

Научная статья
УДК 621.436

К вопросу снижения оксидов азота в дизельном ДВС организацией его рабочего процесса

Александр Викторович Шабанов¹, Владимир Константинович Ванин²,
Андрей Юрьевич Дунин³, Михаил Георгиевич Шатров⁴

^{1,2}Государственный научный центр Российской Федерации ФГУП «НАМИ», Москва, Россия

^{3,4}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹saaha-1955@mail.ru

²v.vanin@nami.ru

³a.u.dunin@yandex.ru

⁴dvs@madi.ru

Аннотация. В настоящее время не разработаны достаточно эффективные системы нейтрализации оксидов азота (NO_x) для дизелей. Системы, применяемые на дизельных автомобилях, позволяют получить эффективность нейтрализации NO_x в среднем 60 ... 70%. Используемые конструкции не позволяют увеличить их эффективность выше уже достигнутой. С применением современных систем впрыскивания топлива с электронным управлением возможна реализация процесса нейтрализации оксидов азота при впрыскивании аммиака (NH_3) в камеру сгорания на такте выпуска. Учитывая, что NH_3 при горении может образовывать NO_x , его надо подавать в цилиндр дизеля при определенных температурных условиях. Так его впрыскивание при относительно невысоких температурах (700 ... 900°C) будет способствовать эффективному протеканию реакциям восстановления азота из NO_x .

Ключевые слова: дизель, грузовой автомобиль, впрыскивание аммиака, нейтрализация отработавших газов дизеля, оксиды азота.

Для цитирования: Шабанов А.В., Ванин В.К., Дунин А.Ю., Шатров М.Г. К вопросу снижения оксидов азота в дизельном ДВС организацией его рабочего процесса // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №2 (36).

Original article

**On the issue of reducing the content of nitrogen oxides in a diesel engine
by organizing its workflow**

Alexander V. Shabanov¹, Vladimir K. Vanin², Andrey Yu. Dunin³, Mikhail G. Shatrov⁴

^{1,2}Federal State Unitary Enterprise «Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute» (FSUE «NAMI»), Moscow, Russia

^{3,4} Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹saaha-1955@mail.ru

²v.vanin@nami.ru

³a.u.dunin@yandex.ru

⁴dvs@madi.ru

Abstract. Currently, sufficiently effective systems for neutralizing nitrogen oxides (NO_x) for diesel engines have not been developed. The systems used on diesel cars make it possible to obtain neutralization efficiency of 60 ... 70% on average. The designs used do not allow to increase their efficiency above what has already been achieved. With the use of modern fuel injection systems with electronic control, it is possible to implement the process of neutralization of nitrogen oxides when ammonia (NH_3) is injected into the combustion chamber at the exhaust stroke. Given that NH_3 can form NO_x during combustion, it must be fed into the diesel cylinder under certain temperature conditions. Thus, its injection at relatively low temperatures (700 ... 900°C) will contribute to the effective course of nitrogen reduction reactions from NO_x .

Keywords: diesel, truck, ammonia injection, diesel exhaust gas neutralization, nitrogen oxides.

For citation: Shabanov A.V., Vanin V. K., Dunin A.Yu., Shatrov M.G. On the issue of reducing the content of nitrogen oxides in a diesel engine by organizing its workflow. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №2 (36).

Введение

Выбросы оксидов азота (NO_x) дизельными грузовыми автомобилями и автобусами с ростом парка этих автомобилей в последние годы возрастает. Ответной мерой стало введение новых более жестких экологических требований практически во всех технически развитых странах Мира. Так, например, при введении норм Евро-6 предусмотрено ужесточение выбросов NO_x в 5 раз относительно уровня, установленного Евро-5. Это объясняется тем фактом, что по степени вредного воздействия на организм человека

оксиды азота на порядок более токсичны чем продукты неполного сгорания топлива: оксид углерода СО и углеводороды СН.

NO_x образуют в воздухе аэрозоли азотной кислоты, которые в малых концентрациях вызывают раздражение дыхательных путей, а при больших воздействие их на организм человека может приводить к заболеваниям бронхов и легких. По этой причине государственными санитарными службами осуществляется контроль по нормам ГН 2.1.6.695-98 Российской Федерации и ГОСТ 12.1.005-88 измерением передвижными лабораториями предельно-допустимых концентраций непосредственно в воздухе у автострад и в жилых районах городов.

На основе результатов проведенных измерений показано, что для населённых пунктов, через которые проходят автотрассы, и, особенно, для водителей транспортных средств существует проблема высокой загрязнённости воздушной среды вредными выбросами от грузовых автомобилей (рис. 1). Значимый вклад в это вредное воздействие оказывают NO_x [1, 2, 3]. Во многом это связано с отсутствием достаточно эффективных системы их нейтрализации для дизелей.



Рис. 1. Поток дизельных грузовых автомобилей на автострадах Подмоскovie

Целью данной работы являлся анализ факторов рабочего процесса дизеля, влияющих на снижение выбросов NO_x и поиск эффективных методов их нейтрализации.

В результате активного тепловыделения в камере сгорания дизеля интенсивно образуется NO, который составляет до 95% от всех оксидов азота, содержащихся в отработавших газах. Дальнейшее доокисление NO до NO₂ продолжается в системе выпуска. При этом NO₂ более устойчив к процессу нейтрализации. В этой связи впрыскивание аммиака в камеру сгорания ДВС на такте выпуска отработавших газов из ДВС с последующим его термолизом и выделением H₂ будет способствовать активному процессу нейтрализации оксидов азота на стадии процесса расширения газов еще до образования более стабильных NO₂.

