

Рис. 4. Оценка методической погрешности  $\delta m_{f, st}^{st}$  а) при испытаниях легковых автомобилей (R-83); б) при испытаниях грузовых автомобилей (R-49); в) при выполнении сделанных рекомендаций

**Выводы**

1. Неопределенность результата измерений массы навески ТЧ составляет: при испытаниях дизелей легковых автомобилей (требования Правил R-83:  $\tau_{st} = 2 \dots 80$  час,  $t_{st} = 22 \pm 3$  °C) – 12,2 %; при испытаниях дизелей грузовых автомобилей (требования Правил R-49:  $\tau_{st} = 2 \dots 36$  час,  $t_{st} = (20 \dots 30) \pm 6$

°C) – 12,4 %.

2. Сокращение допустимых диапазонов варьирования температуры -  $t_{st}$  и продолжительности –  $\tau_{st}$  процесса стабилизации фильтров до интервалов:  $t_{st} = 22 \pm 1$  °C и  $\tau_{st} = 22 \pm 2$  час позволяет уменьшить неопределенность результата измерения массы навески ТЧ до 1,4%, т.е. в 8,8 раз.

**Список литературы:**

1. Regulation No 83. Revision 2 . Uniform provision concerning the approval of vehicles with regard to the emission of pollutants according to engine fuel requirements. – The 05 series of amendments - United Nations Economic and Social Council Economic Commission for Europe Inland Transport Committee Working Party on the Construction of Vehicles. – E/ECE/TRANS/505. – 30 October 2001 – 216 p.
2. Regulation No 49. Revision 2. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines and vehicles equipped with C.I. engines with regard to the emissions of pollutants by the engine. – United Nations Economic and Social Council Economic Commission for Europe Inland Transport Committee Working Party on the Construction of Vehicles. – E/ECE/TRANS/505. – 61 p.
3. Nobuyoshi H. Measurement of diesel exhaust emissions with mini-dilution tunnel / H. Nobuyoshi, F. Izumi, S. Taceshi // SAE Techn. Pap. Ser. – 1989. – No 890181. –12 p.
4. Smart Sampler PC SPC 472. Operating Manual. Diesel particulate dilution and sampling equipment. AVL, Austria, 1993. – 69 p.
5. Engeljehring K. Meeting ISO 8178 Requirements for the Measurement of Diesel Particulates with Partial-Flow Dilution Systems / K. Engeljehring, W. Schindler, Sulzer // SAE Technical Paper Series 932466. – 1993. – 10 p.

УДК 621.433:662.767.2

*И.П. Васильев, канд. техн. наук*

**МЕТОДЫ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ И ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ПРИ РАБОТЕ ДВИГАТЕЛЕЙ НА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВАХ**

**Постановка проблемы**

В настоящее время перед человечеством стоят две глобальные проблемы: истощение энергетических ресурсов и изменение климата, вызванное сжиганием невозобновляемых углеводородных топлив и выделением парниковых газов (ПГ), оговоренных Киотским протоколом (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O).

В свете этого предпочтение следует отдавать возобновляемым энергоносителям, например, топливам из биомассы первого поколения (биодизельному топливу, растительным маслам, биогазу) [1]. За ними последуют топлива второго поколения, которые могут получать из любой биомассы. В

перспективе появляется возможность производить биотоплива с заданными характеристиками путем селективных и генетических изменений растений.

Использование новых топлив предопределяет изменение не только уровня вредных выбросов (ВВ) отработавших газов (ОГ), но и появление новых веществ, например, от добавок в систему нейтрализации.

Постоянно происходит ужесточение норм на ВВ с ОГ, которые изменением только рабочего процесса двигателя практически невозможно обеспечить. Это предопределяет совершенствование

существующих и разработку новых систем нейтрализации и получения катализаторов [2].

При этом появляется необходимость учета ущерба не только от традиционных ВВ ОГ, оксидов азота и дисперсных частиц (ДЧ), но и от ПГ, поскольку уже определены стоимость единицы теплового эквивалента и соотношения между ПГ.

Согласно Киотскому протоколу к парниковым газам относятся вещества, приведенные в таблице и они соответственно соотносятся с CO<sub>2</sub> по директиве 2009/30/ЕС, вступающей в силу с июля 2010 года.

