

УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С КАТАЛИТИЧЕСКИМ НЕЙТРАЛИЗАТОРОМ

И.В. Кузнецов, В.И. Бажанов

В статье приводятся результаты исследований автомобиля с форкамерным двигателем и каталитическим нейтрализатором отработавших газов на стенде с беговыми барабанами по фазам выполнения ездового цикла ЕС, из которых следует, что в суммарные выбросы вредных веществ с отработавшими газами за ездовой цикл первая «холодная» фаза вносит по оксиду углерода более 70 %, а по углеводородам – более 45 %.

Для снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами при пуске «холодного» двигателя предлагается подводить к каталитическому нейтрализатору водород, что позволяет снизить в отработавших газах содержание оксида углерода и оксидов азота более чем на 98 %, а углеводородов более чем на 80 %.

Ключевые слова: автомобиль, двигатель внутреннего сгорания, стенд с беговыми барабанами, ездовой цикл, отработавшие газы, каталитический нейтрализатор, водород, оксид углерода, углеводороды, оксиды азота.

Введение

Проблема снижения токсичности выбросов вредных веществ с отработавшими газами (ОГ) автомобилей требует неординарного подхода для ее решения. Особенно остро эта проблема встала при включении в испытательный ездовой цикл Правил № 15 ЕЭК ООН режима пуска двигателя автомобиля при температуре -7°C и скоростной добавки к топливу при введении норм по выбросам вредных веществ ЕВРО-4, ЕВРО-5 и далее, согласно требованиям Европейского Союза (ЕС) и России. Это нововведение существенно усложнило решение проблемы выбросов ОГ, так как их содержание в настоящее время измеряется в течение первых 40 с после холодного пуска (-7°C) двигателя, чего ранее не было, а именно в данных условиях происходит основной выброс вредных веществ.

Применение каталитического нейтрализатора (КН) в системе выпуска отработавших газов автомобильного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) стало обычным средством снижения выбросов нормируемых вредных веществ: монооксида углерода (CO), углеводородов (C_xH_y) и оксидов азота (NO_x). Однако КН может работать эффективно по очистке отработавших газов только после достижения определенной температуры, в противном случае снижение

содержания выбросов вредных веществ в отработавших газах не происходит. При пуске холодного двигателя с КН требуется довольно значительное время, чтобы двигатель прогрелся, и температура его отработавших газов достигла рабочей температуры нейтрализатора. В нейтрализаторе катализатор наносят на блок, изготавливаемый обычно из керамики, для прогрева которого тоже требуется определенное время, что усложняет проблему соблюдения новых норм на выбросы вредных веществ с отработавшими газами автомобилей.

В связи с этим целью данной работы являлось определение условий для быстрого нагрева КН до рабочей температуры для снижения содержания вредных веществ при пуске холодного автомобильного ДВС.

Исследования ДВС с каталитическим нейтрализатором отработавших газов

Результаты исследований автомобиля «Волга» с форкамерным ДВС и КН [1], проведенных на Уральском электрохимическом комбинате на стенде с беговыми барабанами, по определению выбросов вредных веществ с отработавшими газами по фазам выполнения ездового цикла ЕС показали, что основную долю

в суммарные выбросы вредных веществ вносят выбросы CO (более 70 %) и C_xH_y (более 45 %) при выполнении автомобилем первой, холодной фазы ездового цикла, которая по сравнению с другими фазами мало сказывается на выбросе NO_x с отработавшими газами (см. таблицу).

В ходе тех испытаний было также выявлено, что условия пятой скоростной фазы ездового цикла ЕС мало влияют на содержание CO и C_xH_y в отработавших газах, а доля NO_x в суммарных выбросах за ездовой цикл ЕС составляет более 50 %.

В связи с этим обстоятельством были разработаны различные методы улучшения стартовых качеств КН, например электрический нагрев (*EHС – Electrically Head Converter*), обеспечивающий снижение содержания выбросов CO и C_xH_y в 3–3,5 раза при затрате мощности на функционирование двигателя не менее 2 кВт. Нашла практическое использование и система ускоренного окисления ОГ (*REPO – Rapid Exhaust Port Oxidation*), основанная на подаче и сжигании обогащенной смеси в выпускном коллекторе перед КН, что увеличивает температуру в КН по сравнению с температурой отработавших газов на выходе из цилиндров двигателя. Повышение температуры активного элемента КН возможно и путем подвода к потоку отработавших газов ДВС других реагентов (метанол, этанол и др.), способствующих химическому разогреву без открытого пламени, путем экзотермической реакции [2].

При проведении исследований по улучшению экологических показателей двигателя внутреннего сгорания с КН было решено использовать присадку водорода (H_2) в ОГ перед нейтрализатором.

