

## КОРРЕКТНОСТЬ СРАВНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

**Н. Н. Грабовская, К. С. Боков**

*Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул*

В литературе, посвященной эффективности очистки отработавших газов (ОГ), приводятся данные о степени снижения выбросов отдельных компонентов после каталитической очистки. В основном, это степени очистки от оксидов азота  $\delta_{\text{NO}_x}$ , углеводородов  $\delta_{\text{C}_x\text{H}_y}$ , оксида углерода  $\delta_{\text{CO}}$  и твердых частиц  $\delta_{\text{ТЧ}}$ , выраженные в процентах.

Вопросам каталитической (КН) и термокаталитической нейтрализации (ТКН) отработавших газов посвящены работы И. Л. Варшавского, Л. А. Золотаревского, Р. В. Малова, В. Т. Григорьяна, О. И. Жегалина, И. Л. Кагановича, А. М. Сайкина, В. А. Звонова, Р. М. Поповиченко, С. С. Филатова, А. А. Мельберт, А. Л. Новоселова и др.

В каталитических (КН) и термокаталитических (ТКН) нейтрализаторах используют высокоактивные катализаторы, содержащие платину, палладий, никель, хром, медь, окислы металлов и редкоземельные элементы. В качестве катализаторов применяют и природные материалы, например, дуниты, цеолиты и другие. В зависимости от состава катализаторов наблюдается и различная их реакционная способность.

Каталитические нейтрализаторы с платиновыми катализаторами, например, П-7 обеспечивают снижение выбросов окислов азота на 56 %, с алюмоплатиновыми – на 30 %, а с меднохромокислыми – на 80 %, с катализатором ШПАК – в 3 раза. Есть данные о том, что ряд катализаторов практически не влияет на уровни выбросов оксидов азота. В то же время отмечается увеличение скоростей восстановления оксидов азота в присутствии аммиака, что повышает эффективность КН до 80 %.

В присутствии платиновых и палладиевых катализаторов обеспечивается снижение содержания СО в ОГ на 50...80 % в зависимости от теплового состояния реакционной камеры. Снижение содержания  $\text{C}_x\text{H}_y$  при этом происходит на 20...100 %, а при использовании меднохромокислых катализаторов – на 80 %. В настоящее время появ-

вился ряд гранулированных катализаторов без драгоценных металлов.

При использовании всех названных выше катализаторов содержание сажи в ОГ снижается примерно в 1,1...2 раза, в зависимости от конструкции реактора и типа катализатора. Отмечается снижение уровня запаха ОГ при использовании всех типов катализаторов, снижение выбросов альдегидов с ОГ в 3...10 раз.

Правильно сконструированные КН создают противодавления не выше создаваемых глушителями. Так, по ТУ ПО «Ярославский моторный завод» противодавление для автотракторных дизелей должно быть не выше  $15 \cdot 10^{-2}$  МПа, а нейтрализаторы создают противодавления, судя по рекламным сообщениям фирм, не превышающие  $(3...4) \cdot 10^{-2}$  МПа.

Относительные значения эффективности и стоимости методов каталитической нейтрализации ОГ дизелей по сравнению с другими инженерными методами снижения вредных выбросов показаны на схеме рисунка 1 в ценах 2007 г.

Из схемы видно, что несмотря на удорожание каталитической нейтрализации, по сравнению с регулировками дизелей, практически в 4 раза, эффективность очистки ОГ возрастает примерно в 3 раза. Модификация процессов сгорания может приводить к равноценным результатам при более низкой стоимости, однако, она связана с перестройкой конструкций двигателей, производства, и, к сожалению, в большинстве случаев приводит к снижению топливной экономичности. Это касается как дизелей, так и карбюраторных двигателей.

Переход к вихрекамерным и предкамерным процессам ведет к значительному снижению топливной экономичности на 15...20 % у дизелей. Переход к рециркуляции ОГ у карбюраторных двигателей приводит к снижению их мощности на 10...15 % и снижению топливной экономичности соответственно.