Таблица. Парниковые газы и их общий тепловой эквивалент

Химическая формула	Общий тепловой эквивалент	Отражены в Киотском протоколе
CO <sub>2</sub>	1	x
CH <sub>4</sub>	23	x
N <sub>2</sub> O	296	x
CO	4	
NH <sub>3</sub>	6	
NO <sub>x</sub>	12	
CHF <sub>3</sub>	11700	
CF <sub>4</sub>	6500	x
SF <sub>6</sub>	22800	

Использование различных восстановителей в системах нейтрализации предопределяет учет ущерба от не прореагировавших газов восстановителей, например, NH<sub>3</sub>.

При использовании альтернативных топлив, например, метана в газовых двигателях его парниковое воздействие в ОГ становится определяющим. Поэтому для объективной оценки воздействия ОГ необходима их комплексная оценка [3].

При работе на альтернативных топливах необходимо оценивать изменение уровней выбросов и качественный состав ОГ, а также возможность появления новых компонентов ОГ, например, при работе двигателей на метане. Также следует учитывать, что метан является и ВВ и ПГ и это требует учета этих двух воздействий [4].

При работе на водороде в некоторых случаях отмечен повышенный выход оксидов азота [5].

А при работе двигателей на биотопливах, содержащих около 10% кислорода, наблюдается повышенный выход оксидов азота примерно на 10% и увеличенная дисперсность ДЧ, что является отри-

цательным фактором и требует специальных мероприятий по их уменьшению, например, с помощью обычных фильтров или электрокаталитических фильтров (ЭКФ) [1].

### Системы нейтрализации ОГ

Использование альтернативных топлив в ДВС предопределяет оценку изменения уровня не только традиционных ВВ, но ПГ и новых веществ.

Все это требует разработку комбинированных систем нейтрализации, обеспечивающих выполнение все ужесточающихся норм на ВВ с ОГ. Причем для эффективной работы этих систем необходимо использование диагностирования с применением необходимых датчиков, например, кислорода, аммиака и оксидов азота.

На рис. 1 представлены способы по обеспечению норм Евро 4 и Евро-5.

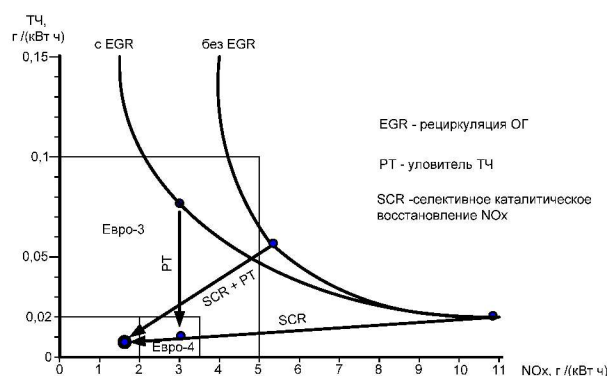


Рис. 1. Комплексные системы нейтрализации для обеспечения норм Евро 4 и Евро-5

Комбинация из системы рециркуляции (EGR) и уловителя твердых частиц (PT) позволяет обеспечить нормы Евро-4, но только система SCR позволяет обеспечить нормы Евро-5 от уровня ТЧ 0,02 г/(кВт·ч) и NOx 11 г/(кВт·ч). При более высоком уровне выделения ТЧ 0,06 г/(кВт·ч) необходима комбинация систем SCR и PT.

### Селективное каталитическое восстановление

В схемах SCR NO доокисляется до NO<sub>2</sub> и аммиакосодержащее вещество мочевины на специальном катализаторе разлагается с образованием аммиака, который затем восстанавливает NO<sub>2</sub> [6].

Недостатком данной системы является необходимость окисления NO до NO<sub>2</sub>, который вреднее, чем NO. Согласно стехиометрическим уравнениям при восстановлении NO<sub>2</sub> требуется в два раза больше аммиака, чем при восстановлении NO. Так для восстановления 3 молекул NO необходимо 2 моле-

кулы  $\text{NH}_3$  ( $\text{NH}_3/\text{NO}=0,667$ ), а для восстановления 3 молекул  $\text{NO}_2$  необходимо 4 молекулы  $\text{NH}_3$  ( $\text{NH}_3/\text{NO}=1,33$ ).

Для восстановления  $\text{NO}_2$  используется водный раствор с 32,5 % мочевины. И при его введении в нейтрализатор происходит снижение температуры ОГ за счет испарения воды примерно на  $60^\circ\text{C}$ , что приводит к снижению эффективности. Поэтому рекомендуется применение восстановителя в виде газа – аммиака и не рационально доокислять  $\text{NO}$  до  $\text{NO}_2$ .