Объектом для проведения исследований на моторном стенде являлся форкамерный ДВС, изготовленный на базе двигателя ЗМЗ-4022.10

и эффективно работающий на смесях с общим коэффициентом избытка воздуха $\alpha_\Sigma > 1,4$. Особенностью форкамерного ДВС ЗМЗ-4022.10 является то, что каждый цилиндр соединен через сопловые каналы с форкамерой, причем в цилиндры поступает обедненная смесь с коэффициентом избытка воздуха α_1 , а в форкамеры – обогащенная смесь с коэффициентом избытка воздуха α_2 . При работе двигателя от свечей зажигания поджигается смесь, образованная в форкамере, от факела продуктов ее сгорания воспламеняется и сгорает обедненная смесь в цилиндре.

В систему выпуска ДВС был установлен КН с блочным керамическим носителем объемом 2 л, на который был нанесен катализатор, состоящий из платины (50 %), рутения (25 %) и родия (25 %). Для снижения температуры КН был вынесен из моторного бокса на расстояние около 10 м от среза выпускного коллектора двигателя, а H_2 подавался в выпускную трубу на расстоянии 1 м от КН. Для предотвращения выхода из строя катализатора температура в КН была ограничена $T_n < 700^\circ C$. Подвод отработавших газов к газоанализаторам осуществлялся по горячей линии с температурой 180–200 °С, а для измерения содержания CO в отработавших газах двигателя использовался газоанализатор *Bekman 865*, C_xH_y – *Bekman 402* и NO_x – *Bekman 951*.

Исследования заключались в получении регулировочных характеристик по составу смеси с α_Σ – содержания C_{CO} , $C_{C_xH_y}$ и C_{NO_x} в отработавших газах ДВС, а также в определении температуры отработавших газов T_n в ОГ в поле нейтрализатора. Состав смеси с α_Σ , поступающей в ДВС, изменяли путем варьирования состава смеси с α_1 , поступающей в цилиндры, при этом состав смеси с α_2 , поступающей в форкамеры, оставался постоянным.

Результаты исследований форкамерного ДВС с КН автомобиля «Волга» по ездовому циклу ЕС

Фазы цикла		Выбросы вредных веществ, г/испытание		
		CO	C_xH_y	NO_x
Цикл Правил № 15 ЕЭК ООН	I холодная фаза цикла	3,15	0,14	1,14
	II, III и IV фазы цикла	0,20	0,11	3,00
V фаза (скоростная)		1,05	0,05	4,50
Суммарные выбросы за ездовой цикл ЕС		4,40	0,30	8,64
		0,39*	0,03*	0,77*

* Суммарные выбросы за ездовой цикл ЕС выражены в г/км

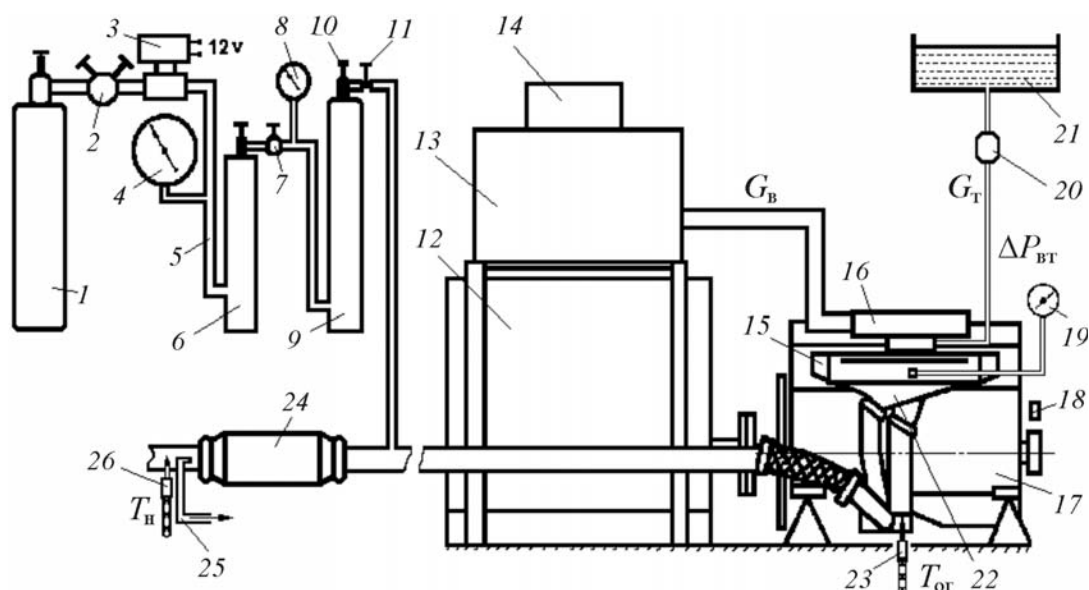


Рис. 1. Схема моторного стенда:

1 – баллон с H_2 ; 2, 7 – редукторы; 3 – электромагнитный клапан; 4, 8 – манометры; 5 – магистраль подвода H_2 ; 6 – измерительная емкость; 9, 13 – ресиверы; 10 – запорный вентиль; 11 – орган дозирования H_2 ; 12 – тормозная установка; 14 – расходомер воздуха; 15 – впускная труба; 16 – воздушный фильтр; 17 – ДВС; 18 – стробоскоп; 19 – вакуумметр; 20 – расходомер топлива; 21 – топливный бак; 22 – выпускная труба; 23 – термopара ОГ ДВС; 24 – нейтрализатор; 25 – линия отбора проб отработавших газов на газоанализаторы; 26 – термopара

Оборудование моторного стенда (рис. 1) работало следующим образом.

Редуктором 2 устанавливалось давление H_2 в пределах 0,8–0,9 МПа, а редуктор 7 был предназначен для поддержания избыточного давления в ресивере 9, тем самым обеспечивая постоянный расход H_2 в нейтрализаторе 24. Расход водорода G_{H_2} (кг/ч), поступающего в КН, рассчитывался по формуле

$$G_{H_2} = \frac{60 \cdot \Delta p_{H_2} \cdot V_n \cdot \rho_{H_2}}{1000 \cdot t_n},$$

где $\rho_{H_2} = 0,089$ г/л – плотность H_2 ; $V_n = 3$ л – объем измерительной емкости; Δp_{H_2} – падение давления в измерительной емкости за время измерения t_n .

При измерении расхода H_2 , поступающего в КН 24, закрывали запорный вентиль 10, открывали электромагнитный клапан 3 и редуктором 2 устанавливали давление в измерительной емкости 6. Закрывали клапан 3, открывали запорный вентиль 10 и определяли время t_n , за которое давление в емкости 6 упадет на заданную величину Δp_{H_2} . Изменение расхода H_2 , поступающего в КН 24, осуществлялось органом дозирования 11.

На рис. 2 показаны регулировочные характеристики по составу смеси с α_Σ , поступающей

в ДВС при частоте вращения коленчатого вала $n = 2000$ мин⁻¹, коэффициенте наполнения $\eta_v = 0,35$ и угле опережения зажигания $\theta = 14^\circ$ п.к.в.

При работе ДВС без подвода H_2 температура отработавших газов T_n после КН была около 170 °С и снижения массы вредных веществ в КН практически не происходило. Подвод H_2 увеличивает T_n , поскольку на катализаторе происходит реакция соединения H_2 с кислородом (O_2), который содержится в отработавших газах. Превышение T_n (300 °С) и недостаток O_2 в отработавших газах способствуют восстановлению азота из NO_x путем реакции с СО на катализаторе. При этом зона восстановительных реакций на катализаторе расширяется от смесей с $\alpha_\Sigma = 1,0$ в сторону более обогащенных смесей.

Работа ДВС на стехиометрических смесях с $\alpha_\Sigma = 1,0$ и подвод H_2 к КН с расходом 0,39 кг/ч снижает в отработавших газах содержание NO_x до 10 млн⁻¹. При обеднении смеси с $\alpha_\Sigma > 1,0$ доля O_2 в отработавших газах увеличивается и T_n возрастает, поскольку в КН происходит окисление СО и C_xH_y , но при этом возрастает содержание NO_x в отработавших газах. Увеличение расхода H_2 уменьшает содержание O_2 в отработавших газах, и зона восстановительных реакций на катализаторе расширяется от стехиометрических

к более обедненным смесям с α_{Σ} . Это указывает на то, что водород активизирует работу каталитического нейтрализатора по очистке отработавших газов от вредных веществ при работе ДВС как на смесях более обогащенных от $\alpha_{\Sigma} = 1,0$, так и на смесях более обедненных, чем стехиометрические.

Таким образом, при работе форкамерного ДВС на смесях, по составу близких к стехиометрическому, и подводе к отработавшим газам H_2 в количестве 10 % от расхода топлива G_T через ДВС КН быстро нагревается до рабочих температур и снижает в отработавших газах C_{CO} и C_{NO_x} более чем на 98 %, а содержание $C_{C_xH_y}$ уменьшается более чем на 80 %.