## КОРРЕКТНОСТЬ СРАВНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

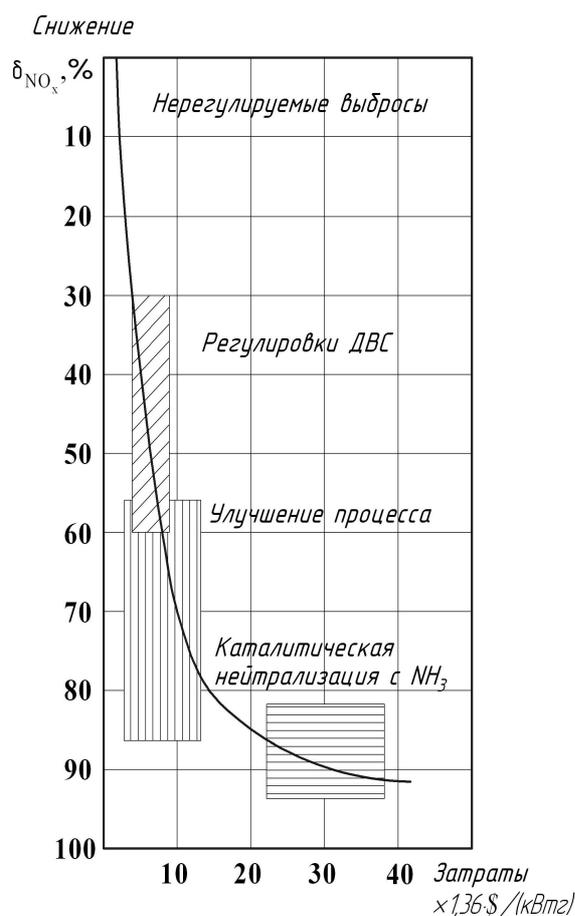


Рисунок 1 – Относительная стоимость и эффективность снижения выбросов оксидов азота дизелями в ценах 2007 г.

На рисунке 2 показано увеличение стоимости автомобиля в зависимости от эффективности инженерных методов снижения их токсичности. Оптимизация конструкций и регулировок 1 при самом низком уровне увеличения цен на автомобили не приводит к снижению токсичности ОГ более 40 %. Внедрение систем электроники 2 дает возможность при незначительном увеличении стоимости добиваться высоких результатов снижения выбросов, что приводит к увеличению стоимости автомобиля до 12 %. Перевод на газообразное топливо дает увеличение стоимости автомобиля максимально до 15 % при снижении токсичности на 60...75 %.

Применение двухступенчатых нейтрализаторов 5 приводит к увеличению стоимости автомобилей на 7...17 % при эффективности снижения выбросов 70...85 %, а применение трехступенчатых КН 6 при эффективности снижения выбросов до 90 % приводит к увеличению стоимости автомобилей на 10...27 %.

Тем не менее каталитическая очистка перспективна ввиду того, что есть возможность оснащать весь эксплуатируемый парк ДВС стандартными конструкциями КН.

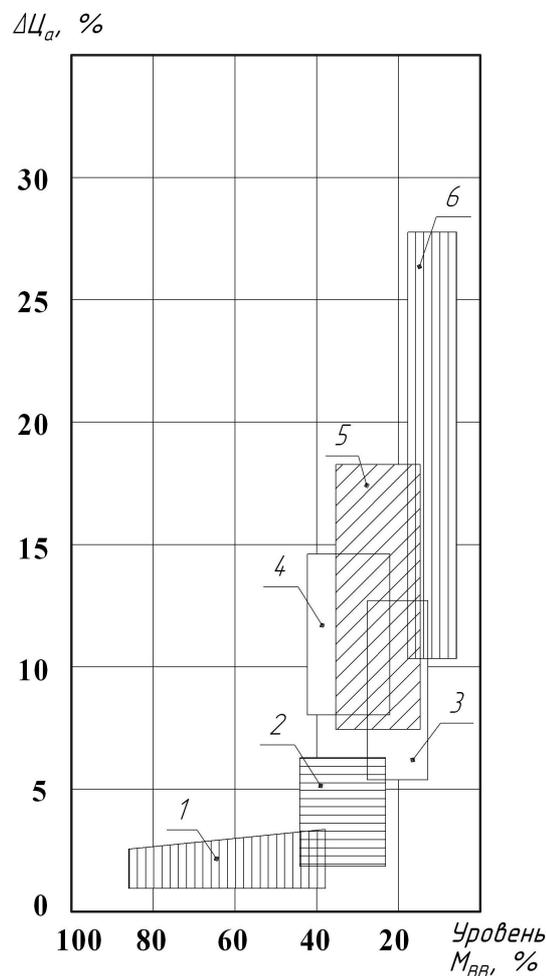


Рисунок 2 – Увеличение стоимости автомобиля в зависимости от эффективности средств снижения токсичности ОГ ДВС с искровым зажиганием