1. Опыт снижения содержания оксидов азота в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания

Для решения задачи снижения выбросов NO_x автопроизводителями поэтапно вводился комплекс мероприятий, на каждом шаге которого появлялись более сложные технические решения, приводившие к удорожанию транспортного средства.

На первом этапе было предложено применение наиболее простого способа – использование водно-топливной эмульсии или воды в качестве реагента, воздействующего на рабочий процесс, происходящий в камере сгорания. Впрыскивание эмульсии во впускной трубопровод или в цилиндр существенно снижал температуру горения. При этом максимальная мощность двигателя уменьшалась до 20%, а при эффективном снижении выбросов NO_x составляла 15%. В этой связи фирма Bosch разработала и применила систему впрыскивания воды M4 GNS под давлением 1 МПа на некоторых автомобилях с форсированными двигателями, например, на спортивных автомобилях Saab 99 Turbo [4].

До введения норм вредных выбросов уровня Евро-4 достаточно эффективным средством ограничения концентраций NO_x было снижение величины угла опережения впрыскивания топлива и ограничение тем самым максимальной температуры сгорания.

При дальнейшем ужесточении экологических требований, принятых в Европейских странах технических мероприятий, упомянутых выше, стало недостаточно без применения специальных систем нейтрализации отработавших газов.

На сегодняшний день самое распространенное техническое мероприятие – рециркуляция отработавших газов, которая обеспечивает снижение NO_x до 50% при ухудшении мощностных и экономических показателей двигателя. Кроме этого, рециркуляция отработавших газов (ОГ) повышает содержание в масле продуктов окисления масла в двигателе и износ деталей цилиндропоршневой группы. Продукты серы, содержащиеся в ОГ, «отравляют» катализатор и снижают эффективность процесса нейтрализации NO_x в эксплуатации [2].

Для выполнения норм Евро-5 на автомобилях с дизелями применяют систему селективной нейтрализации SCR- NH_3 (Selective Catalytic Reduction) добавлением к ОГ аммиака NH_3 . Эффективность нейтрализации NO_x в ней составляет в среднем 60% [5, 6].

Выполнение норм Евро-6 достигается совместным сочетанием системы SCR- NH_3 и рециркуляции ОГ. Для повышения эффективности рабочего процесса фирма Volkswagen на дизелях СВАС применяет охлаждение рециркулируемых ОГ.

Наряду с системой SCR- NH_3 в зарубежных дизелях применяют систему SCR-НС с добавкой в ОГ углеводородов (дополнительной впрыскиваемой порции дизельного топлива). Система SCR-НС увеличивает расход топлива в среднем на 30% по сравнению с применением системы SCR- NH_3 .

Следует отметить, что все перечисленные системы нейтрализации достаточно сложны, а их эффективность нейтрализации NO_x намного ниже, чем у хорошо зарекомендовавшего себя трехкомпонентного каталитического нейтрализатора, применяемого в двигателе с искровым зажиганием (ДсИЗ), где эта величина доходит до 95 ... 99%.

В каталитическом нейтрализаторе параллельно окислительным процессам идут восстановительные реакции азота N_2 с участием CO , CH и радикалов водорода H [2, 5].

На рисунках 2, 3 приведены характеристики, показывающие влияние CH и CO на изменения концентраций NO_x в каталитическом трехкомпонентном нейтрализаторе ДсИЗ с рабочим объемом $iV_h = 2,5$ л при частоте вращения коленчатого вала $n = 3500$ мин⁻¹ и максимальной величине среднего эффективного давления $p_e = 0,52$ МПа.

NO_x от CH при n=3500

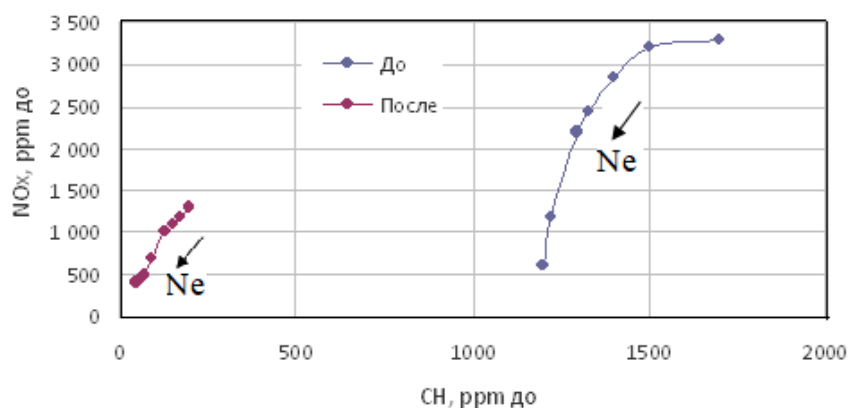


Рис. 2. Концентрация NO_x до и после трехкомпонентного каталитического нейтрализатора в зависимости от содержания CH в ОГ ДсИЗ с $iV_h = 2,5$ л ($n = 3500$ мин⁻¹, $p_e = 0,52$ МПа)