Предложена схема восстановления оксидов азота с помощью газа аммиака [7], которая имеет эффективность 87% [8].

Для этих целей был подобран катализатор состава  $\text{CuO}:\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}5\%:\text{5}\%$ , на котором происходит регенерация сажи, начиная с температуры  $250^\circ\text{C}$ .

Выявлено, что работы SCR с кипящим слоем катализатора обеспечивают снижение гидравлического сопротивления при повышении степени использования аммиака.

На основании проведенных исследований была разработана и внедрена система SCR для реостатных испытаний тепловозов на Луганском тепловозостроительном заводе.

#### Снижение вредного воздействия ДЧ

По мере разработки мероприятий по снижению выбросов ДЧ ОГ выявились новые направления исследований [9]. Если раньше делался упор на снижение массового содержания частиц, то теперь обращается внимание на дисперсность частиц [10], а в перспективе на количество частиц в единице объема.

Наряду с традиционными системами снижения ДЧ: дожигателями, фильтрами и каталитическими нейтрализаторами, начинает использоваться электрическое коронное поле, например, в ЭКФ.

При одинаковом объеме и высоте слоя катализатора в ЭКФ эффективность по улавливанию сажи выше. Это объясняется тем, что под воздействием электрического поля происходит коагуляция ДЧ, которые осаждаются на осадительном электроде.

Но при этом необходимо решить задачи защиты изолятора и удаления ДЧ или механическим путем или путем регенерации.

Схема работы ЭКФ представлена на рис. 2 и описана в работе [11].

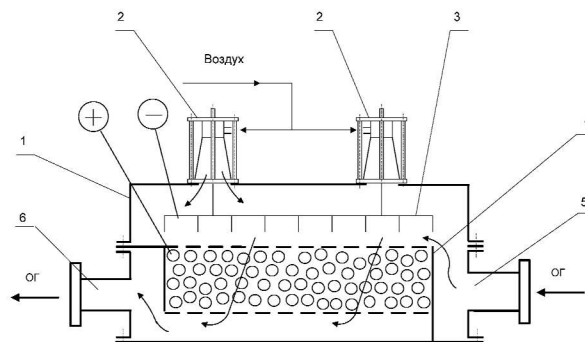


Рис. 2. Схема ЭКФ

1-корпус; 2-изолятор; 3-коронирующий электрод; 4-осадительный электрод; 5-впускной патрубок; 6-выпускной патрубок

ЭКФ состоит из корпуса, на котором устанавливается крышка, содержащая два изолятора. На изоляторах крепится коронирующий электрод. Для защиты изоляторов от отложений сажи они продуваются воздухом. В качестве осадительного электрода используется катализатор, расположенный между двумя металлическими решетками. На коронирующий электрод подается отрицательный потенциал, на осадительный – положительный. При работе дизеля ДЧ в зоне коронирующего электрода заряжаются, а затем осаждаются в фильтрующем каталитическом слое осадительного электрода, что при низком гидравлическом сопротивлении обеспечивает более эффективное улавливание частиц до 80%, что на 40 % выше, чем без электрического поля. При этом происходит коагуляция частиц сажи.

С увеличением температуры ОГ эффективность улавливания падает, что предопределяет место его установки после системы нейтрализации рис. 3.

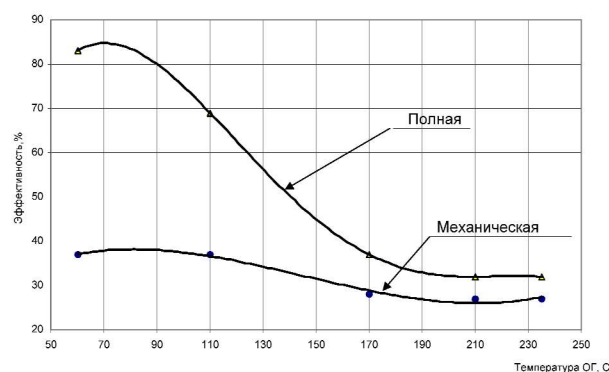


Рис. 3. Эффективность ЭКФ от температуры

### Ионная имплантация – способ нанесения катализаторов

Составляющим элементом нейтрализаторов являются катализаторы. Одним из современных способов приготовления катализаторов, который относится к области нанотехнологии, является ионная имплантация (ИИ). Схема установки ИИ представлена на рис. 4 и описана в работе [2].