На рисунке 3 показана эффективность применения каталитических нейтрализаторов окислительного типа на предкамерных дизелях «Форд». Показано, что одновременное применение предкамерного процесса и каталитической нейтрализации ОГ приводит к созданию малотоксичных дизелей.

Всеми исследователями и фирмами отмечается увеличение расходов топлива при использовании КН на 2...3 %, а при использовании ТКН – на 10...12 %. Стоимость КН соизмерима со стоимостью ДВС, а стоимость заправки катализатором достигает 20 руб./кВт.

В зависимости от мощности ДВС, объем КН составляет от 650 до 1640 см<sup>3</sup>.

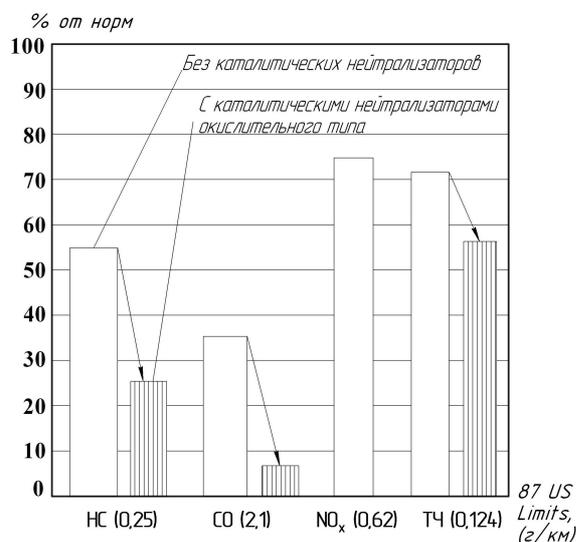


Рисунок 3 – Сравнение уровней выбросов дизелем фирмы «Форд» с предкамерой (полный объем цилиндров 1,80 л) без каталитического нейтрализатора и с нейтрализатором окислительного типа

Сложность использования КН и ТКН заключается в их осмолении, загрязнении катализаторов сажей и «отравлении» их оксидами серы. Износ катализаторов вследствие истирания может достигать 5...7 % на 100 часов работы, а надежность очистки ОГ достигает без регенерации катализатора 2000 часов. По данным Института горного дела (г. Екатеринбург) срок эффективной работы катализаторов достигал при использовании КН на автомобилях БелАЗ-540А 170 тыс. км пробега или 4 лет эксплуатации. При организации дополнительной подачи аммиака в КН и ТКН на транспортные средства размещают специальные баллоны. Для дизеля 6Ч12/14 баллон объемом 60 л хватает на 70 часов работы.

Метод термokatалитической очистки основан на проведении реакций окисления и восстановления предварительно нагретых газов. Для подогрева газов в ТКН используют газожидкостные или электрические нагреватели. Для ТКН, работающих с псевдосжиженным слоем катализатора, характерны низкие уровни создаваемых противо давлений и более низкие энергии активации ( $E_a$ ) реагирующих веществ. Этот эффект усиливается при подогреве отработавших газов. Исходя из уравнения Сванте-Аррениуса, константа скорости реакции:

$$K = A \exp(-E_a/RT),$$

где  $A$  – предэкспотенциальный множитель;  $E_a$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Известно, что в присутствии платинового катализатора в потоке отработавших газов при температуре  $T = 500$  К энергия активации в реакциях окисления изменяется с 168 до 126 кДж/моль. Тогда изменение скорости реакции происходит:

$$\exp(\Delta E/RT) = 30000 \text{ раз.}$$

Если же идет дополнительный подогрев газов, то можно ожидать по правилу Вант-Гоффа увеличение скорости реакции в 2...4 раза при повышении температуры на каждые 10 градусов.