NO_x от CO при n=3500

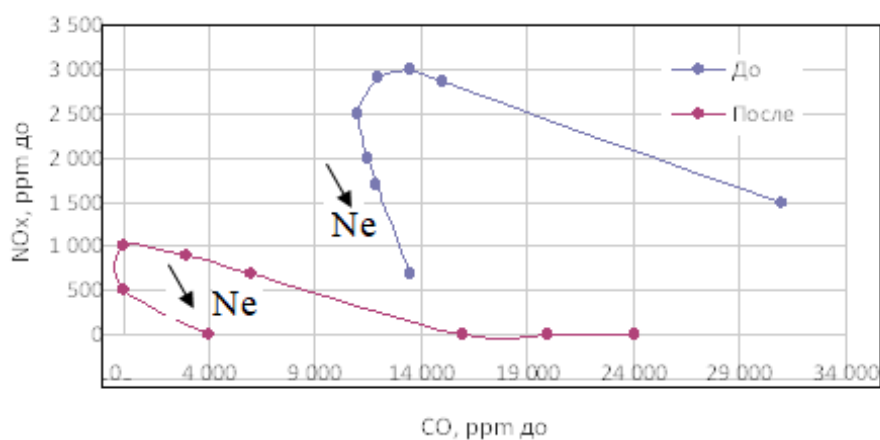


Рис. 3. Концентрация NO_x до и после трехкомпонентного каталитического нейтрализатора в зависимости от содержания CO в ОГ ДсИЗ с $iV_h = 2,5$ л ($n = 3500$ мин⁻¹, $p_e = 0,52$ МПа)

Из приведенных характеристик видно, что эффективность каталитических восстановительных реакций в нейтрализаторе составляет от 88 до 99% [7]. При изменении в процессе реакций нейтрализации концентраций CH с 1700 до 1200 млн^{-1} (в 1,4 раза) и NO_x с 3300 до 600 млн^{-1} (в 5,5 раз).

Однако такой механизм нейтрализации NO_x нельзя использовать для дизеля из-за небольшого количества CO и CH в ОГ.

В дизеле для восстановления азота в селективном нейтрализаторе ОГ применяют водород, выделяемый термолизом из NH_3 , который является продуктом распада водного раствора мочевины $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$.

Активное каталитическое восстановление NO_x в случае использовании углеводородов идет при температуре 350 ... 450 °C [8, 9]. Установлено, что этот процесс начинается при температуре 149 °C [10], по другим данным он начинается с 200 °C [8].

При применении системы нейтрализации SCR-НС углеводородное топливо впрыскивается на вход нейтрализатора для поддержания активной каталитической реакции восстановления азота. Особенность процесса заключается в том, что создается достаточно высокая температура в нейтрализаторе. Такие системы, как было отмечено, обеспечивают повышенный расход топлива до 30%, достаточно сложны, и финансово затратны при производстве, а их применение ограничено в Европейских странах. Очистка ОГ дизеля от NO_x осуществляемая этим способом, как показано на рис. 4, достигает 70%. Такая величина достигается при соотношении CH/NO_x равном 5 [5].

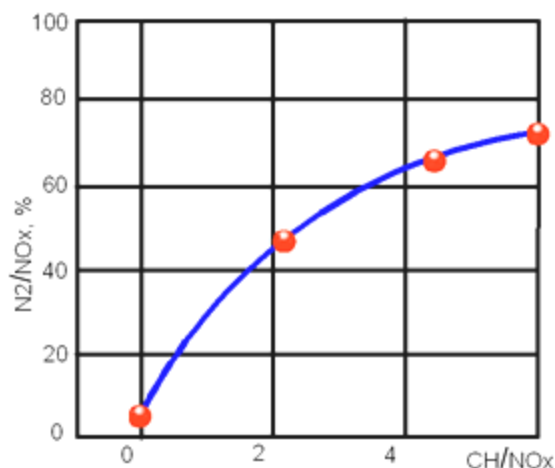


Рис. 4. Степень преобразования оксидов азота в азот в зависимости от соотношения CH/NO_x

Как видно из табл. 1 предельные нормы выбросов NO_x для автомобилей категорий М, N с ДсИЗ в 3 ... 3,4 раза ниже, чем для дизелей. Это связано с невысокой эффективностью процесса нейтрализации NO_x у последних.

Таблица 1

Предельные значения выбросов NO_x по Правилам №83 для категорий автомобилей М, N₁ и N₂ с различным процессом воспламенения топлива в ДВС

NO _x , (мг/км) (уровень выбросов Евро-5)	Категория автомобиля (RM – масса, кг)				
	М все	N ₁ RM ≤ 1305	N ₁ 1305 < RM ≤ 1760	N ₁ 1760 < RM	N ₂
Искровое зажигание (И.з.)	60	60	75	82	82
Воспламенение от сжатия (В.сж)	180	180	235	280	280
Соотношение выбросов (В.сж /И.з)	3 раза	3 раза	3,1 раза	3,4 раза	3,4 раза

В Европейских странах и в мегаполисах РФ для снижения предельно-допустимой концентрации NO_x в воздухе принято решение по ограничению въезда автомобилей с дизельными ДВС на территорию городов.

Из приведенного выше анализа следует, что в настоящее время не разработаны достаточно эффективные системы нейтрализации NO_x для дизелей, хотя существующие системы широко применяются в Европе и РФ, но альтернативы им на транспорте и в силовых установках машин различного применения нет. Учитывая важность экологической проблемы, о которой сказано выше, необходимо искать пути ее решения. Отметим также, что предлагаемые подходы некоторых специалистов о замене при эксплуатации дизелей на альтернативные силовые установки не обоснованы по ряду причин, главной из которых является невозможность обеспечить большую мощность на грузовых автомобилях альтернативными энергоустановками и наличием (отсутствием) в РФ топливно-энергетических ресурсов по этим направлениям.