Работа ДВС на стехиометрических смесях ($\alpha_{\Sigma} = 1,0$) может осуществляться и на других

режимах, в частности при выполнении автомобилем с КН скоростной фазы ездового цикла ЕС. Подвод водорода к КН на этом режиме ездового цикла позволит практически очистить отработавшие газы ДВС от всех нормируемых вредных веществ, и автомобиль будет отвечать нормам по выбросам вредных веществ с отработавшими газами ЕВРО-4, ЕВРО-5 и более жестким нормам.

Для активации очистки отработавших газов достаточно подвести к КН H_2 в количестве 10 % от расхода топлива через ДВС, которое может быть получено на борту автомобиля при помощи электролизеров, каталитических конвертеров, металлгидридных аккумуляторов и других успешно апробированных в автомобильной технике средств [3].

Заключение

Проведенные исследования показали высокую эффективность подвода водорода к отработавшим газам ДВС перед каталитическим нейтрализатором для его быстрого нагрева до рабочей температуры и снижение содержания при этом в отработавших газах CO и NO_x более чем на 98 %, а $C_{C_xH_y}$ – более чем на 80 %. Это позволит автомобилям соответствовать строгим европейским нормам по содержанию вредных веществ в выбросах отработавших газов.

Список литературы

1. Кузнецов И.В. Экологические характеристики автомобиля «Волга» // Экология и промышленность России. 2005. Май. – С. 25–27.
2. Кульчицкий А.Р., Гоц А.Н., Фролов С.М. Улучшение стартовых качеств нейтрализаторов отработавших газов автотранспортных средств // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей: матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. – Владимир: Владим. гос. ун-т, 2003. С. 34–39.
3. Фомин В.М. Водородная энергетика автомобильного транспорта. – М.: Изд-во РУДН, 2006. – 334 с.

Материал поступил в редакцию 23.03.2011

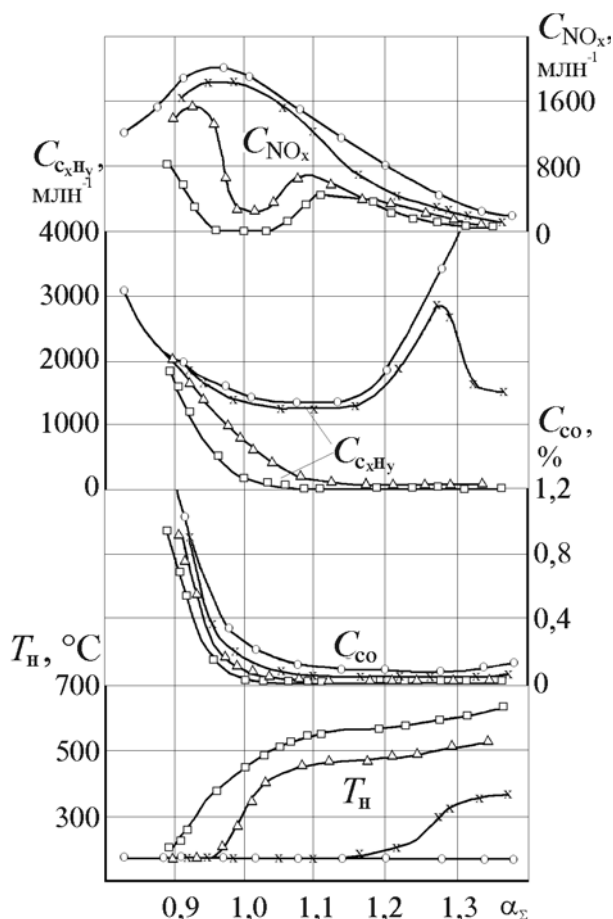


Рис. 2. Регулировочные характеристики по α_{Σ} :
 о – без подвода H_2 ; х – расход H_2 0,13 кг/ч;
 Δ – расход 0,26 кг/ч; □ – расход H_2 0,39 кг/ч

**КУЗНЕЦОВ
Игорь Валентинович**

E-mail: kiv39@mail.msiu.ru
Тел.: +7 (495) 675-62-42

Доктор технических наук, профессор кафедры автомобилей и двигателей МГИУ. Сфера научных интересов – теплотехника, двигатели внутреннего сгорания. Автор 65 научных работ, в том числе монографии и 33 изобретений.

**БАЖАНОВ
Виталий Идельевич**

E-mail: bazhanov@mail.msiu.ru
Тел.: +7 (495) 620-39-55

Доктор химических наук, профессор. Заведующий кафедрой электротехники, теплотехники, гидравлики и энергетических машин МГИУ. Сфера научных интересов – теплотехника, двигатели внутреннего сгорания. Автор 70 научных работ в ведущих отечественных и зарубежных журналах.