Катализаторы способствуют снижению температуры сгорания сажи. Так на катализаторе из пудры  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  с пропиткой  $\text{KCl}\cdot\text{NH}_4\cdot\text{VO}_3$  и  $\text{CuCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  с последующим кальцинированием температура сгорания сажи снижена с 660 до 396°С.

Высокие скорости реакций окисления позволяют добиваться значительного снижения содержания альдегидов и других углеводородов в составе ОГ. Это связано и со значительным снижением уровня запаха ОГ. На рисунке 4 показана эффективность воздействия на уровни запаха ОГ организацией рабочих процессов и каталитической нейтрализацией.

Как видно из рисунка 4, для дизелей с неразделенными камерами сгорания введение каталитической нейтрализации ОГ приводит к снижению уровня запаха вместе со снижением углеводородов РСН. Введение разделенных камер сгорания оказывается равноценным применению КН на дизелях с неразделенными камерами сгорания. Применение КН на дизелях с разделенными камерами сгорания (КС) приводит к дальнейшему снижению уровня запаха ОГ, а внедрение дополнительного отключения цилиндров приводит к тому, что уровень запаха ОГ можно оценивать как «слабый».

Применение ТКН связано с большими затратами, высокой металлоемкостью изделий, сложностью в изготовлении, увеличением расхода топлива и требованиям к высокой квалификации обслуживающего персонала.

В настоящее время, как правило, используются комбинированные системы снижения вредных выбросов поршневых ДВС. Причем с течением времени происходят эво-

## КОРРЕКТНОСТЬ СРАВНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

люции систем, связанные, в первую очередь, с совершенствованием рабочих процессов двигателей.

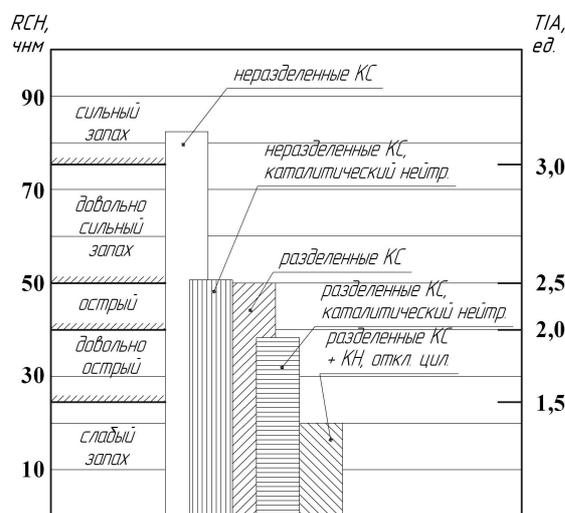


Рисунок 4 – Влияние способов снижения вредных выбросов на уровень запаха отработавших газов дизеля

В результате анализа технологий нейтрализации отработавших газов и изучения конструкций нейтрализаторов были сделаны следующие выводы:

- в целях снижения металлоемкости нейтрализаторов необходимо вести разработки по замене стальных наполняемых патронов, решеток, перегородок в реакторах новыми материалами;

- необходимо иметь технологии, позволяющие осуществлять изготовление катализаторов с учетом особенностей мест установки КН в системе выпуска;

- необходимо иметь ресурсосберегающие, малоотходные технологии, позволяющие совмещать процессы получения носителей и катализаторов.

В последние годы появились высокоэффективные электрофильтры, например, Восточно-Украинского государственного технического университета (Луганского машиностроительного института), применяемые в серийных конструкциях нейтрализаторов для дизелей. Снижение выбросов сажи достигает 99 % при затрачиваемой мощности 60 Вт. Электрофильтры применяются на автомобилях с дизелями ЯМЗ-238, ЯМЗ-236, ЯМЗ-240 и имеют габариты 98×305×244.

Известно применение фильтров из ультратонких волокон: стекловолокон, синтетических волокон. Подобные фильтры разработа-

ны фирмами «Крайслер» (США), «Нипонденсо» (Япония). Есть сведения о применении керамических фильтров. Отмечается их высокая эффективность по удержанию твердых частиц и указывается на быстрое осмоление фильтров при длительной работе дизелей на малых нагрузках и холостом ходу. Фильтрацией отработавших газов можно снизить дымность в 3...4 раза, если фильтры изготовлены из  $2\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$  с размерами пор до 15 мкм. Они способны удержать за 100 км пробега автомобиля с дизелем мощностью 139 кВт до 2,5 литров сажи.