2. Теоретические исследования организации рабочего процесса в ДВС и процесса нейтрализации ВВ

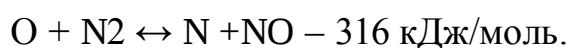
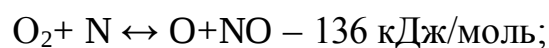
Проблеме снижения токсических составляющих ОГ в ДВС посвящено большое количество теоретических исследований [14, 15, 16].

В работах основоположников теории горения Я.Б. Зельдовича и Н.Н. Семенова теоретически и экспериментально показано, что количество оксидов азота, образующихся в камере сгорания, является функцией температуры и времени, в течение которого смесь горючих газов находится при температуре пламени. Данная зависимость является почти линейной функцией времени [14].

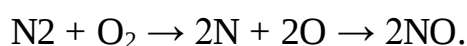
Временной фактор образования оксида азота NO и последующий его переход в диоксид азота NO_2 возможно использовать для повышения эффективности процесса нейтрализации NO_x в ОГ дизелей.

Состав и количество смеси в камере сгорания, как и фактор термического процесса окислительных реакций, являются главными для образования NO_x в камере сгорания. Образование NO_x зависит от процесса охлаждения продуктов горения вследствие движения поршня в процессе расширения. Если в бедных смесях образование NO_x определяется максимальной температурой и процессом «закалки» оксида азота, то в богатых – в большей степени от кинетики их разложения [14, 16].

При горении углеводородных топлив образование NO в теоретической модели Я.Б. Зельдовича описывается двумя основными эндотермическими реакциями:



Реакция образования NO может идти также через гидроксильные радикалы OH , образующиеся в результате распада паров воды. Установлено, что при максимальных температурах сгорания в камере сгорания поршневых ДВС образуется только NO [16]. Окисление азота происходит по цепному механизму с поглощением энергии в камере сгорания. Если для окисления одноатомного азота требуется 136 кДж/моль, то для двухатомного 316 кДж/моль, что объясняется большей энергетической связью между атомами азота в молекуле N_2 . В зоне горения топливовоздушной смеси активируется реакция образования одноатомного азота и кислорода. Скорость реакции определяется концентрацией атомарного кислорода с последующим образованием оксидов азота NO [15, 16]:



Эта реакция является основной при термическом образовании NO . Процесс образования NO в камере сгорания, как видно из рис. 5, начинается

после 700°C, а рост реакций идет с увеличением температуры по прямо пропорциональной зависимости [17].

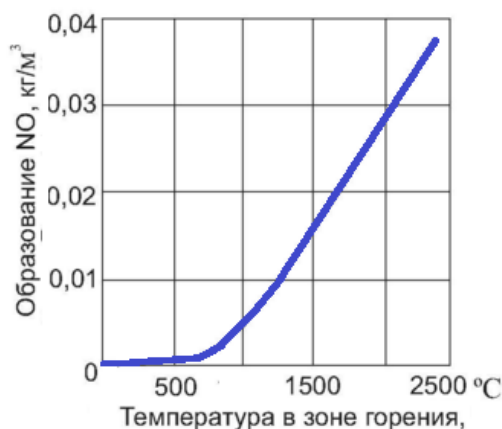
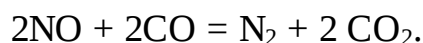
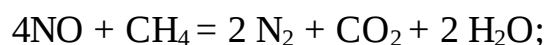


Рис. 5. Влияние температуры в зоне реакции на образование NO

Я.Б. Зельдовичем и Н.Н. Семеновым предложен механизм протекания химических реакций, который характеризуется некоторым периодом индукции, в течение которого образуются радикалы H, OH, O, HO₂, участвующие в промежуточных цепных химических реакциях. При этом скорость реакций зависит от температуры и давления. Радикалы HO₂ относительно инертны при температуре менее 750°C, т.к. они участвуют в промежуточной цепной реакции с преобразованием в активные радикалы OH. В диапазоне высоких температур окисление углеводородов происходит последовательно через два этапа. Сначала начинается окисление CH в CO с выделением восстановителя N азота и затем CO окисляется в CO₂ [15]:



На рисунке 6, а представлена зависимость содержания NO в ОГ от температуры в камере сгорания, а на рис. 6, б от индикаторного расхода топлива.

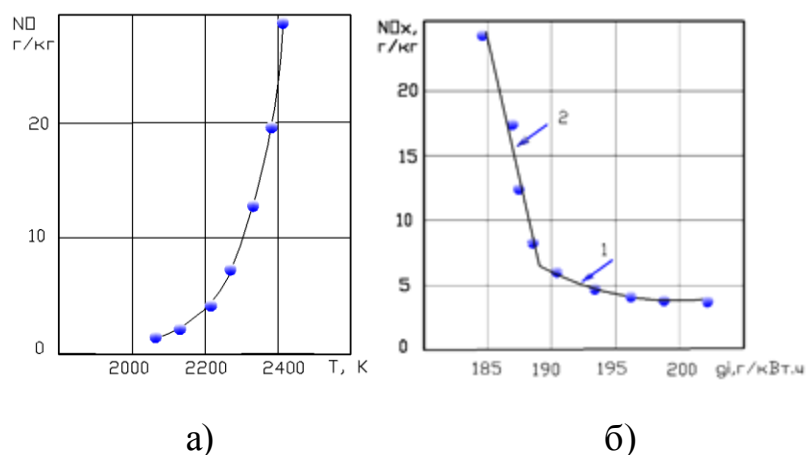


Рис. 6. Зависимость образования оксидов азота от температуры в камере сгорания (а) и эффективности рабочего процесса ДВС (б): g_i – удельный индикаторный расход топлива

Как видно из рис. 6, а, бурный рост NO наблюдается при температуре выше 2200 К. Зависимость, представленная на рис. 6, б, иллюстрирует влияние эффективности процесса сгорания топлива в ДВС на концентрацию NO в ОГ ДВС [7].

