young Scholar*, 2015, no. 12 (92), pp. 229–232.
- [13] Lopatin O.P. *Privolzhskiy nauchnyy vestnik — Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, 2015, no. 5–1 (45), pp. 90–92.
- [14] Lopatin O.P. *Molodoy uchenyy — Young Scholar*, 2015, no. 14, pp. 166–168.
- [15] Lopatin O.P. *Molodoy uchenyy — Young Scholar*, 2015, no. 11, pp. 379–383.
- [16] Likhanov V.A., Lopatin O.P. *Transport na alternativnom toplive — Transport on alternative fuels*, 2016, no. 2 (50), pp. 43–49.

Likhanov V.A. (b. 1949) graduated from Kirov Agricultural Institute, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Heat Engines, Automobiles and Tractors, Vyatka State Academy of Agriculture. Research interests: improving the performance of diesel engines by using alternative fuels primarily natural gas and alcohols, theoretical and experimental study of working processes in the cylinders of automotive diesel engines working on alternative fuels, generating major toxic components, developing systems of metering and regulation, creating new mixed fuels based on alcohols. The author of over 500 research publications in the field of interests. e-mail: lihanov.va@mail.ru

Lopatin O.P. (b. 1979) graduated from Vyatka State Academy of Agriculture, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Heat Engines, Automobiles and Tractors, Vyatka State Academy of Agriculture. Research interests: improving the performance of diesel engines by using alternative fuels primarily natural gas and alcohols, theoretical and experimental study of working processes in the cylinders of automotive diesel engines working on alternative fuels, generating major toxic components, developing systems of metering and regulation, creating new mixed fuels based on alcohols. The author of over 250 research publications in the field of interests. e-mail: nirs_vsaa@mail.ru