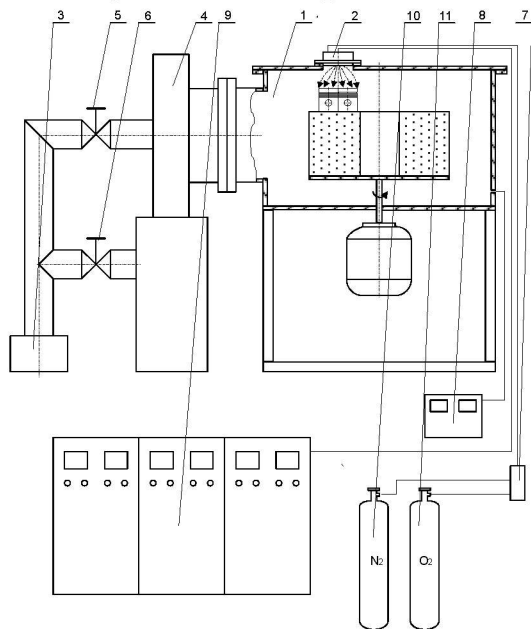


Рис. 4. Схема установки ИИ

1-вакуумная камера; 2-источник ионов; 3-форвакуумный насос; 4-высоковакуумный агрегат; 5-вентиль предварительной откачки; 6-вентиль основной откачки; 7-натекатель; 8-вакууметр; 9-блок питания и управления; 10-баллон с азотом; 11-баллон с кислородом

Установка содержит вакуумную камеру, вакуумные насосы и источник ионов. В источнике ионов используются сменные пластины, с поверхностей которых под высоким напряжением отрываются ионы металла, которые бомбардируют поверхность наносимой детали. Принципиальным отличием ИИ является то, что ионы катализатора внедряются в поверхность без резкой границы раздела, что исключает их скалывание.

Этот способ был апробирован на катализаторах на лабораторной установке ОАО «АЗОТ» (г. Северодонецк), на прецизионных поверхностях деталей топливной аппаратуры ЯЗДА (г. Ярославль). Использован при нанесении катализаторов на поверхности камер сгорания дизелей ЗИЛ-6451 (ОАО «завод им. И. А. Лихачева», г. Москва), ГАЗ 5601 «STEYR»(ОАО «ГАЗ», г. Нижний Новгород).

Разработаны установки для промышленного нанесения катализаторов как на керамические носители, так и на детали камер сгорания.

### Перспективы развития систем нейтрализации

Одной из важнейших задач нейтрализации ОГ является комбинация элементов систем нейтрализации с целью обеспечения высокой эффективности очистки при минимальных выбросах не прореагировавшего восстановителя. Для этого необходимы использование соответствующих датчиков и реализация эффективных алгоритмов управления, контролирующей работу на протяжении всего времени эксплуатации. Примером такой системы является схема СКВ, представленная на рис. 5 [15].

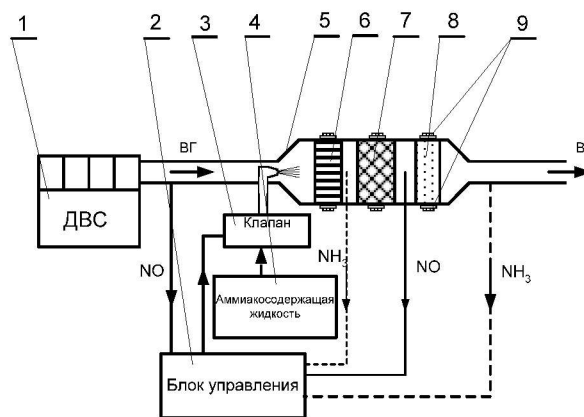


Рис. 5. Схема СКВ с датчиками аммиака и оксидов азота

1-ДВС; 2-блок управления; 3-регулирующий клапан; 4-емкость с аммиаком; 5-нейтрализатор; 6-катализатор разложения мочевины; 7-катализатор восстановления оксидов азота; 8-катализатор разложения аммиака; 9-заглушки

Схема обеспечивает контроль над работой нейтрализатора и отслеживает снижение активности и выход из строя различных ступеней катализаторов.

### Постановка задачи по моделированию процессов нейтрализации ОГ

Для оценки процессов нейтрализации необходимо применение уже используемых и разработка новых математических моделей:

- рабочего процесса и образования ВВ и ПГ двигателя при работе на альтернативных топливах;
- кинетики восстановления оксидов азота;
- эффективности работы нейтрализатора с неподвижным и кипящим слоями катализаторов;

- процесса восстановления оксидов азота и окисления СН и СО<sub>2</sub>;
- механизма коагуляции сажи в ЭКФ;
- регенерации ДЧ.