Как видно из рис. 6, б, количество NO_x в ОГ определяется двумя различными механизмами образования оксидов азота, который зависит от состава смеси. При эффективном сгорании бедных смесей (линия, указанная стрелкой 2) и, соответственно, повышенном тепловыделении, процесс образования NO_x более интенсивный, чем при сгорании стехиометрической или богатой смеси, сгорающих при недостаточном количестве кислорода (линия, указанная стрелкой 1).

Испытания ДВС показывают, что концентрация NO_x в отработавших газах на выходе из ДВС по мере увеличения нагрузки и, соответственно, поступающего в цилиндры количества топлива возрастает. Но при приближении к полной нагрузке, даже при увеличении температуры в камере сгорания, интенсивность их роста снижается [13]. Это объясняется влиянием состава смеси на образование NO.

На рисунке 7, а приведена нагрузочная характеристика ДВС ($iV_h = 2,45$ л) с расслоением топливно-воздушного заряда при двух

фиксированных положениях дроссельной заслонки [18, 19]. Минимум удельного эффективного расхода топлива g_e достигнут при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,6$. С дальнейшим обеднением смеси g_e увеличивается незначительно. Это также было достигнуто благодаря применению высокой степени сжатия ($\epsilon = 12$), которая позволила работать двигателю практически без дросселирования. При работе двигателя на бедных смесях с $\alpha \geq 2$ (рис. 7, а) количество NO_x было минимальным.

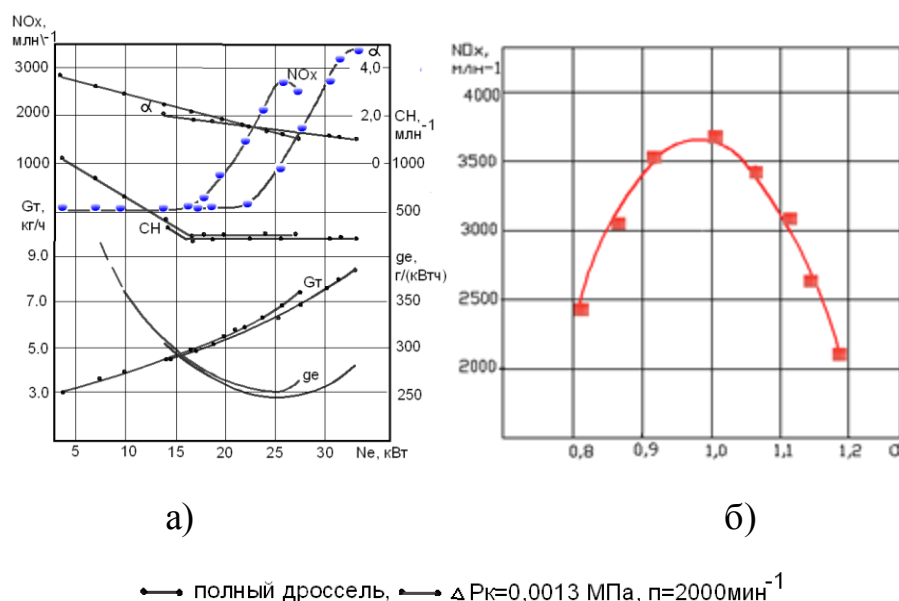


Рис. 7. Характеристики ДСИЗ: а – нагрузочная характеристика при работе с расслоенным зарядом; б – регулировочная характеристика по составу смеси

Регулировочная характеристика ДСИЗ по составу смеси (рис. 7, б) наглядно иллюстрирует интенсивное падение содержания NO_x в ОГ с обеднением смеси [19].

При правильной организации процесса сгорания смеси с применением расслоенного заряда в камере сгорания обеспечивается ряд преимуществ как по повышению экономичности, так и по снижению токсичности ОГ.

Ведущие японские автопроизводители, такие как Toyota, Mazda, Mitsubishi, а также европейские компании Renault и Citroen выпускают ДВС, работающие

на расслоенном заряде. Так компания Mazda разработала бензиновые ДВС Z-Ican, Skyactiv-G, работающие по технологии окисления бедных топливных смесей с $\alpha = 1,35 \dots 1,7$, обеспечивают непосредственное впрыскивание топлива в камеру сгорания с управлением вихреобразованием в цилиндре (trumble swirl multiplex port). Эта технология обеспечивает снижение расхода топлива до 40% при обеспечении низкого уровня токсичности ОГ [20].

Для снижения концентраций NO_x в ОГ дизеля возможен переход на работу с бедными смесями и добавкой водорода H_2 на частичных нагрузках и подачу его на средних и полных нагрузках в момент выпуска ОГ из цилиндра. Как показали исследования, непосредственное впрыскивание H_2 в камеру сгорания ДВС обеспечило качественное регулирование топливно-воздушной смеси на частичных нагрузках. При этом снижение выбросов NO_x достигло 80% при практически полном отсутствии выбросов CO и CH [21]. Реализацию такого рабочего процесса можно обеспечить применением бортового газового генератора, работающего на водородосодержащем топливе, например, на аммиаке.

При исследовании рабочего процесса двухтопливного дизеля, работающего с добавкой H_2 , которая составляла 30 ... 50% по отношению к основному топливу, показано улучшение экологических и экономических показателей ДВС на низких и средних нагрузках. При высоких нагрузках ДВС эффективная работа обеспечивается при соотношениях водорода от 6 до 25% [22, 23].