Частицы сажи размером 0,05...1,00 мкм уловить традиционными фильтрами не удастся, поэтому рекомендуется применять керамические блочные фильтры. Применение таких фильтров фирмой «Фольксваген» и фирмой «Мерседес-Бенц» (ФРГ) привело к улавливанию до 40 % сажи.

Дожигание в коллекторах является известным способом снижения выбросов окиси углерода карбюраторными двигателями и дизелями. Но этот способ снижения вредных выбросов касается только продуктов неполного сгорания. Кроме этого, есть данные о том, что при снижении выбросов СО на 65...70 % наблюдается увеличение выбросов окислов азота на 12 %. Дожигание в коллекторах нельзя назвать перспективным и по той причине, что для организации горения продуктов неполного сгорания возникает необходимость подачи воздуха и топлива в продукты сгорания, оснащения системы свечами накаливания, сигнализацией исправности и автоматикой управления подачей топлива.

Из перечисленных выше инженерных решений проблемы снижения выбросов с ОГ ДВС наибольшее распространение в настоящее время нашли электрофильтры и керамические фильтры. Внимание к последним объясняется возможностью их периодической очистки промывкой, что удлиняет срок их службы и эксплуатации. Есть данные о том, что керамические фильтры можно эксплуатировать до 11 тыс. часов.

И, тем не менее, перспектива остается за применением каталитической очистки отработавших газов.

Анализируя данные об эффективности каталитической очистки отработавших газов на различных катализаторах, невозможно прийти к однозначным выводам по следующим причинам:

- 1) в литературе в большинстве случаев не указываются условия испытаний по параметрам окружающей среды; неизвестными

остаются такие параметры как температура  $T_0$ , давление  $P_0$ , влажность  $W_0$  и скорость движения среды;

2) отсутствует информация о составе и происхождении газа, подлежащего очистке; не указывается, проведены испытания на натуральной смеси газов от источника выбросов или же на искусственной смеси отдельных компонентов;

3) в большинстве случаев непонятно, испытания проведены на образце устройства или на его макете;

4) многими авторами опущены данные о тепловом состоянии катализатора;

5) материалы, применяемые в качестве каталитических элементов, не характеризуются по физико-химическим свойствам, а лишь перечисляются химические элементы, входящие в них.

Поэтому одной из задач наших исследований было выделено создание комплекса, обеспечивающего идентичность условий сравнения каталитических материалов и приближение условий испытаний к реально существующим в практике их использования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев, Ю. С. Новый взгляд на проектирование каталитических нейтрализаторов / Ю. С. Медведев // Двигателестроение. – 2004. – № 2. – С. 23-24.
2. Мельберт, А. А. Каталитические нейтрализаторы с отключаемыми ступенями очистки. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2003. – 8 с. Дан. в ВИНТИ 15.07.2003, № 1391 – В 2003.
3. Новоселов, А. Л. Закоксовывание пористых проницаемых СВС-каталитических блоков нейтрализаторов / А. Л. Новоселов, А. А. Мельберт, А. А. Жуйкова // Вестник КГТУ. Серия Транспорт. – Вып. 40. – 2006. – С. 62-66.
4. Новоселов, А. Л. Тенденции развития конструкций фильтров для очистки отработавших газов дизелей от твердых частиц / А. Л. Новоселов, А. Г. Кашкаров, А. А. Мельберт // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: сб. статей; под ред. д.т.н., проф., акад. А. Л. Новоселова / Академия транспорта РФ, АлтГТУ им. И. И. Ползунова. – Барнаул, 2001. – С. 16-19.
5. Kandyas I.P. Simulation of continuously regenerating diesel particulate filters in transient driving cycles / I.P. Kandyas, G.C. Koltsacüs // Proc. Inst. Krishnan Ravi. SCR: California cleaning // Mod. Power Syst. – 2002. – Aug. – P. 49.