#### Заключение

Путем изменения рабочего процесса уже практически невозможно обеспечить все более ужесточающиеся нормы на ВВ с ОГ. Использование альтернативных топлив приводит к изменению уровня выделения ВВ, ПГ и появлению новых ненормируемых ВВ, что предопределяет совершенствование систем нейтрализации ОГ. Так, использование биотоплив приводит к росту оксидов азота и уменьшению дисперсности ДЧ.

Это требует применения новых и усовершенствованных способов нейтрализации, например, SCR, обеспечивающий выполнение норм Евро-5, и применение ЭКФ.

Важным фактором является привлечение современных технологий (нанотехнологии) для приготовления катализаторов, например, способом ионной имплантации.

В методиках расчета ущерба необходимо учитывать не только ВВ, но и ПГ и не прореагировавшие газы восстановители. Математические модели должны включать расчеты систем нейтрализации с учетом процессов SCR, коагуляции ДЧ в ЭКФ и их регенерации.

Совершенствование систем нейтрализации должно идти по пути создания внутренних систем диагностирования с использованием датчиков оксидов азота, аммиака и кислорода.

В перспективе необходимо введение норм на выбросы ПГ и восстановителей с ОГ двигателей.

#### Список литературы:

1. Васильев И. П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели

дизеля: монография / И. П. Васильев. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2009– 237 с. 2. Васильев И. П. Внутрицилиндровый катализ в дизелях. / И. П. Васильев, О. В. Ключ. Калининград: КГТУ, 2008. – 133 с. 3. Крайнюк А. И. Комплексная оценка эффективности использования топлив растительного происхождения в дизелях / А. И. Крайнюк., И. П. Васильев // Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. – № 2. – С. 77–81. 4. Васильев И. П. Методика оценки ущерба, наносимого отработавшими газами ДВС при использовании в качестве топлива метана / И. П. Васильев // Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. – № 2. – С. 94–96. 5. Effect of water injection and spark timing on the nitric oxide emission and combustion parameters of a hydrogen fuelled spark ignition engine / Subramanian V., Mallikarjuna J. M., Ramesh A. // A. Int. J. Hydrogen Energy. – 2007. – 32. – №9. – pp. 1159–1173. 6. Patent 2009/0133383 A1 US, F 01N 3/20. Selective NOx catalytic reduction system including an ammonia sensor / Mark A. Shost; Заявитель и патентообладатель Delphi technologies, INC. - №11/998073; заявл. 28.11.07; опубл. 28.05.09. 6. Звонов В.А. Исследование каталитической нейтрализации отработавших газов дизеля / В. А. Звонов З. Т. Звонова, П. П. Фесенко, И. П. Васильев // Двигатели внутреннего сгорания. – 1978. - № 28. - С. 121-127. 7. Патент на к/м № 37424 Україна, F 01 N 3/00. Спосіб селективного відновлення оксидів азоту відпрацьованих газів дизеля / Васильєв І. П.; Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (UA).– № и 200808381; Заявлено 23.06.08; Опубл. 25.11.08. Бюл. №22. 8. Оценка и контроль выбросов дисперсных частиц с отработавшими газами дизелей // В. А. Звонов, Г. С. Корнилов, А. В. Козлов, Е. А. Симонова. - М.: Издательство Прима-Пресс-М, 2005. – 312 с. 9. Fuel economy and environmental characteristics of biodiesel and low sulfur fuels in diesel engines // J. Krahl, A. Mumack, O. Schröder, H. Stein, A. Hassaneen // Landbauforschung Völkenrode. – 2005. – № 2 (55). – S. 99–106. 10. Заиграев Л.С. Исследование эффективности сажевого электромеханического фильтра при повышенных температурах / Л. С. Заиграев, А. С., Попов, Васильев, А. М. Красносельский // Экология двигателя и автомобиля: Сб. науч. тр. НАМИ. – М., 1998. – С. 91 – 95. 11. Патент на к/м № 40343 Україна, F 01 N 3/00. Спосіб діагностування роботи нейтралізатора селективного відновлення оксидів азоту при роботі на альтернативних паливах / Васильєв І. П.; Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (UA).– № и 200811299; Заявлено 18.09.08; Опубл. 10.04.09. Бюл. №7.