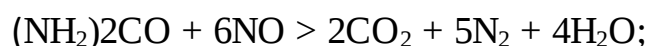
Ранее авторами был рассмотрен процесс впрыскивания в цилиндр ДВС NH_3 , который в процессе термолиза обеспечивал получение H_2 [6]. Учитывая то, что NH_3 при горении может образовывать NO_x , его надо подавать в цилиндр дизеля при определенных температурных условиях. Так его впрыскивание при относительно невысоких температурах $\sim 700 \dots 900^\circ\text{C}$ (рис. 8) будет способствовать эффективному протеканию реакциям восстановления азота из NO_x .



Рис. 8. Показатели рабочего процесса, рассчитанные для дизеля ($S/D = 124/107$, $\varepsilon = 17,3$):
цикловая подача топлива 100 мг , $n=1625 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 1,66 \text{ МПа}$

Указанный диапазон температур характерен началу открытия выпускного клапана в ДВС [5, 6]. Надо также учитывать, что низкие концентрации оксидов азота снижают требования к эффективности процесса их нейтрализации в ДВС.

При нейтрализации NO реакции восстановления азота мочевиной и аммиаком идут по уравнениям [5, 21]:



NH_3 образуется при тепловом воздействии на мочевины. На конечной стадии температурного процесса происходит разложение аммиака с образованием водорода, который является восстановителя азота [5, 21]:



Когда рассматривают процесс образования токсичных веществ в результате сгорания топлива, то имеется в виду получение NO, которых в ОГ

ДВС находится 95% от всех оксидов азота, остальное 5% приходится на диоксид NO_2 [5].

На рисунке 9 приведена степень окисления NO до NO_2 в зависимости от температуры ОГ. В ходе снижения температуры ОГ в процессе их расширения в цилиндре ДВС происходит реакция доокисления NO до NO_2 [5]. Данный процесс рассматривают как «закалку» оксидов азота – охлажденный в процессе расширения NO переходит в более устойчивое состояние.

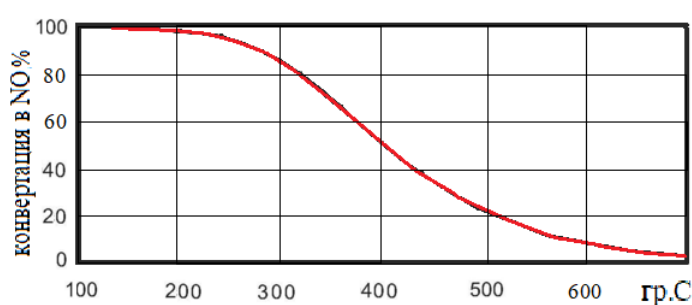


Рис. 9. Влияние температуры в зоне реакции на содержания NO

Рисунок 10 иллюстрирует процесс снижения содержания NO при расширении газов в цилиндре ДсИЗ за счет доокисления его в NO_2 в процессе расширения газов. Данный процесс идет при наличии O_2 в продуктах сгорания [24].

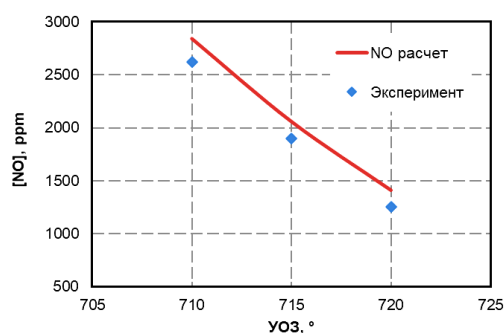


Рис. 10. Содержание NO в продуктах сгорания ДсИЗ в процессе расширения газов на такте выпуска [24]

Как показывают экспериментальные исследования доокисление NO до NO₂ продолжается уже в системе выпуска [5].

Установлено, что NO₂ более устойчив к процессу нейтрализации. Поэтому после завершения сгорания смеси на такте выпуска процесс нейтрализации оксидов азота может осуществляться значительно легче, чем в низкотемпературной зоне системы выпуска ОГ. Впрыскивание аммиака в камеру сгорания ДВС на такте выпуска ОГ из ДВС с последующим его термолизом и выделением H₂ будет способствовать активному процессу нейтрализации оксидов азота на стадии процесса расширения газов еще до образования более стабильных NO₂.

Выводы

1. В настоящее время не разработаны достаточно эффективные системы нейтрализации NO_x для дизелей. Системы нейтрализации, применяемые на дизельных автомобилях, позволяют получить эффективность нейтрализации NO_x в среднем 60 ... 70%. Используемые конструкции не позволяют увеличить их эффективность выше уже достигнутой.
2. Проведенный анализ факторов образования оксидов азота показал новые направления воздействия на рабочий процесс дизельного ДВС, позволяющий реализовать эффективный процесс нейтрализации NO_x применением водорода, выделяемого при впрыскивании аммиака в камеру сгорания.
3. С применением современных систем впрыскивания топлива с электронным управлением возможна реализация процесса нейтрализации оксидов азота при впрыскивании аммиака в камеру сгорания на такте выпуска при благоприятных температурах для процесса его разложения.

Список источников

1. К снижению экологического воздействия автотранспорта на воздушное пространство автострад / А. В. Шабанов, Д. В. Кондратьев, В. К. Ванин, А. Ю. Дунин // Автомобильная промышленность. – 2021. – № 4. – С. 11-15.
2. Шабанов, А. В. Снижение азотосодержащих вредных выбросов с отработавшими газами дизельных ДВС грузовых автомобилей / А. В. Шабанов, Д. В. Кондратьев, А. Ю. Дунин // 9-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса : сборник докладов Международной научно-технической конференции, Москва, 29 января 2021 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2021. – С. 457-467.
3. Отчет Совета по охране природных ресурсов (NDRC) и Союза по охране чистого воздуха (ССА). – Режим доступа: www.mosecom.ru/re1.htm, «Мосэкомониторинг». twitter.com/ecomonitoring (дата обращения: 03.04.2023).
4. Сонкин, В. И. Проблемы бензинового двигателя с высоким наддувом: аномальное сгорание / В. И. Сонкин // Труды НАМИ. – 2017. – № 3(270). – С. 16-31.
5. Кульчицкий, А. Р. Исследование процессов образования и разработка методов снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей внедорожных машин: диссертация ... доктора технических наук : 05.04.02. - Владимир, 2006. - 345 с.
6. К вопросу повышения эффективности систем нейтрализации оксидов азота в дизельных ДВС / А. В. Шабанов, Д. В. Кондратьев, В. К. Ванин, А. Ю. Дунин // Известия МГТУ МАМИ. – 2021. – Т. 15, № 2. – С. 101-112.
7. Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах бензинового двигателя корректировкой состава топливовоздушной смеси и последующей нейтрализацией продуктов сгорания в каталитическом нейтрализаторе / В. А. Соломин, А. В. Шабанов, А. А. Шабанов, А. А. Селезнев // Автомобильная промышленность. – 2019. – № 2. – С. 7-13.
8. Панчишный, В. И. Нейтрализация оксидов азота в отработавших газах дизелей / В. И. Панчишный // Двигателестроение. – 2005. – № 2(220). – С. 35-42.
9. Панчишный, В. И. К вопросу о моделировании систем нейтрализации автомобильных дизелей / В. И. Панчишный, И. Ю. Воробьев // Труды НАМИ. – 2018. – № 4(275). – С. 23-37.
10. Разработка высокоэффективной технологии повышения экономических и экологических характеристик ДВС и устройства для ее реализации / В. А. Бурцев, О. Ф. Бризицкий, В. А. Кириллов, В. Я. Терентьев // Журнал автомобильных инженеров. – 2012. – № 3(74). – С. 46-49.
11. К вопросу снижения выбросов оксидов азота дизельными двигателями внутреннего сгорания / А. В. Шабанов, Д. В. Кондратьев, В. А. Соломин, В. К. Ванин // Труды НАМИ. – 2020. – № 1(280). – С. 78-86.
12. Кутенев, В. Ф. Экологическая безопасность автомобилей с двигателем внутреннего сгорания : Проблемы нормирования и контроля, методы снижения вредных выбросов / В. Ф. Кутенев, Б. В. Кисуленко, Ю. В. Шюте. – Москва, 2009. – 252 с.

13. Кривопапов, В. В. Образование оксидов азота в камерах сгорания современных ДВС и способы снижения их содержания в отработавших газах / В. В. Кривопапов, И. В. Максакова, В. В. Фомин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2012. – № 12(271). – С. 86-92.
14. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. – Москва : Наука, 1980. – 478 с.
15. Окисление азота при горении / Я. Б. Зельдович, П. Я. Садовников и Д. А. Франк-Каменецкий ; Акад. наук СССР. Ин-т хим. физики. – Москва ; Ленинград : Изд-во и 2-я тип. Изд-ва Акад. наук СССР, 1947 (Москва). – 148 с.
16. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности: (Свободные радикалы и цепные реакции) / Акад. наук СССР. Отд-ние хим. наук. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Изд-во Акад. наук СССР, 1958. – 686 с.
17. Смирнов, Б. Ю. Об очистке газовых выбросов от оксидов азота / Б. Ю. Смирнов // Альманах современной науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 124-126.
18. Егорушкин, Е. А. Инновационные разработки в сфере интенсификации воспламенения топливовоздушных смесей / Е. А. Егорушкин, А. В. Шабанов, А. А. Шабанов // Известия МГТУ МАМИ. – 2016. – № 2(28). – С. 8-12.
19. Егорушкин, Е. А. Воспламенения бедных топливовоздушных смесей в бензиновых ДВС - проблемы, пути решения / Е. А. Егорушкин, А. В. Шабанов, А. А. Шабанов // Известия МГТУ МАМИ. – 2017. – № 2(32). – С. 72-77.
20. Каменев, В. Ф. Перспективы и проблемы непосредственного впрыска бензина / В. Ф. Каменев, М. А. Миронычев, В. И. Сонкин // Труды МАМИ. – 2003. – № 231. – С. 63–85.
21. Системы и агрегаты современных энергоустановок для автомобилей и автобусов / В. Ф. Кутенев, Л. Ю. Лежнев, В. А. Лукшу [и др.]. – Москва : «Экология. Машиностроение», 2012. – 246 с.
22. Chintala, V. A comprehensive review on utilization of hydrogen in a compression ignition engine under dual fuel mode / V. Chintala, K. A. Subramanian // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 70. – P. 472–491.
23. Улучшение энергетических и экологических показателей дизельного ДВС путем применения водородосодержащей добавки / А. Ю. Дунин, А. В. Шабанов, Т. К. Нгуен [и др.] // Известия МГТУ МАМИ. – 2022. – Т. 16, № 2. – С. 125-133.
24. Сергеев, С. С. Двумерная модель для расчета рабочего процесса двигателя с искровым зажиганием / С. С. Сергеев // Математическое моделирование. – 2021. – Т. 33, № 12. – С. 21-32.

References

1. Shabanov A.V., Kondratiev D.V., Vanin V.K., Dunin A.Yu. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2021, no. 4, pp. 11-15.
2. Shabanov A.V., Kondratiev D.V., Dunin A.Yu. 9-e Lukaninskiye chteniya. Problemy i perspektivy razvitiya avtotransportnogo kompleksa : sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Moscow, MADI, 2021, pp. 457-467.

3. URL: www.mosecom.ru/re1.htm
4. Sonkin V.I. *Trudy NAMI*, 2017, no. 3(270), pp. 16-31.
5. Kulchitsky A.R. *Issledovaniye protsessov obrazovaniya i razrabotka metodov snizheniya vybrosov vrednykh veshchestv s otrabotavshimi gazami dizeley vnedorozhnykh mashin* (Research of formation processes and development of methods for reducing emissions of harmful substances from exhaust gases of diesel engines of off-road vehicles), Doctor sthesis, Vladimir, 2006, 345 p.
6. Shabanov A.V., Kondratiev D.V., Vanin V.K., Dunin A.Yu. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2021, Vol. 15, no. 2, pp. 101-112.
7. Solomin V.A., Shabanov A.V., Shabanov A.A., Seleznev A.A. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2019, no. 2, pp. 7-13.
8. Panchishny V.I. *Dvigatelaye stroyeniye*, 2005, no. 2(220), pp. 35-42.
9. Panchishny V.I., Vorobyov I.Yu. *Trudy NAMI*, 2018, no. 4(275), pp. 23-37.
10. Burtsev V.A., Brizitsky O.F., Kirillov V.A., Terentyev V.Ya. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov*, 2012, no. 3(74), pp. 46-49.
11. Shabanov A.V., Kondratiev D.V., Solomin V.A., Vanin V.K. *Trudy NAMI*, 2020, no. 1(280), pp. 78-86.
12. Kutenev V.F., Kisulenko B.V., Shute Yu.V. *Ekologicheskaya bezopasnost avtomobiley s dvigatелеm vnutrennego sgoraniya: Problemy normirovaniya i kontrolya. metody snizheniya vrednykh vybrosov* (Environmental safety of cars with an internal combustion engine: Problems of rationing and control, methods of reducing harmful emissions), Moscow, 252 p.
13. Krivopalov V.V., Maksakova I.V., Fomin V.V. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye*, 2012, no. 12(271), pp. 86-92.
14. Zeldovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryva* (Mathematical theory of gorenje and explosion), Moscow, Nauka, 1980, 478 p.
15. Zeldovich Ya.B., Sadovnikov P.Ya., Frank-Kamenetsky D.A. *Okisleniye azota pri goreнии* (Oxidation of nitrogen during gorenje), Moscow, Izd-vo Akad. nauk SSSR, 1947, 148 p.
16. *O nekotorykh problemakh khimicheskoy kinetiki i reaktsionnoy sposobnosti: (Svobodnyye radikaly i tsepnnyye reaktsii)* (About some problems of chemical kinetics and reactivity: (Free radicals and chain reactions)), Moscow, Izd-vo Akad. nauk SSSR, 1958. 686 p.
17. Smirnov B.Yu. *Almanakh sovremennoy nauki i obrazovaniya*, 2012, no. 5, pp. 124-126.
18. Egorushkin E.A., Shabanov A.V., Shabanov A.A. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2016, no. 2(28), pp. 8-12.
19. Egorushkin E.A., Shabanov A.V., Shabanov A.A. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2017, no. 2(32), pp. 72-77.
20. Kamenev V.F., Mironychev M.A., Sonkin V.I. *Trudy NAMI*, 2003, no. 231, pp. 63-85.
21. Kutenev V.F., Lezhnev L.Yu., Luksho V.A., Alisevich O.V., Terenchenko A.S., Khripach N.A. *Sistemy i agregaty sovremennykh energoustanovok dlya avtomobiley i avtobusov*

(Systems and units of modern power plants for cars and buses), Moscow, Ekologiya. Mashinostroyeniye, 2012, 246 p.

22. Chintala V., Subramanian K.A. A comprehensive review on utilization of hydrogen in a compression ignition engine under dual fuel mode, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, vol. 70, pp. 472–491.

23. Dunin A.Yu., Shabanov A.V., Nguyen T.K., Shatrov M.G., Golubkov L.N. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2022, vol. 16, no. 2., pp. 125-133.

24. Sergeyev S.S. *Matematicheskoye modelirovaniye*, 2021, vol. 33, no. 12, pp. 21-32.

Рецензент: Л.Н. Голубков, д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Шабанов Александр Викторович, канд. техн. наук, НАМИ.

Ванин Владимир Константинович, главный специалист, НАМИ.

Дунин Андрей Юрьевич д-р техн. наук, доц., МАДИ.

Шатров Михаил Георгиевич, д-р техн. наук, проф., МАДИ.

Information about the authors

Shabanov Alexander V., Ph. D., NAMI.

Vanin Vladimir K., Chief specialist, NAMI.

Dunin Andrey Yu., Dr. Sc., associate professor, MADI.

Shatrov Mikhail G., Dr. Sc., professor, MADI.

Статья опубликована по итогам международной научно-технической конференции «10-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса».

Статья поступила в редакцию 06.06.2023; одобрена после рецензирования 07.06.2023; принята к публикации 08.06.2023.

The article was submitted 06.06.2023; approved after reviewing 07.06.2023; accepted for publication 08.06.2023.